



**Politecnico
di Torino**

Politecnico di Torino

Corso di Laurea Magistrale in Ingegneria Meccanica

Orientamento: Fabbricazione Additiva

A.a. 2020/2021

Sessione di Laurea Dicembre 2021

**Metodi di “Progettazione generativa” per
l’Ottimizzazione Funzionale di un
componente idraulico prodotto tramite
tecniche di Fabbricazione Additiva**

Relatori:

Prof. Luca Iuliano

Prof. Abdollah Saboori

Candidato:

Giovanni La Picca

A mio Nonno

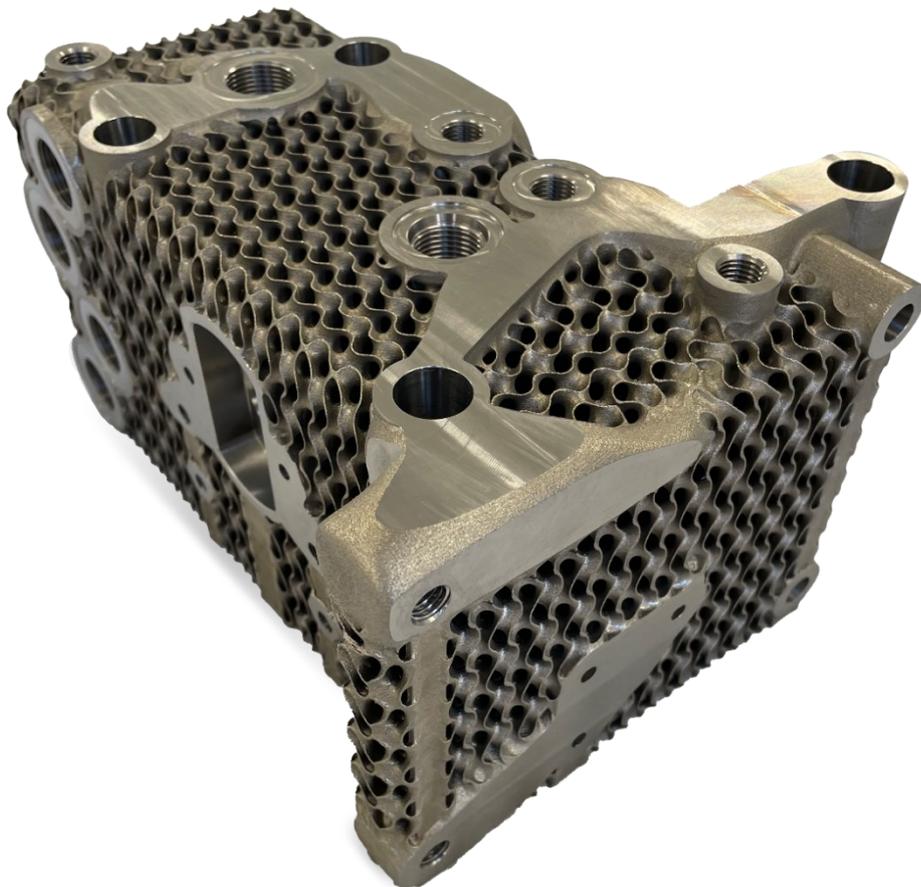
Sommario

Introduzione	2
1 Additive manufacturing.....	4
1.1 Stato dell'arte	4
1.1.1 Le origini dell'Additive Manufacturing	4
1.1.2 Additive Manufacturing – Cenni sugli Step produttivi fondamentali.....	5
1.1.3 L'Additive Manufacturing Oggi.....	8
1.1.4 Vantaggi e Svantaggi dell'Additive Manufacturing	13
1.1.5 Applicazioni e settori interessati	20
2 Tecniche di fabbricazione additiva	28
2.1 Laser - Powder Bed Fusion – il processo	28
2.1.1 Melting Pool	30
2.1.2 Laser	31
2.1.3 Parametri di processo della tecnologia LPBF	33
2.2 Vantaggi del L-PBF	34
2.3 Limiti del L-PBF	36
2.4 I materiali metallici per l'Additive	39
3 Design for Additive Manufacturing - DfAM.....	42
3.1 Principi.....	42
3.2 Considerazioni generali sulla progettazione per AM metallo	46
3.2.1 Considerazioni sulla FA metallo – Driver AM	49
3.3 Linee guida per il processo L-PBF	50
3.3.1 Tensioni residue e concentrazione di tensioni.....	58
3.3.2 Orientamento della parte.....	60
3.3.3 Strutture di supporto.....	65
3.3.4 Post lavorazioni alle macchine utensili.....	74
3.3.5 Tipiche operazioni di post processo	75
4 Caso Studio - Riprogettazione del componente.....	76
4.1 Descrizione del componente originale.....	76
4.2 Analisi critica del componente originale	80
4.3 Carichi, vincoli e condizioni al contorno.....	86
4.4 Analisi FEM preliminare	88
4.5 Caratteristiche del materiale.....	91
4.6 Identificazione Design space e preparazione modello.....	93
4.7 Analisi e processo di ottimizzazione.....	102

4.7.1	Ottimizzazione topologica.....	104
4.7.2	Design generativo.....	107
4.7.3	Ottimizzazioni iniziali.....	109
4.7.4	Ricostruzione del componente in lega di titanio.....	113
4.7.5	Verifica componente	115
4.8	Ciclo di lavoro del componente in macchina L-PBF.....	118
4.8.1	Superfici da rifinire e preparazione modello.....	118
4.8.2	Preparazione per la produzione mediante L-PBF – lattice infill	122
4.9	Processo di stampa.....	127
4.9.1	La macchina - MetalFAB1 Additive Industries.....	127
4.9.2	Controllo qualità – PrintRite3D	133
4.10	Ispezione e lavorazioni alle macchine utensili	135
4.11	Report dimensionale e collaudo.....	139
5	Conclusioni	144
6	Bibliografia.....	Errore. Il segnalibro non è definito.

ABSTRACT

*Ad oggi le tecnologie additive, riescono a venire incontro alle richieste di molte aziende, per diverse applicazioni ed esigenze, permettendo di superare i limiti imposti dal passato della progettazione e delle tecnologie tradizionali esistenti. Tuttavia, queste nuove tecniche di fabbricazione ancora oggi devono fare i conti con l'aspetto economico e i limiti tecnologici poiché risultano ancora un'alternativa costosa e da porre sotto analisi in relazione a diversi profili. La tesi proposta ha lo scopo di descrivere il processo di riprogettazione, ottimizzazione attraverso la progettazione generativa, produzione e post processo di un componente realizzato mediante una delle tecniche di fabbricazione additiva, e di mostrare i vantaggi ed i limiti di questa rispetto alle tecnologie tradizionali. Il lavoro è stato svolto in collaborazione con la **NIRI S.r.l.**, startup con sede a Torino. Grazie al loro Know-how nella progettazione e produzione per additive manufacturing è stato possibile realizzare un assieme idraulico composto da due blocchi da inserire in un banco prova, al fine di riprodurre un particolare percorso di canali e quindi testare delle valvole a cartuccia oleodinamiche. Questo ha permesso di mostrare una valida alternativa nel settore dell'oleodinamica per una applicazione idraulica innovativa, rispetto alle attuali, che sfida i limiti della produzione tradizionale ed i limiti delle applicazioni ad oggi conosciute, esaltando le potenzialità e le possibilità offerte dalla tecnica additiva "Selective Laser Melting". In questa tesi viene proposto un metodo di progettazione basato sul DfAM che ha permesso di ottenere una riduzione del peso di più del 70% dell'intero assieme ed in generale un'ottimizzazione funzionale dello stesso. Nella parte conclusiva si riportano le valutazioni finali a valle del collaudo e della messa in lavoro dei componenti prodotti. Un confronto e uno sguardo al futuro di questa tecnologia che si fa sempre più spazio nel mondo dell'ingegneria e non solo.*



Introduzione

In questi ultimi anni stiamo assistendo ad una continua e forte crescita della tecnologia additiva, sulla spinta dei recenti sviluppi studi e su di essa. Anche la risonanza mediatica che si è sviluppata intorno a questa tecnologia ha contribuito a creare tanta aspettativa e allo stesso tempo disinformazione su cosa sia effettivamente l'additive manufacturing.

Questo lavoro di tesi è focalizzato su questa tecnologia, in particolare sulla produzione di un Blocco Oleodinamico per un banco prova. Ad oggi, infatti, sono molte le tecniche di fabbricazione additiva in uso, ed anche le applicazioni tendono a ricoprire sempre maggiori ambiti produttivi. Infatti, i processi di produzione additiva sono tecnologicamente abbastanza maturi per la produzione industriale e grazie anche alla crescente concorrenza tra i fornitori, tale tecnologia diventa economicamente fattibile per un numero crescente di applicazioni industriali e per gli utenti finali. Tuttavia, la produzione di sistemi di questo tipo in metallo è ancora agli inizi.

Il progetto di tesi iniziato in collaborazione con la 3DSystem e successivamente proseguito con la **NIRI s.r.l.**, è stato commissionato da una azienda leader nel mondo in vari settori industriali che spaziano dall'automazione all'idraulica.

La startup NIRI S.r.l è una società di ingegneria che ha l'obiettivo di innovare il mondo della manifattura, dello sport e medicale tramite l'utilizzo di tecniche di progettazione e tecnologie di produzione all'avanguardia. Le competenze dei suoi collaboratori sono prevalentemente legate ad esperienze maturate in aziende multinazionali impegnate nella produzione e vendita di servizi e prodotti. Nel corso degli anni la società ha potuto attrarre clienti importanti e crearsi una buona reputazione nel campo dell'Additive Manufacturing costruendo progetti per i suoi clienti. Nel corso degli anni la Società ha altresì sviluppato progetti propri, nel campo sportivo, medicale e alimentare, sempre con lo scopo di innovare e risolvere problemi irrisolti con lo scopo di proporre al mercato prodotti più sostenibili e più performanti.

Il lavoro è diviso in diverse fasi. La prima di queste è spesso tra le più sottovalutate nell'ambito della progettazione, ovvero analizzare con il cliente le possibilità di passare ad una tecnologia additiva per i componenti desiderati. In questa prima fase i nuovi clienti che si stanno avvicinando con questo tipo di tecnologia vengono seguiti e guidati per poter soddisfare le loro esigenze e di conseguenza determinare la



strategia migliore per la realizzazione dei componenti richiesti. Questa fase di informazione è indispensabile per definire il caso, le linee guida da seguire e gli obiettivi.

In una successiva fase si passa alla riprogettazione in chiave "DfAM", in seguito alla messa in macchina e produzione del componente e alla lavorazione in CNC per la realizzazione di tutte le geometrie unificate e per il raggiungimento delle tolleranze dimensionali e geometriche di progetto. Infine, si conclude con il collaudo in azienda del componente e alla messa in opera dell'intero nuovo gruppo di pezzi.

I contenuti della tesi sono stati suddivisi in 5 capitoli, ciascuno dei quali necessario alla comprensione del successivo.

Il primo è un capitolo introduttivo che fornisce una panoramica generale dell'Additive Manufacturing e in particolare si propone di inquadrare queste tecnologie nel mercato per dare un'idea di dove si sia sviluppata fino ad oggi, in quali settori e perché. Con uno sguardo alle applicazioni e alla sua diffusione.

Il secondo capitolo offre una panoramica delle tecnologie metallo in particolare quella Laser a letto di polvere, con cui sono stati prodotti i componenti. La presentazione di questa tecnologia, i suoi vantaggi e i limiti.

Il terzo capitolo contiene una spiegazione del Design for Additive Manufacturing (DfAM), con particolare attenzione a quello metallo e alle linee guida di questa tecnologia per quanto riguarda la progettazione e la messa in macchina, in modo da offrire una migliore introduzione al capitolo successivo.

Nel quarto capitolo si offre una panoramica completa del caso in studio, ponendo particolare attenzione a tutti gli aspetti cruciali in questo tipo di progetti. Successivamente la descrizione di tutte le fasi di riprogettazione, dalle analisi preliminari fino alle ottimizzazioni e verifiche del design finale.

Si conclude trattando tutte le fasi del ciclo di lavoro, dalla preparazione del modello per la messa in macchina fino alle lavorazioni successive con riguardo al processo di fresatura CNC. Infine, si è sottolineata l'importanza dei file 2D e 3D dei componenti che consentono una miglior comunicazione che intercorre dal reparto progettisti al reparto tecnico.

Nell'ultimo capitolo si presentano le conclusioni a valle del collaudo e dei risultati ottenuti dopo un mese dalla consegna del componente all'azienda ed uno sguardo al futuro e alle possibilità di utilizzare questa tecnologia in questo settore. Questo lavoro di tesi è un buon punto di partenza per aprire la strada a questo tipo di applicazioni in particolare l'additive manufacturing nel mondo del oil and gas.



1 Additive manufacturing

1.1 Stato dell'arte

1.1.1 Le origini dell'Additive Manufacturing

La fabbricazione additiva (FA) o Additive Manufacturing (AM), inizialmente nota con il nome di Rapid Prototyping (RP), è una tecnologia innovativa recentemente definita dall' ASTM (American Society of Testing and Materials) come "Processo di unione del materiale per creare oggetti dai dati del modello 3D, di solito strato sopra strato, in contrasto con le metodologie di produzione sottrattive". [1]

Questa tecnologia permette infatti la produzione di oggetti, caratterizzati anche da geometrie molto complesse, in poche ore e senza l'utilizzo di utensili aggiuntivi partendo direttamente dal modello matematico CAD 3D procedendo strato per strato. Il periodo storico che viene associato alla nascita della fabbricazione additiva sono gli anni Ottanta da un brevetto dell'azienda statunitense 3D Systems; l'obiettivo iniziale di questa tecnologia è ridurre i tempi per la realizzazione dei prototipi e infatti, proprio per tale motivo, per molti anni ha assunto il nome di Prototipazione Rapida o Rapid Prototyping (RP).

Solamente oggi si assiste al successo di tali tecniche di fabbricazione, ma è da almeno trent'anni che esistono tecnologie additive. Per poter capire meglio tale fenomeno è necessario compiere qualche passo indietro e risalire alle origini.

L'additive manufacturing nasce alla fine degli anni '80, da un'idea di uno statunitense, Chuck Hull, che brevettò la prima macchina di Stereolitografia. Questa era pensata per la realizzazione di prototipi concettuali in materiale polimerico per l'industria dell'automotivo. Nel 1985 fu presentato il brevetto, successivamente venne fondata la 3DSystem ed iniziò così la distribuzione di stampanti 3D. Hull, in questo modo, gettò le basi aprendo la strada per questo settore emergente.

Nel 1986 Carl Deckard, Joe Beaman e Paul Forderhase sviluppando le idee di Chuck Hull diedero vita alla tecnologia selective laser sintering, un processo simile al precedente modello, ma la resina venne sostituita con il Nylon, un liquido con una polvere, la quale non ha alcun bisogno di supporto. [2]

Di fatto il processo di stereolitografia permetteva di ridurre i tempi di produzione dei prototipi accelerando quindi i tempi di progettazione. Questa è la ragione per la quale questa tecnologia venne inizialmente definita come Rapid Prototyping (RP).



Man mano che la tecnologia additiva si sviluppava nascevano altri settori di utilizzo come il Rapid Casting (realizzazione di anime per fonderia) e Rapid Tooling (produzione di inserti per stampi). Intorno agli anni 2000 si sviluppano sempre di più le macchine additive per metallo attraverso le quali si assiste al realizzare veri e propri componenti definitivi: da quel momento in poi si comincia a parlare di Additive Manufacturing e la tecnologia additiva divenne una realtà commerciale. L'evoluzione negli anni dell'AM si può osservare in figura:

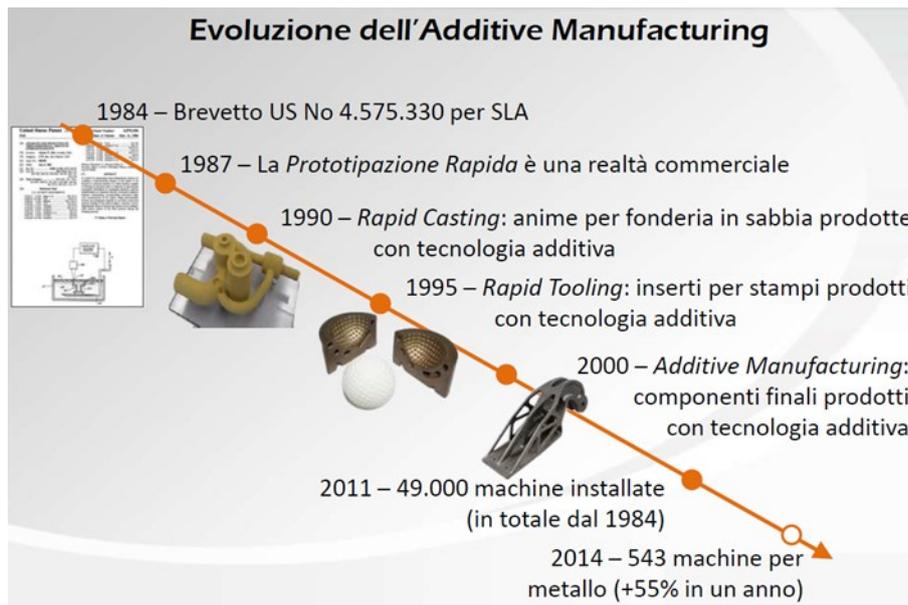


Figura 1.1 Evoluzione dell'AM. [3]

1.1.2 Additive Manufacturing – Cenni sugli Step produttivi fondamentali

Il processo produttivo per cui con il termine Fabbricazione Additiva indichiamo l'intero standard produttivo, si compone di diverse operazioni (step) che devono essere seguite per la produzione di un componente generico. Le operazioni per ottenere un pezzo finito sono elencate di seguito [2]:

- Step 1: Preparazione del modello matematico realizzato tramite software CAD
- Step 2: Conversione nel formato .STL (Standard Triangulation Language);
- Step 3: Scelta dell'orientamento del pezzo in macchina ed eventuale inserimento dei supporti (se il tipo di tecnologia additiva lo richiede);
- Step 4: Esecuzione dello slicing e successivo trasferimento del file .stl nella macchina che lo stamperà;
- Step 5: Avvio della costruzione del pezzo (i tempi di costruzione sono in funzione di diverse variabili); Ultimata la costruzione vi è l'estrazione dalla macchina e in

base alla tecnologia additiva, si procede con trattamenti termici per la distensione delle tensioni residue.

- Step 6: Rimozione e pulizia
- Step 7: Post processo
- Step 8: Applicazione

Più nel dettaglio, di seguito vengono spiegate tutte le operazioni elencate.

Si parte da un modello matematico tridimensionale CAD, che viene convertito in un file di estensione di Mesh. Questo può essere di tipo STL (Standard Triangulation Language o Solid to Layer) standard universale dell'AM oppure di diversa estensione (es: .OBJ). Questo formato va ad approssimare la superficie del pezzo con elementi triangolari di dimensioni diverse a seconda della risoluzione in modo da seguire il profilo del modello (Figura 1.2). Nonostante questo formato presenti ancora alcuni difetti (per esempio intersezioni e/o gap fra triangoli, normali invertite ecc..), tuttavia ad oggi risulta il più usato sia per motivi storici che di facilità. Inoltre, grazie all'uso di opportuni software è possibile ridurre tali errori.



Figura 1.2 Un esempio di triangolarizzazione.

Una volta ottenuto il file del componente, questo va opportunamente posizionato in macchina secondo le linee guida della tecnica additiva usata e dunque determinarne la crescita sulla piattaforma di lavoro. Quest'ultima è una fase cruciale a cui prestare particolare attenzione e necessita di un'opportuna ottimizzazione caso per caso. Successivamente vi è la generazione dei supporti se la tecnologia lo richiede. I supporti possono essere sia dello stesso materiale del componente che si sta costruendo, sia di materiale diverso. Le principali funzioni dei supporti vengono elencate di seguito:

- fissare il modello in costruzione all'area di lavoro, permettendone comunque la successiva rimozione in modo pratico;
- proteggere le pareti laterali da azioni che ne possono compromettere la costruzione; [3]
- supportare le parti sporgenti rispetto alla normale della piattaforma di lavoro e permettere così la crescita di parti sporgenti e sottosquadri, riducendo al minimo la possibilità di avere distorsioni;
- migliorare lo scambio termico, ovvero creare una via di fuga per il calore e risultano quindi indispensabili per evitare deformazioni e altri tipi di problemi;
- gestire le sollecitazioni termiche, per evitare la deformazione.
- evitare che la pozza di fusione sprofondi sotto il suo peso;
- Resistere alla azione meccanica del meccanismo di stesura della polvere sulla parte, quando questa è presente.

La fase successiva consiste nello slicing attraverso software dedicati. Durante questo processo si ha la generazione di piani paralleli tra di loro (la cui normale è parallela all'asse z che coincide con la direzione di crescita del pezzo) e distanziati di una quantità detta Δs . Le sezioni generate in questo modo sono effettivamente quelle utilizzate dalla macchina per la costruzione del componente. Risulta di notevole importanza l'orientamento di quest'ultimo così da ridurre il numero di sezioni da creare e di conseguenza il tempo di costruzione. La distanza tra i piani (Δs) è un parametro di processo molto importante che varia a seconda del materiale che verrà utilizzato; infatti, per i polimeri è maggiore rispetto a quella necessario per i metalli. Dalla figura seguente, si intuisce immediatamente come orientamento e slicing sono due concetti strettamente legati tra loro in quanto insieme influenzano la qualità del componente da produrre:

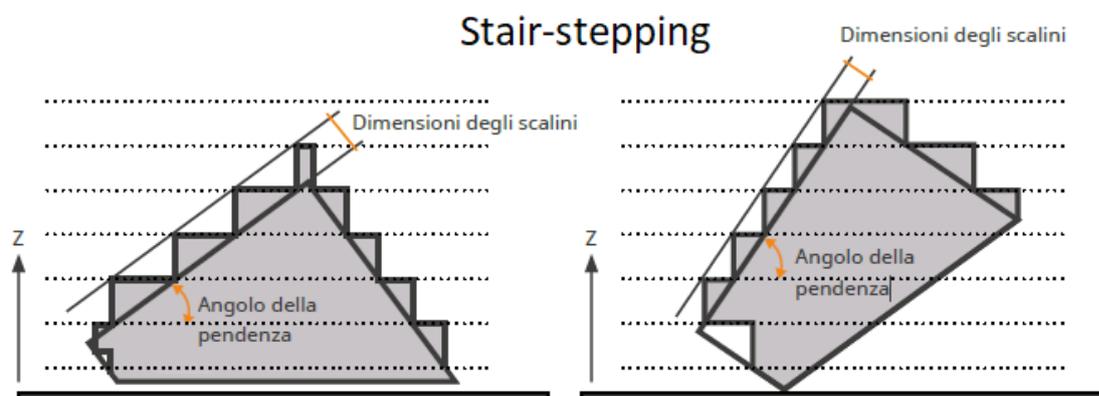


Figura 1.3 [4]

Compiuti questi passaggi, il pezzo è pronto per essere prodotto, viene caricato in macchina e si ha la costruzione fisica del componente strato per strato. Una volta terminata la stampa, si ha l'estrazione del build. Il tutto si conclude con le operazioni di *post-processing*: pulizia del componente dalla polvere in eccesso, rimozione meccanica dei supporti (se esistono), trattamenti termici, finiture superficiali e lavaggio per rimozione totale delle impurità.

1.1.3 L'Additive Manufacturing Oggi

Ad oggi ci sono tantissimi confusi messaggi e affermazioni contraddittorie riguardo a cosa sia effettivamente l'additive manufacturing.

Per spiegare meglio questa tecnologia è opportuno in questa sede demistificare e distinguere alcuni concetti che spesso vengono confusi: la differenza tra "stampa 3D" e "fabbricazione additiva" e cosa si intenda precisamente con l'espressione "rapid prototyping" che è ancora ad oggi una delle applicazioni più diffuse dell'AM.

La Fabbricazione additiva è il termine che individua l'intero processo e ne indica lo standard industriale per le tecnologie di stampa 3D. La stampa in 3D è una delle operazioni di fabbricazione additiva usata per creare un oggetto aggiungendo materiale strato per strato. Il termine "Stampa 3D" è tipicamente utilizzato in un contesto non tecnico come sinonimo di produzione additiva.

Fino ad oggi questo termine è stato in particolare associato a macchine di fascia bassa in termini di prezzo e/o capacità complessiva. Questo termine viene usato in maniera superficiale, poiché semplifica eccessivamente quello che è il vero processo di manifattura additiva. Tuttavia, questi sono i più comuni termini usati e da molti e ritenuti entrambi validi per l'individuazione di questa tecnologia.

L'Additive Manufacturing è una tecnologia innovativa che permette di realizzare, in tempi relativamente ridotti e senza l'uso di ulteriori utensili, prototipi e componenti in materiale definitivo con geometria più o meno complessa [3], permettendo di eliminare molti dei **manufacturing constraints** associati alle tecnologie tradizionali.

Questa tecnica permette di integrare più funzioni e ridurre notevolmente i limiti tecnologici insiti nei processi tradizionali.

Tramite il suo utilizzo è stato possibile cambiare il paradigma della progettazione. Infatti, questa si sposa con quella che è conosciuta da anni come ottimizzazione topologica. In questo modo, grazie all'uso di software e con l'utilizzo di algoritmi già noti, in questi ultimi anni è stato possibile sfruttarne le potenzialità.



Allo stesso modo, come fatto in precedenza è necessario chiarire brevemente altri due concetti di cui si sente tanto parlare ultimamente: **l'ottimizzazione topologica (OT)** e il **generative design**, che verranno anche ripresi nei capitoli successivi.

L'ottimizzazione topologica ha iniziato a diffondersi nel secolo scorso, dagli anni 90, e viene impiegata già dalle tecnologie tradizionali per minimizzare i pesi.

Questa è una delle tante ottimizzazioni esistenti, che avvalendosi di algoritmi che sono espressione di un modello matematico, fissati i carichi va ad ottimizzare il materiale, "rimuovendolo" in modo da minimizzare la massa. Il concetto è in realtà un processo abbastanza semplice: mettere un carico, guardare dove sono le sollecitazioni, dove non ci sono sollecitazioni, ridurre la rigidità e la densità e continuare finché non si ottiene la distribuzione ottimale di materiale per cui la parte funzionerà.

Dall'altra parte, per generative design si intende qualcosa di più complesso che non si limita solo all'applicazione di un algoritmo, ma piuttosto all'uso di questo e di altri mezzi di cui disponiamo, come la capacità di calcolo, attraverso un approccio iterativo.

La progettazione generativa è quindi un modo per ottenere la migliore soluzione a partire da un insieme di requisiti. Questa è capace di offrire molte più soluzioni imponendo una serie di indicazioni, obiettivi e vincoli man mano aggiornabili. Il design generativo si applica quando non si conosce la forma che si vuole ottenere (ovvero si ha molta libertà, si sta progettando da zero un componente). In questo caso il software fornisce molte opzioni, prendendo in considerazione aspetti come il materiale desiderato e il metodo di produzione.

Un tale approccio significa effettivamente generare una forma che soddisfi i requisiti e che includa i carichi, i costi, la produzione e, considerando tutti questi aspetti, al fine di condurre una simulazione iterativa per identificare quale sia il design ottimale.

Un'altra considerazione è che l'OT, a differenza del design generativo, non tiene conto della metodologia di costruzione. Quindi, in molti casi, un modello topologicamente ottimizzato deve essere ulteriormente elaborato se si vuole utilizzare un metodo di produzione diverso da quello additivo. Mentre il design generativo ha la possibilità di tenere conto dei limiti di qualunque processo venga scelto. Anche se il design è pensato per essere stampato in 3D, ci sono sempre dei margini di miglioramento che permettono di ottenere un design per la produzione additiva ottimale (come la riduzione dei supporti ecc.).

Di seguito è riportata una tabella in cui si mettono in luce le principali differenze che sono state spiegate.



Ottimizzazione Topologica	Generative Design
Utilizza un design esistente per ottimizzarlo minimizzando la massa.	Genera tante ottimizzazioni seguendo più obiettivi, facendo crescere la parte secondo i requisiti.
Fornisce un solo output (best solution).	Fornisce più output, più soluzioni.
Hai già un design e forma di partenza.	Non è necessario avere un design e delle forme di partenza.
Può essere utilizzato solo nelle fasi successive della progettazione in cui un progetto è già definito.	Viene utilizzato nelle fasi iniziali dei progetti e fornisce un prezioso feedback agli ingegneri per le possibilità iniziali di progettazione.

In conclusione, a prescindere che si parli di Generative design o ottimizzazione topologica, è possibile attuare una messa a punto delle proprietà meccaniche del componente oltre che realizzare strutture molto più complesse capaci di soddisfare i requisiti minimi progettuali, permettendo allo stesso tempo una riduzione della massa. I benefici che ne derivano sono notevoli e applicabili ai più svariati settori dell'industria.

L'utilizzo delle tecniche di fabbricazione additiva ha sicuramente apportato dei miglioramenti dal punto di vista della "libertà di progettazione", rendendo possibile la realizzazione di strutture totalmente innovative come quelle che andremo a descrivere nel dettaglio e che sono proprio oggetto di questo lavoro.

Queste potenzialità hanno alzato l'interesse in moltissimi settori dell'industria e tantissime realtà del mondo industriale, in questo momento, sono attratte da queste nuove tecnologie. Infatti, le previsioni riguardo a questo mercato risultano molto ottimistiche per il futuro. Sicuramente questa tecnologia segnerà i prossimi anni della produzione industriale. Tuttavia, non è possibile parlare di rivoluzione quando questa si può in realtà definire come la naturale evoluzione della stampa 2D.

In figura 1.4 è proposta una tabella in cui viene mostrato quello che si stima possa essere il futuro di questa tecnologia nei vari settori. Le tendenze da quello che si può osservare sono sicuramente l'aumento dei volumi di produzione dei pezzi e della capacità produttiva.

Invece, nel grafico riportato in figura 1.5, sono illustrate le stime di mercato di diverse società importanti, dalle quali si evince un ottimistico e interessante sviluppo per il futuro di questa tecnologia.

Infatti, gli analisti prevedono che l'intero mercato possa crescere, seppure con tassi di crescita minori rispetto alle proiezioni degli anni passati (prima del 2019), fino a raggiungere quota \$ 37,2 miliardi nel 2026.

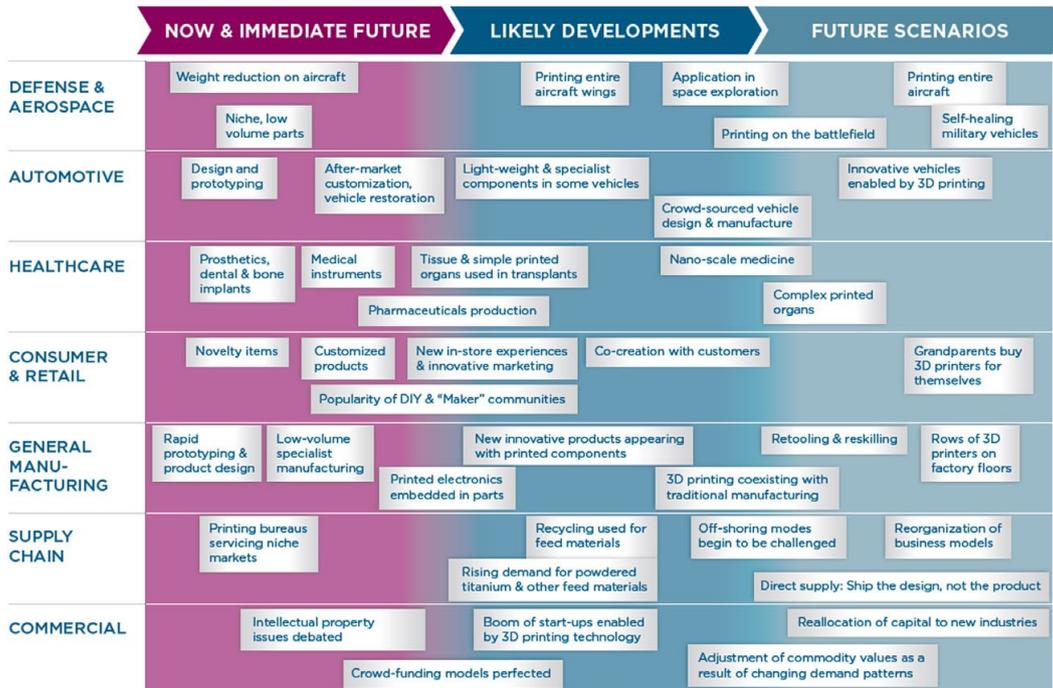


Figura 1.4 Scenari additive [5]

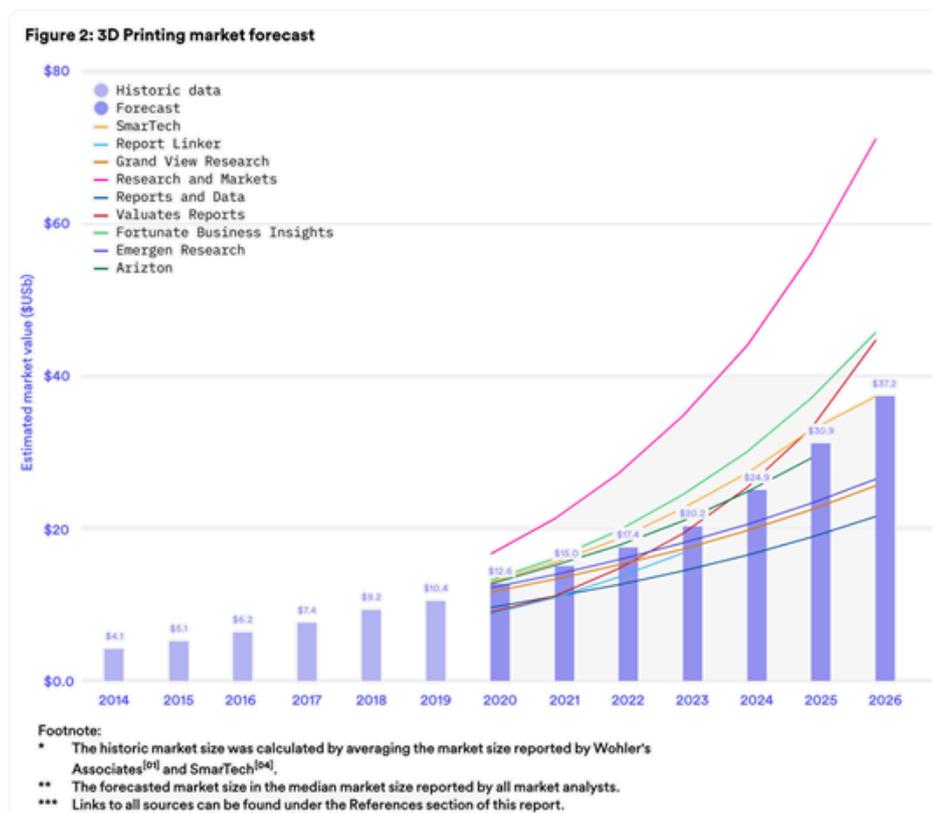


Figura 1.5 [6]



Ad oggi la Fabbricazione additiva consente di produrre una grande varietà di materiali (polimerici, metallici, ceramici e compositi) mediante diverse tecniche additive come è mostrato nella figura 1.6.

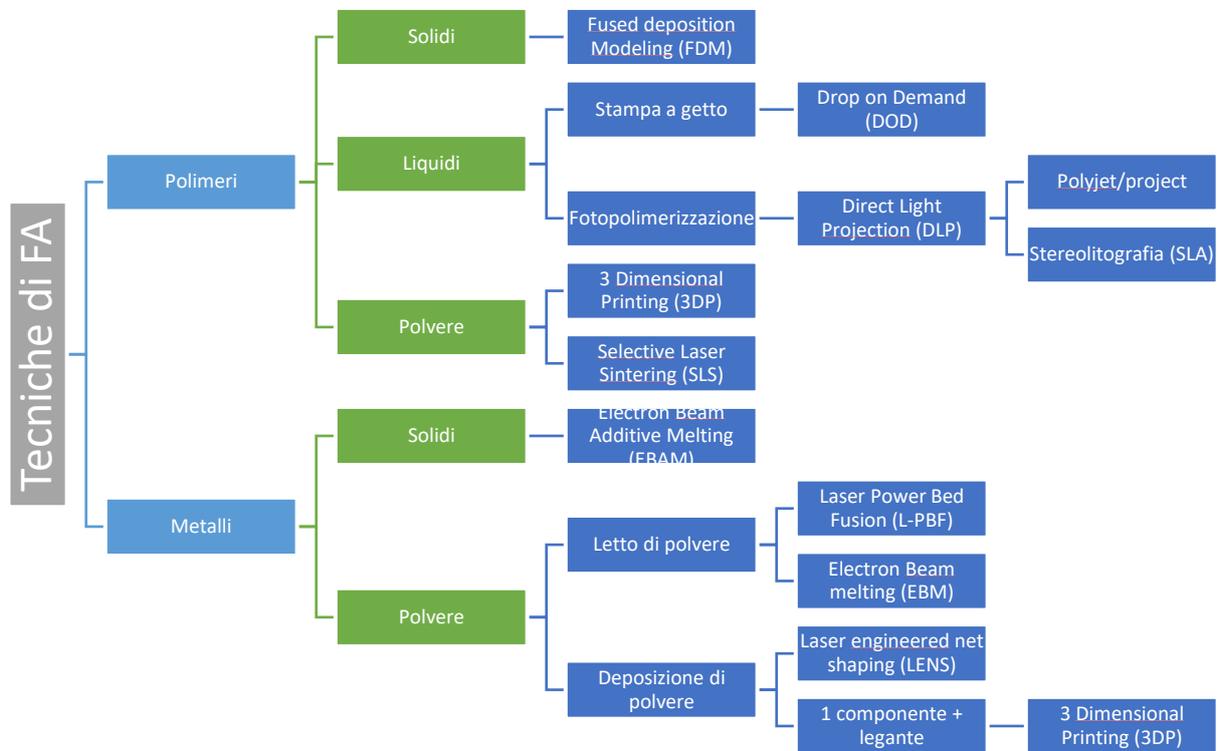


Figura 1.6 – Tecniche di fabbricazione additiva.

Ciascuna delle tecnologie mostrate nello schema in alto presenta caratteristiche differenti per quanto riguarda i materiali utilizzati, il tipo di solidificazione della parte, se questa necessità o meno di supporti, trattamenti di post processo ecc.

Tuttavia, ai fini applicativi del progetto presentato nei capitoli successivi verrà descritta più in dettaglio solo una di queste tecnologie: Metal *Laser Beam Powder Bed Fusion* (LB-PBF) che è quella utilizzata per la stampa del pezzo oggetto di questo lavoro e alla quale, da qui in avanti, faremo riferimento. Nei capitoli successivi si fornirà anche una breve descrizione indicativa della macchina e le sue principali caratteristiche tecniche.

Per quanto riguarda la fabbricazione additive dei metalli il costo della produzione è molto cambiato nell'industria negli ultimi 15 anni. Uno dei principali sviluppi sono stati i sistemi più grandi in grado di produrre parti con dimensioni quasi 4 volte superiori rispetto ad alcuni dei primi sistemi di produzione additiva disponibili sul mercato. Per svolgere questo compito, i produttori di sistemi AM hanno dovuto apportare alcune modifiche significative. Di conseguenza, questi progressi nella tecnologia di fabbricazione additiva hanno avuto un impatto significativo sul costo e sulla

scalabilità della produzione additiva. Una combinazione di miglioramenti tecnologici ha portato a un aumento di quasi 5 volte la produttività delle macchine. Il risultato finale è un abbattimento dei costi del 50% rispetto ai primi periodi della produzione additiva in metallo.

Infatti, questa tecnologia in pochi anni dalla sua nascita ed ingresso nel mercato (riferimento anni 2000) è passata da costosa e di nicchia a scalabile e competitiva in termini di costi.

Infatti, i progressi tecnologici hanno trasformato la produzione additiva in metallo da un costoso metodo di produzione di piccole tirature ad un metodo di produzione in grado di produrre 1.000-10.000 parti (fig.1.7) su un singolo sistema a costi molto inferiori rispetto a quelli tipicamente associati alla produzione additiva in metallo. Per questo, ad oggi, l'AM risulta molto più competitiva di prima in diversi settori considerati "tradizionali" e "convenzionali" come automotive e aerospace.

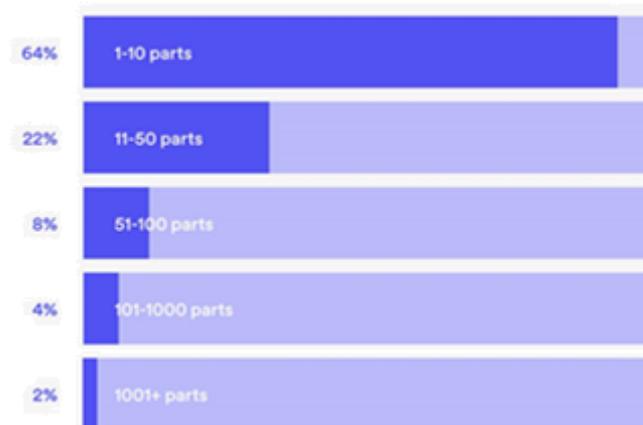


Figura 1.7 Volumi di produzione ad oggi [6]

1.1.4 Vantaggi e Svantaggi dell'Additive Manufacturing

Per capire in che modo e in quali settori dell'industria questa tecnologia si è diffusa maggiormente, bisogna indagare sicuramente i vantaggi e svantaggi che si porta dietro dal punto di vista del prodotto che del processo.

I vantaggi sono certamente ricondotti alle notevoli riduzioni di tempi e quindi di costi dei prodotti finiti ad alto valore aggiunto e per tale motivo risulta più competitiva rispetto ai processi convenzionali.

Di seguito vengono riportati i vantaggi di prodotto e di processo che sono anche i così detti "Drivers" della tecnologia additiva. Dopodiché saranno presentati gli svantaggi

che al momento questa tecnologia ancora presenta. Questi sono da considerarsi di carattere generico e possono interessare ogni caso in maniera diversa.

- Vantaggi di prodotto:

- Libertà di progettazione: eliminazione dei molti vincoli di fabbricazione (Manufacturing Constraints) imposti dalle tecnologie tradizionali, che permettono una progettazione molto più libera, con la possibilità ad esempio di generare strutture complesse come canali interni integrati nel profilo ecc.
- Strutture leggere: possibilità di ottenere il minor peso del componente, grazie alla sinergia con i processi di ottimizzazione tra cui quello topologico, in modo da “mettere il materiale solo dove serve”;
- Integrazione di più funzioni: possibilità di unire più parti, con più funzionalità e col minor numero di componenti, senza la necessità di assemblaggi e operazioni successive. Questo permette di ridurre al tempo stesso i tempi e i costi di produzione dovuti ad operazioni secondarie di tipo meccanico e non solo.
- Personalizzazione: Le tecnologie additive permettono di ottenere delle parti direttamente dai file CAD in modo facile e veloce in modo da ottenere livelli elevati di personalizzazione del prodotto;
- Messa a punto delle proprietà meccaniche: ottimizzazione del prodotto in base alle effettive condizioni di utilizzo futuro.
- Porosità controllata: i parametri di processo di queste tecnologie, ci permettono di modulare in maniera pragmatica moltissime delle proprietà dei materiali, tra cui la porosità che detiene un ruolo molto importante in varie applicazioni, tra cui quelle mediche.

- Vantaggi di processo:

- Assenza di utensili: L’additive manufacturing non richiede l’uso utensili, non è quindi influenzata dai costi associati alla loro gestione e sostituzione. Questo permette l’eliminazione del problema della scelta dei parametri di taglio e di processo. Ciò si traduce in un abbattimento di costi e tempi; Infatti, per la produzione industriale, una delle fasi più costose, dispendiose in termini di tempo e manodopera del processo di sviluppo del prodotto, è la produzione degli utensili. Questa è un’applicazione estremamente allettante, di cui un numero crescente di produttori si sta avvantaggiando.



- Una sola macchina, forme illimitate: una delle caratteristiche principali di tutte le tecnologie additive è la possibilità di realizzare componenti di qualsiasi geometria in una qualsiasi macchina. Infatti, nei cicli di lavoro delle tecnologie tradizionali, anche nelle più moderne stazioni CNC, si è limitati da un numero elevatissimo di utensili diversi di cui si ha bisogno e di operazioni successive e in serie a cui ogni componente deve essere sottoposto, anche in questo caso si ottiene una riduzione di costi e tempi.
- Assenza di attrezzature: non sono richiesti sistemi di afferraggio, machere/dime e dispositivi di bloccaggio durante la stampa dei componenti;
- Sottosquadri ammessi: non ci sono limiti nelle forme, opportuni supporti vengono generati per il sostegno del pezzo. (entro i limiti della tecnica utilizzata o imposti dall'esterno);
- L'intero processo produttivo si basa su un solo step produttivo;
- Ridotti interventi da parte di operatori: la necessità di un operatore qualificato durante le fasi di carico e scarico della macchina e successivamente rimozione dei supporti. Tuttavia, rimane da sottolineare che la next gen. delle macchine additive viaggiano verso versioni con alti livelli di automazione, veri e propri centri di lavoro, questo ha una doppia efficacia in termini di costi e tempi, permettendo di spostare la capacità massima di produzione verso nuovi obiettivi;
- Tempi ridotti (lead time): è possibile mandare in produzione un pezzo con una stampante 3D subito dopo aver generato il file della parte. Non appena la parte è stata stampata, si può iniziare a testarne le proprietà invece di aspettare settimane o mesi per l'arrivo di un prototipo o di una parte.
- I tempi e costi di produzione dipendono solo dalla dimensione del componente e non dalla complessità; [3]
- Bassi costi di magazzino: poiché le stampanti 3D possono permettere di produrre come e quando necessario, non è richiesta alcuna spesa per lo stoccaggio delle merci.
- Riduzione degli sprechi che si hanno durante la produzione e minore consumo energetico. Tuttavia, Esistono diversi modi in cui l'AM può avere un impatto sull'ambiente, ma la maggior parte delle ricerche si è concentrata principalmente sul consumo di energia e sui rischi ambientali. I principali pericoli ambientali dovuti all'AM sono correlati alla rimozione dei supporti e all'uso di solventi e allo smaltimento di materiali di scarto.

Sicuramente uno dei principali vantaggi di processo delle tecnologie additive è quello di avere tempi e costi dipendenti solamente dalla dimensione del pezzo e non dalla complessità. Al contrario infatti i costi nelle tecnologie tradizionali sono fortemente dipendenti dalla complessità del pezzo così come si vede nel grafico seguente.

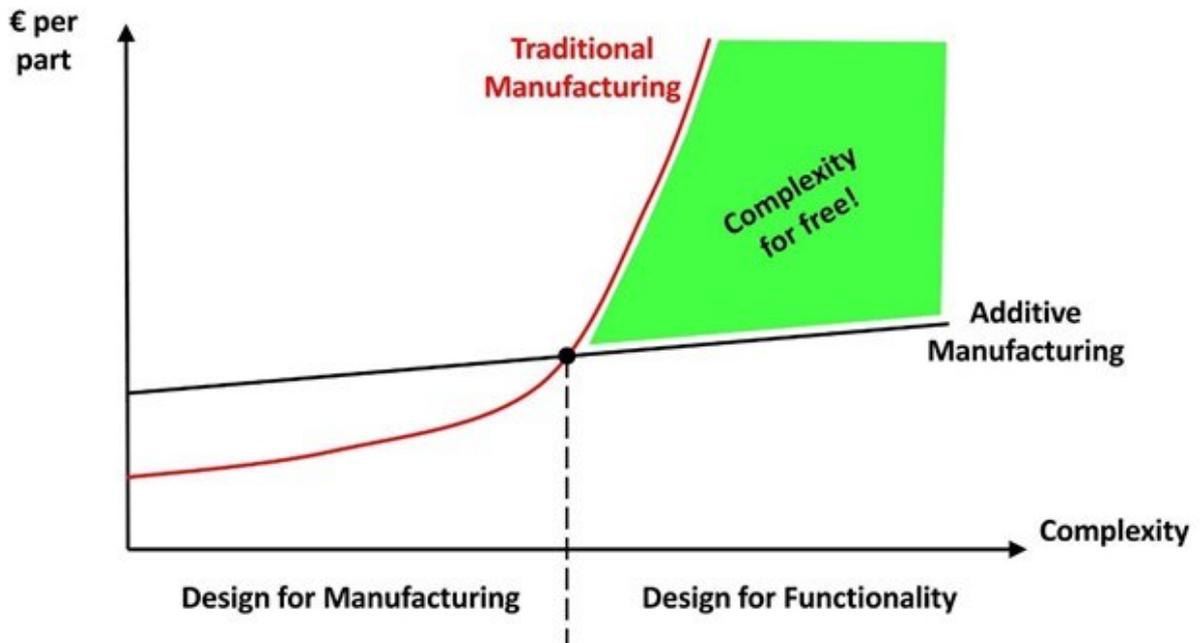


Figura 1.8 Costi in funzione della complessità geometrica [3]

Il grafico mette in luce quanto detto precedentemente e propone un confronto tra le tecnologie tradizionali e l'AM. Come è possibile osservare, l'andamento della curva è pressoché piatto. Tuttavia, è possibile osservare un lieve aumento con la complessità geometrica. Questo è dovuto principalmente ai costi legati alla progettazione, produzione e lavorazioni successive come la rimozione dei supporti, una delle voci che a seconda del caso è tra le più costose, come potremmo apprezzare in seguito in questo lavoro.

Dall'altra parte si può visualizzare chiaramente l'andamento della curva dei costi associati alle tecnologie tradizionali che cresce in maniera esponenziale con la complessità del componente da produrre. Questo andamento dei costi è dovuto principalmente ai costi macchina, di gestione degli utensili, dell'operatore e della programmazione CAM che sono necessarie per la realizzazione di pezzi sempre più complessi.

In questo modo è possibile facilmente individuare i campi applicativi delle due tecnologie (Figura 1.7). Nel grafico in figura 1.8 si può individuare un punto di pareggio per cui, a causa delle complessità geometriche, le tecnologie tradizionali non sono più

convenienti ed è necessario passare a quelle additive. Questa trova quindi naturale applicazione in tutti quei settori in cui la complessità è fortemente presente come quello medicale, aerospazio e tanti altri tra cui quello ancora poco conosciuto e apprezzato dell'oil and gas.

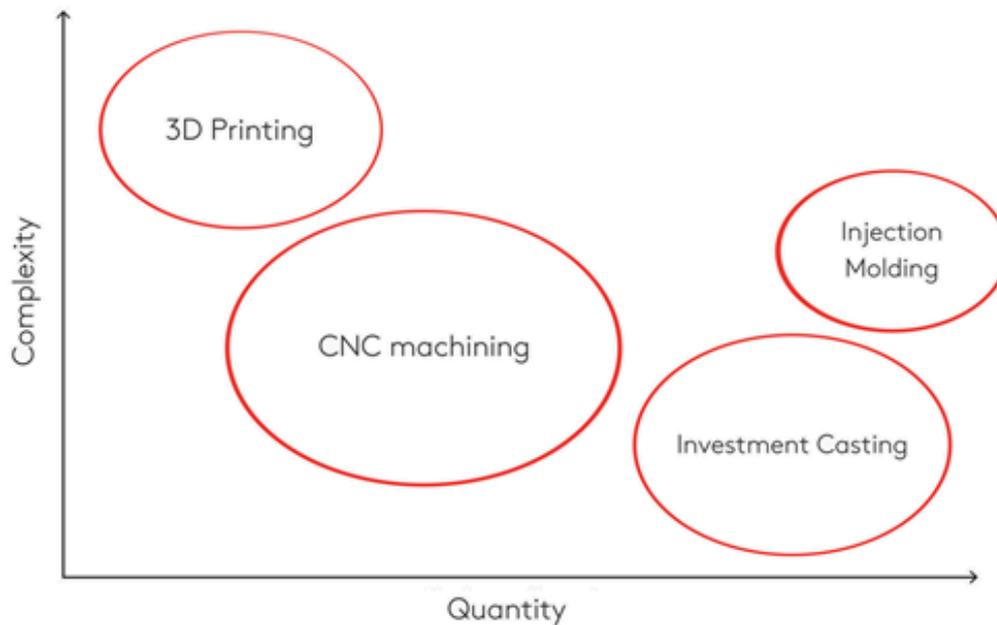


Figura 1.9 le tecnologie in base alla Complessità vs Quantità [7]

Tuttavia, ancora oggi le tecnologie additive non sono in grado di coprire tutta l'aria del grafico ed infatti le tecnologie tradizionali risultano enormemente più convenienti per livelli di complessità bassi. Quello che invece sta avvenendo in questi ultimi anni è solo l'abbassarsi dei costi iniziali e di processo per rendere sempre più competitiva la tecnologia additiva, che risulta comunque frenata dalla limitata quantità di pezzi capace di produrre. In conclusione, si può per certo affermare che la tecnologia additiva sicuramente ad oggi non è pronta e neanche vicina dal sostituire quella sottrattiva.



Figura 1.10 Confronto tecnologie 2.5 assi a sinistra, 3 assi e additive, EMO Milano 2021.

- Svantaggi legati al processo:
 - Volumi di lavoro limitati: Ancora oggi il volume di lavoro è ancora fortemente limitato soprattutto in alcune tecniche, quelle a camera chiusa, in cui i limiti tecnologici non permettono di superare $1 m^3$. Questo principalmente è dovuto alla difficoltà dei sistemi di movimentazione del piano del lavoro.
 - Dimensioni dei pezzi limitate dalle dimensioni della macchina: soprattutto per le tecnologie ad atmosfera inerte o sottovuoto le dimensioni della macchina sono limitate così come i componenti prodotti.
 - Velocità di costruzione limitate: questi dipendono dal volume, dal materiale, dal tipo di tecnologia e dai molti parametri modulabili che presenta la macchina e che sono accessibili agli operatori, da cui può dipendere la buona riuscita del pezzo.
 - Ogni macchina può lavorare con un numero limitato di materiali: uno dei limiti più stringenti di questa tecnologia è legata alla gestione del materiale, soprattutto per alcune tecniche, quali quelle che utilizzano polvere. Infatti, per evitare cross contamination delle polveri è indispensabile pulire al meglio tutta la macchina prima di cambiare materiale. Questo ne riduce la versatilità poiché sarebbe necessario avere tanti numeri di macchine quanti i materiali disponibili.
 - Controlli in linea limitati: ad oggi i controlli qualità in tempo reale sono ancora poco sviluppati e questi si limitano ad analizzare il processo, non

sono ancora presenti altri tipi di controlli o di correzioni automatizzate del processo.

- Svantaggi legati al prodotto:
 - Costo dei materiali: principalmente dovuti ai costi per la produzione della polvere. Infatti, i processi di produzione della polvere sono costosi così come i controlli e la validazione. Questo contribuisce al costo elevatissimo delle polveri e quindi del materiale. Ancora oggi procurarsi le polveri è un problema e i costi rimangono ancora alti e poco competitivi rispetto alle altre tecnologie;
 - Finitura superficiale: nessuna delle tecnologie additive permette di ottenere elevate finiture superficiali, queste sono variabili a seconda dei parametri di processo, orientazione della parte, dimensione della stessa ecc. Infatti, talvolta, per rispettare tolleranze dimensionali e geometriche delle parti prodotte in AM è necessario passarle alle macchine utensili.
 - Ripetibilità dei componenti: aspetto essenziale nelle grandi industrie dove è necessario garantire elevati livelli di ripetibilità, le tecniche di fabbricazione additiva sono caratterizzate invece da una bassa ripetibilità dei componenti da macchina a macchina e talvolta da job a job.
 - Numero limitato di materiali commerciali: le ragioni sono diverse alcune legate alla tecnologia. Infatti, produrre la materia prima che serve per le tecnologie additive è al momento costoso e necessita di personale qualificato. I requisiti da rispettare sono tanti, questo riduce il numero di fornitori idonei e quindi il numero di materiali ad oggi processabili.
 - Necessità di strutture di supporto: seppur non tutte le tecniche di fabbricazione additiva prevedono la creazione di supporti; In alcune è indispensabile per sostenere la generazione della parte strato per strato quando questa non è autoportante secondo le linee guida della tecnologia usata. Queste strutture, quindi, devono essere opportunamente progettate per consentire una più facile rimozione e il migliore sostegno della parte con la minore quantità di materiale possibile. La stessa rimozione dei supporti dalla parte è un'operazione delicata che può incidere sulla buona riuscita del componente. Infatti, questi dovranno essere rimossi senza danneggiarlo in alcun modo.



- Anisotropia dei componenti: le microstrutture delle parti sono molto differenti nella crescita nelle tre dimensioni. Questo è legato alla tecnologia che prevede la crescita del pezzo lungo l'asse z.

1.1.5 Applicazioni e settori interessati

A seguito di quanto detto fino ad ora, è possibile individuare i settori con cui l'AM trova migliori applicazioni. Questi sono sicuramente quelli in cui sono necessarie parti di elevata complessità geometrica che non possono essere prodotte mediante lavorazioni convenzionali (stampaggio, microfusione, CNC, fusione, ecc.), il cui il costo non è il principale driver e il numero di parti richiesto è limitato. Per esempio, in quelle applicazioni in cui i costi degli utensili o degli stampi per la fusione o lo stampaggio a iniezione etc.... sarebbero troppo elevati.

Per questi motivi nel corso degli ultimi anni, le aziende in molti settori dell'industria si sono avvicinate e approcciate sempre di più a questo tipo di tecnologia cercando di sfruttare le potenzialità a vantaggio del proprio business.

Infatti, la tecnologia additiva sta cambiando il modo in cui i prodotti vengono realizzati in diversi settori industriali. Secondo Wohlers Report 2019 [8] i principali settori di applicazione delle tecnologie additive sono riportati nel grafico seguente con le rispettive percentuali:

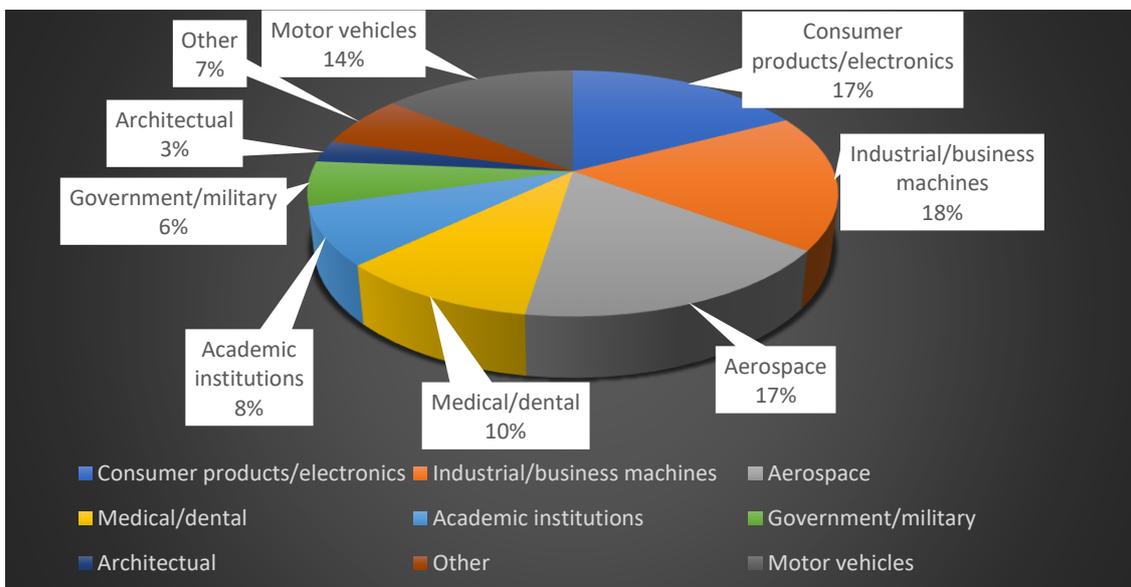


Figura 1.11 settori di applicazione delle tecnologie additive, Wohlers [3]

Nel diagramma successivo in figura 1.10 sono indicate le principali applicazioni della fabbricazione additiva. È di rilievo notare come ad oggi al primo posto tra le

applicazioni troviamo al 28.4% le parti finali e a seguire la prototipazione funzionale. Dal grafico è possibile osservare come l'uso della tecnologia per ottenere parti finali abbia quasi virtualmente superato quello della prototipazione, segnando così un'inversione di rotta rispetto al passato. Infatti, ad oggi molte parti sono prodotte direttamente in queste macchine, non solo in forma di prototipi ma di parti finali.

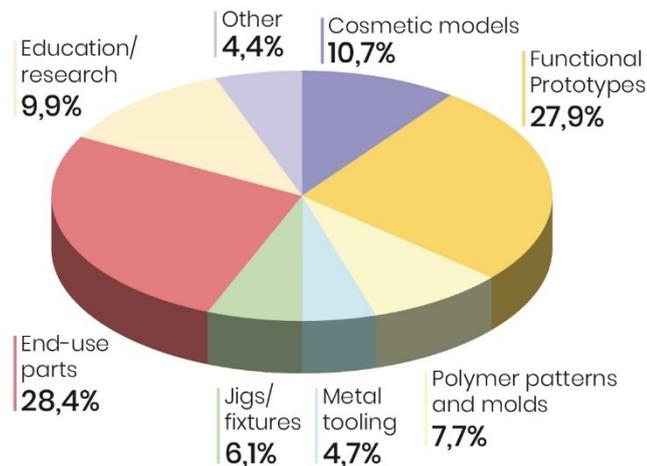


Figura 1.12 settori di applicazione delle tecnologie additive [8].

A tal proposito, è opportuno specificare cosa si intenda per rapid prototyping e il perché la stampa 3D inizialmente fu conosciuta con questo nome. Il termine rapid prototyping (RP) è usato in una varietà di settori per descrivere un processo per ottenere rapidamente una parte prima del rilascio finale o della commercializzazione. Infatti, in un contesto di sviluppo del prodotto, il termine prototipazione rapida è stato ampiamente utilizzato per descrivere le tecnologie che hanno creato delle parti fisiche direttamente dai dati del modello digitale.

Si usa tale termine per descrivere un processo di sviluppo di prodotti che consente ai clienti e ad altre parti interessate di testare e fornire feedback durante il processo di sviluppo del prodotto. Ad oggi come mostrato, grazie agli sviluppi tecnologici di questi ultimi anni le macchine per la fabbricazione additiva hanno fornito la possibilità di ottenere pezzi molto più vicini a quelli finali che al prototipo.

Un comitato tecnico di recente costituzione all'interno di ASTM International ha concordato l'adozione di una nuova terminologia. Oggi, gli standard di ASTM adottati di recente usano il termine produzione additiva (Additive Manufacturing) [1]. Denominato in breve AM.

Come è stato illustrato sopra, i campi di applicazione per la produzione additiva sono molteplici: in questa sede ci concentriamo sull'uso industriale della produzione

additiva in metallo (Metal AM) e in particolare i settori maggiormente attivi in questo contesto:

- Aerospazio;
- Automotive;
- Biomedico.

Aerospaziale

Le aziende aerospaziali e della difesa sono stati tra i primi a adottare le tecnologie AM per la prima volta. Società come Airbus, GE, Alcoa e altri hanno già avviato la produzione in serie o stanno investendo in grandi impianti di produzione per AM. Tale tecnologia permette infatti di ottenere componenti con caratteristiche di grosso rilievo per questo settore come la riduzione di peso e geometrie complesse. In particolare, a titolo di esempio citiamo un'applicazione in palette di turbina con canali conformi di raffreddamento (blade cooling), figura 1.13:



Figura 1.13 esempio paletta di turbina completamente prodotta in AM a sinistra Siemens a destra EOS [9] [10].

I vantaggi che offre l'AM per il settore Aerospaziale possono essere brevemente riassunti di seguito:

- Produzione a basso volume: AM ideale per piccoli lotti a costi contenuti;
- Riduzione di peso: fondamentale in questo settore, poiché ridurre il peso significa ridurre le emissioni di CO₂, il consumo e il carico. In questo viene in contro l'AM: la tecnologia è infatti una soluzione ideale per creare parti leggere, con un notevole risparmio di carburante;
- Integrazione di più funzioni e riduzione componenti;
- Manutenzione e riparazione.

Automobilistico

Allo stesso modo l'industria automobilistica utilizza da anni la stampa 3D per la prototipazione rapida incentrata sulla produzione di singole parti di prova o modelli di visualizzazione. In questi ultimi anni i principali produttori automobilistici stanno sperimentando l'utilizzo della tecnologia AM che presto vedremo sul mercato. I primi campi di applicazione possono essere piccole serie o produzioni personalizzate. Infatti, come è noto le tecnologie additive non riescono ad oggi a soddisfare la richiesta di grandi volumi di produzione caratteristica di questo settore.

Infatti, l'industria automobilistica è un utente in crescita nel ricorrere alla fabbricazione additiva, tanto che secondo un rapporto di SmarTech [11] questo settore sembra destinato ad aumentare, si prevede che i ricavi relativi all'AM nella produzione di componenti automobilistici raggiungeranno i 5,8 miliardi di dollari entro il 2025.

In aree come gli sport motoristici e le corse ad alte prestazioni, gli strumenti di progettazione quali il design generativo e l'ottimizzazione della topologia stanno lentamente cambiando gli approcci tradizionali alla progettazione delle parti.

Esempio in figura un pistone ottimizzato e stampato:





Figura 1.14 stampa di pistoni 3D [12]

I vantaggi che offre l'AM per il settore automobilistico possono essere brevemente riassunti di seguito:

- Sviluppo del prodotto più rapido;
- Maggiore flessibilità di progettazione;
- Personalizzazione;
- Geometrie complesse;

Medico

Altro settore di notevole interesse per le possibilità offerte da questa tecnologia è quello biomedicale. Va infatti sottolineata l'importanza della personalizzazione e della libertà di progettazione del prodotto. Si può infatti realizzare una protesi su misura per lo specifico paziente, nel campo odontoiatrico, ortopedico ecc., grazie alla possibilità di realizzare strutture porose, è possibile replicare anche le strutture ossee.

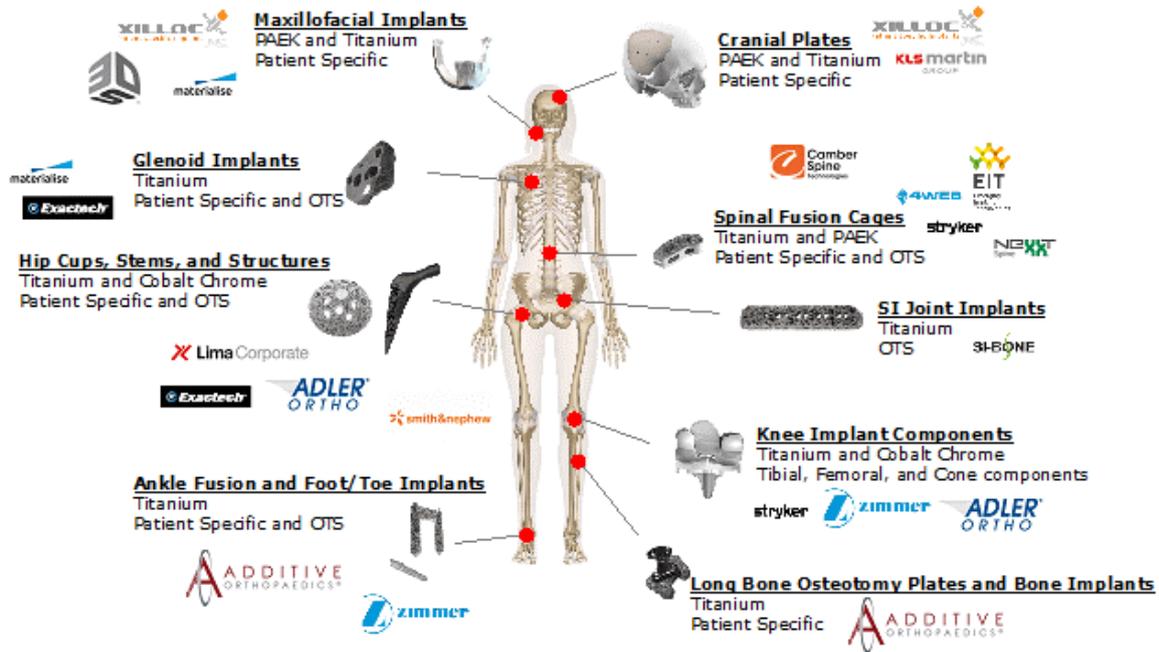


Figura 1.15 Panoramica delle applicazioni dell'AM in campo medico.

Oltre ai settori sopra citati, che occupano la più grossa fetta dell'intero mercato (figura 1.11), vi sono anche altri settori che seppure in misura minore ricorrono all'AM:

Beni Generici di consumo

Questo settore dell'industria deve essere quello più attento e vicino alle esigenze del consumatore in un mondo sempre in continua evoluzione, la produzione additiva soddisfa queste esigenze. I principali vantaggi che la fabbricazione additiva può offrire in questo settore sono:

- Time to market più veloci: ad oggi è di fondamentale importanza abbassare il time to market per imporsi sul mercato prima dei concorrenti;
- Massima customizzazione: la fabbricazione additiva permette di spingere al massimo la personalizzazione di ogni singola parte, in base alle richieste del cliente in tempi rapidi.

Architettura

Un altro settore in cui la fabbricazione additiva ultimamente sta trovando impiego è sicuramente quello della architettura. Ad esempio, Zaha Hadid da anni porta avanti progetti in cui sfrutta le potenzialità di queste tecnologie. Un esempio in figura 1.16.



Figura 1.16 Thallus Installation – Zaha Hadid Architects Thallus Installation [13]

Oltre ai settori già citati questa tecnologia sta guadagnando l'attenzione anche nell'industria **oil e gas**, così come in quell'idraulica. Un rapporto Smartech prevede che questo settore possa raggiungere grosse cifre e guadagnarsi una buona fetta di mercato, raggiungendo 1.5 miliardi di dollari entro il 2025.

Questo settore, infatti, sarebbe particolarmente interessato all'uso dell'additive essendo caratterizzato da bassi volumi di componenti che possono essere particolarmente costosi da produrre, immagazzinare e sostituire. In questo settore anche la disponibilità delle parti è fondamentale così come l'obsolescenza delle stesse.

Di una certa importanza rimane anche l'aspetto delle riparazioni che devono essere rapide e i cui pezzi facilmente reperibili. In questo caso l'additive viene incontro a tali esigenze. Infatti, l'eccesso di scorte in magazzino ha un costo da sopportare e allo stesso modo l'insufficienza di queste può portare a tempi di inattività generando altri costi. La fabbricazione additiva può sopperire e rispondere a questa sfida, limitando i tempi di fermo riducendo i tempi di consegna e migliorando la catena di approvvigionamento.

Inoltre, può rispondere anche alle esigenze che derivano dai prodotti fuori produzione, come nel caso in cui un produttore che fallisce non è più capace di fornire una parte.

In questo caso il ricorso all'Additive consentirebbe di stampare la parte ed eventualmente ottimizzarne le performance rispetto a quella originale.

Per spingere al meglio la diffusione di tale tecnologia e sfruttare a pieno le sue capacità in questo settore, è necessaria una fase iniziale di identificazione di quali parti e componenti beneficiano realmente dei notevoli vantaggi della produzione additiva.



2 Tecniche di fabbricazione additiva

Tra le tecnologie presenti, la LB-PBF è quella attualmente che prevale nel mercato della produzione additiva [14], grazie alle sue potenzialità nella stampa di materiali metallici con dei costi vantaggiosi rispetto alle macchine della stessa categoria (PBF) EBM.

I principali player del mercato dei sistemi di fabbricazione additiva per metallo sono mostrati nel grafico che segue, figura 2.1.

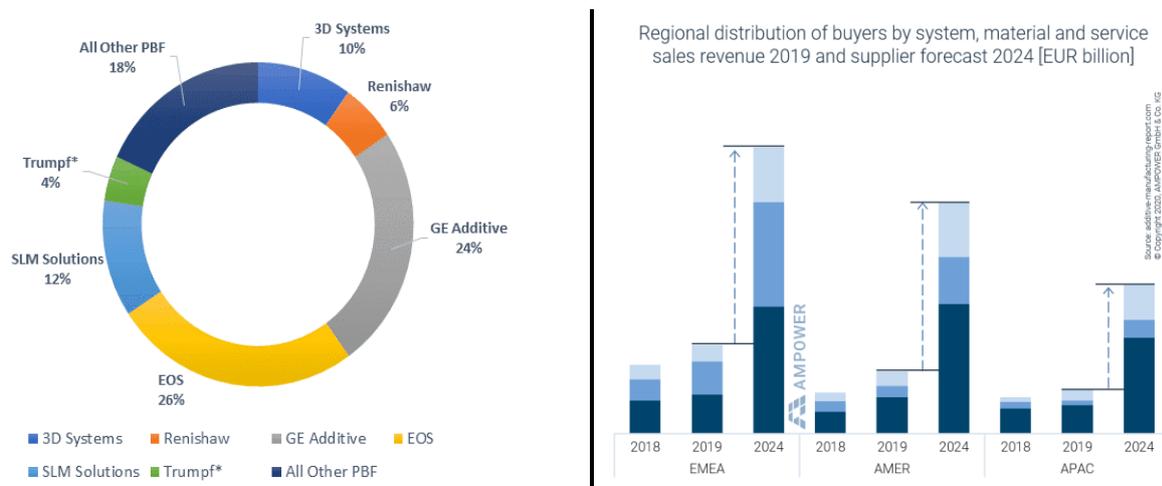


Figura 2.1 SmarTech Analysis 2019 Metal Powder Bed Fusion Market Deep Dive Report

Nel grafico a destra invece è mostrata la crescita che ci si aspetta da parte di questa tecnologia nel corso dei prossimi anni nelle varie regioni del mondo. È possibile osservare che è stimata una forte crescita del mercato che porterà ad una maggiore diffusione di questa tecnologia in molti altri settori ancora oggi poco esplorati.

2.1 Laser - Powder Bed Fusion – il processo

La tecnologia di AM con la quale è stato prodotto il componente di questo lavoro di tesi, è la fusione a letto di polvere di metallo e per tale ragione la si approfondisce in questo paragrafo.

Esistono diverse varianti della tecnologia di fusione a letto di polvere. Sebbene la tipologia del processo, le condizioni e le caratteristiche delle parti possano variare, tuttavia il principio di funzionamento è lo stesso. Le tecnologie a letto di polvere, secondo la normativa ASTM: L-PBF, sfruttano l'energia di un laser per fondere

selettivamente le particelle di polvere metallica opportunamente ottenute da processi precedenti, all' interno di una camera di lavoro preparata.

Come mostrato in Fig. 2.2, il materiale del modello sotto forma di polvere (il diametro medio della polvere varia in genere tra 15 e 45 micron) viene caricato e distribuito su un piano di costruzione mediante una lama o un meccanismo di stesura della polvere (leveling roller in figura 2.2).

Lo spazio tra la superficie della piastra di costruzione, o uno strato finito, e il bordo inferiore di questo meccanismo di diffusione mentre si sposta attraverso l'area di costruzione, definisce lo spessore e l'altezza dello strato. L'altezza di uno strato di polvere è tipicamente compresa tra 25-50 micron. L'altezza dello strato è un fattore importante nel processo di fusione del letto di polvere ed è accuratamente selezionato insieme ad altri parametri e fattori di costruzione. Questi sono ad esempio il raggio della sorgente di energia che deve fondere il metallo, la potenza, nonché la dimensione e la distribuzione delle particelle di polvere.

Una volta steso lo strato di polvere, un raggio di energia laser viene focalizzato sul letto di polvere e puntato sulla superficie del letto secondo una strategia programmata per riempire l'area definita da una fetta del modello 3D considerato.

Anche questa fase è un fattore critico e ha forti effetti sulla qualità, sulla microstruttura e sui difetti del materiale nel pezzo finito. Una volta completato uno strato, si prosegue in questo modo fino alla completa fusione di tutti gli strati fino al completamento del job.

Successivamente, il processo a letto di polvere prevede operazioni simili alla maggior parte delle altre tecnologie additive come descritto nel capitolo precedente. Si noti che nel processo a letto di polvere l'esposizione laser è tipicamente regolata in modo tale che anche una certa profondità nello strato precedente venga fusa per consentire l'adesione completa. (vedere paragrafo successivo.)

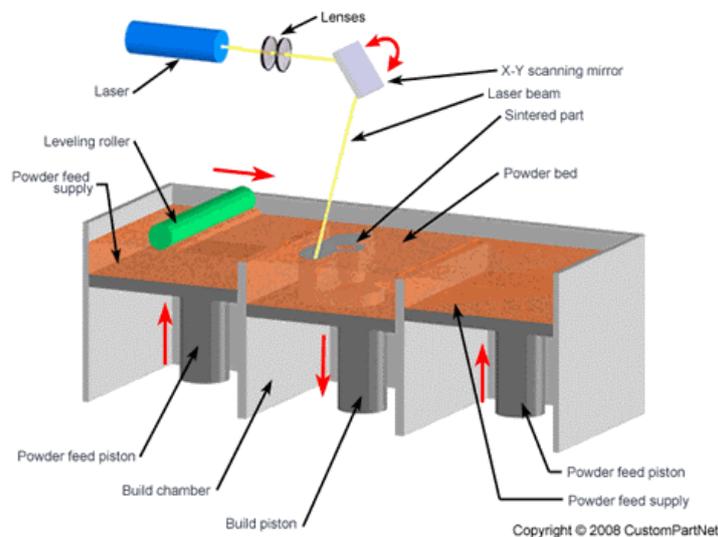


Figura 2.2 Schema qualitativo L-PBF.

Il processo a letto di polvere è in grado di lavorare un'ampia gamma di materiali, tra cui leghe ingegneristiche comuni a base di acciaio, titanio, nichel, cobalto-cromo, molibdeno, materiali compositi a matrice metallica, ceramici e altri metalli.

Alcuni parametri caratteristici sono fortemente in sviluppo in questi ultimi anni, come: la velocità di costruzione, la precisione dimensionale, la densità di deposito e i miglioramenti della finitura superficiale.

I produttori di questi sistemi continuano a progettare e costruire macchine sempre più grandi, con capacità produttive sempre maggiori. La ricerca continua nelle università e nei laboratori di ricerca aziendali, aprendo la strada all'adozione in un'ampia gamma di applicazioni industriali. Le principali specifiche tecniche di questa tecnologia sono riassunte nella tabella seguente.

Caratteristiche L-PBF	
Fonte di energia	Laser - Fotoni coerenti
Atmosfera	Argon (atmosfera inerte)
Stress termici	Si
Trattamenti termici	Si
Dimensione della polvere	10-45 micron
Ra	5-40 micron [15]
Spessore layer	30-50 micron
Velocità di costruzione	Moderata
Temperature di processo	Piattaforma riscalda up to 200°C

2.1.1 Melting Pool

Quando si dirige una fonte di energia concentrata su una superficie metallica, parte dell'energia viene dissipata, parte viene riflessa quando colpisce la superficie e parte dell'energia viene assorbita e poi irradiata sotto forma di calore. La restante energia assorbita riscalda il metallo e, se sufficientemente intensa, crea una pozza di fusione. La sorgente di calore può quindi essere passata lungo un percorso prescritto, la Figura 2.3 mostra l'impatto dell'energia laser che passa tra una zona densificata e una non densificata.

Sebbene la fisica delle interazioni del raggio di energia e della zona di metallo fuso esuli dallo scopo del paragrafo, è importante notare che il flusso di materiale all'interno della pozza di metallo fuso e il flusso di metallo vaporizzato sopra la pozza sono molto complessi e difficili da controllare. A questo scopo, nei processi SLM, si insuffla un gas inerte (come N₂) ed inoltre una pompa è utilizzata per ridurre il contenuto di ossigeno presente in macchina.

Il metallo vaporizzato sopra il bagno fuso può essere dannoso per il processo; tuttavia, può creare come vantaggio un flusso che aiuta a rompere gli strati di ossido superficiale tra le particelle di polvere e le zone appena densificate. Al contrario può comportare una perdita di componenti di lega a basso punto di fusione e condensazione di vapori sugli elementi ottici o depositi sulla camera o sui filtri, che richiedono la rimozione mediante pulizia o sostituzione.

Comprendere le basi della fusione, la fonte di calore e il processo permette di progettare componenti AM migliori e a scegliere e applicare correttamente i parametri di processo per ottenere la qualità desiderata all'interno della parte.

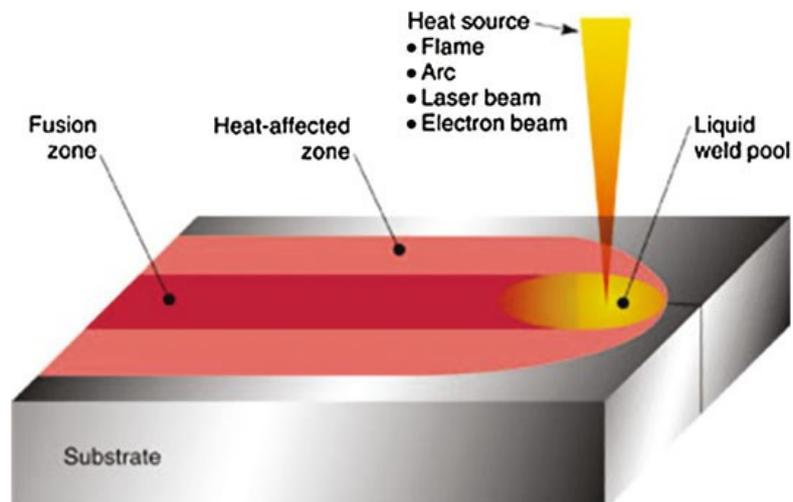


Figura 2.3 Rappresentazione qualitativa del Melt pool. [16]

2.1.2 Laser

Così come l'ottimizzazione topologica dopo anni ha trovato modo di esprimersi grazie alla tecnologia additiva, i laser hanno trovato applicazione nella tecnologia LPBF dopo molti anni dalla loro scoperta.

Infatti, l'invenzione del laser è avvenuta più di un secolo fa ed è sicuramente una pietra miliare tra le scoperte fisiche che ha trovato applicazione su larga scala negli ultimi anni.

Come sappiamo, i laser generano un fascio di alta densità di fotoni che possono essere concentrati in una piccola zona o spot capace di fondere e vaporizzare il metallo. Questi ultimi possono essere capaci di generare centinaia di Watt quando vengono convogliati in zone piccole frazioni di millimetro e viaggiare a grande velocità, nell'ordine di molti metri al secondo. Esistono diversi tipi di Laser a stato solido o a gas; tuttavia, la maggior parte dei sistemi di fabbricazione additiva ora utilizza laser in fibra grazie alla loro affidabilità, dimensioni compatte e bassa manutenzione. Il funzionamento prevede la creazione di un fascio coerente di fotoni. Questo fascio viene diretto sulla superficie della parte alla potenza sufficiente per ottenere il grado

desiderato di fusione, vedi figura 2.4. L'assorbimento del fascio può essere significativamente diverso a seconda dei metalli (Fig.2.5). Il fascio laser viene movimentato tramite specchi galvanometrici e viene indirizzato sulla piattaforma mediante una lente f-theta.

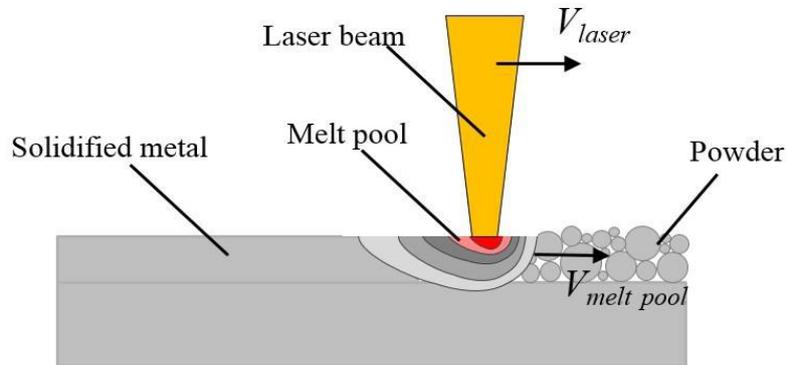


Figura 2.4

L'interazione tra il raggio del laser e il letto di polvere crea un pool di fusione localizzato, che sperimenta vari fenomeni come la convezione e l'evaporazione di Marangoni. Inoltre, le forze capillari ai confini tra la fase liquida e la polvere circostante agiscono anche come un potenziale per la permeazione della fase liquida nel letto di polvere e la migrazione delle particelle di polvere.

Poiché il bagno di fusione avanza con l'avanzamento del raggio laser, l'evoluzione dinamica della fase liquida potrebbe aumentare ulteriormente l'instabilità dell'interazione liquido-solido e quindi influenzare la qualità del bagno fuso. Si presume generalmente che sia il raggio di elettroni che il raggio laser seguano una distribuzione gaussiana dell'energia.

A causa di questo fenomeno, il tasso di assorbimento totale di energia per il letto di polvere è generalmente molto più alto di quello del materiale solido. Inoltre, ciò implica anche che il tasso di assorbimento dell'energia per la fusione del letto di polvere AM è specifico del tipo (lotto) di polvere, il che a volte richiede una caratterizzazione sperimentale quando sono necessarie informazioni accurate sull'assorbimento dell'energia. Inoltre, il più alto assorbimento di energia si verifica nelle regioni al di sotto della superficie del letto di polvere, che a sua volta dipende dalle caratteristiche del letto di polvere come la morfologia le dimensioni delle particelle.

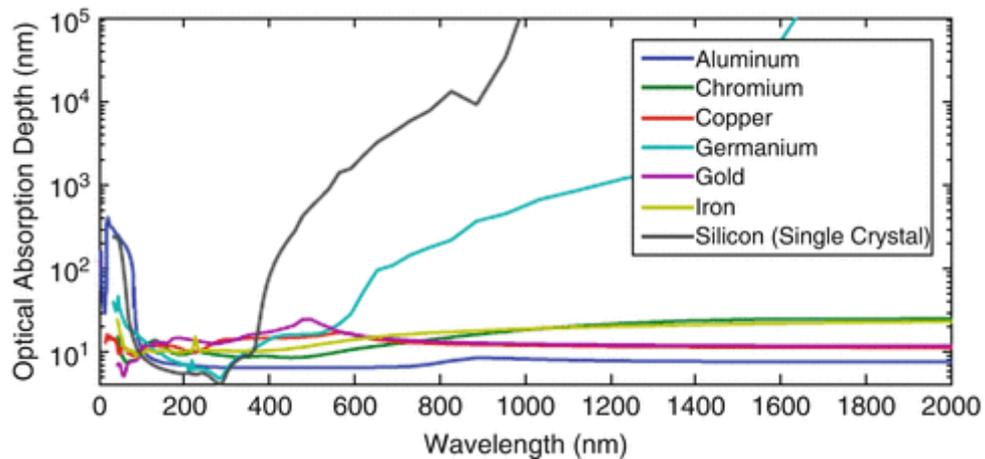


Figura 2.5 – Profondità di assorbimento di vari metalli al variare della lunghezza d'onda [17]

2.1.3 Parametri di processo della tecnologia LPBF

I principali parametri (Fig 2.6) che regolano il processo di questa tecnica di fabbricazione sono legati a:

- parametri correlati alla polvere, come lo spessore dello strato, le proprietà, la forma e le dimensioni etc.;
- parametri del laser, quali potenza, velocità di spostamento e dimensione del raggio del fascio laser;
- parametri relativi alla strategia di scansione, pattern di scansione, spaziatura del tratteggio del laser e l'offset della linea di scansione;
- parametri legati alla camera, come temperatura del letto di polvere e flusso di gas etc.

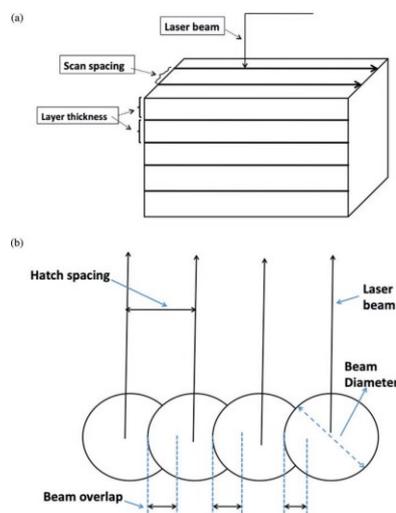


Figura 2.6 – Rappresentazione qualitativa dei tipici parametri di processo dei sistemi SLM.

Questi parametri sono tutti fondamentali per fondere e arrivare negli strati adiacenti e penetrare completamente negli strati precedentemente depositati. Infatti, una cattiva fusione della polvere può derivare da un disturbo del processo o da una selezione inadeguata dei parametri.

Perciò risulta di fondamentale importanza ottimizzare questi parametri in modo da ottenere la miglior qualità possibile per ogni componente ed evitare difetti.

Tabella 1

Parametri che influenzano il processo	
Proprietà della polvere	Parametri di processo
• Forma delle particelle	• Potenza laser
• Trattamenti termici	• Hatching distance
• Composizione chimica	• Atmosfera
• Temperatura di fusione	• Tipologia laser
• Assorbimento e riflettanza	• Spot laser
• Conducibilità termica	• Spessore del layer
• Spessore layer	• Strategia di scansione
• Dimensione e distribuzione granulometrica	• Orientazione di crescita
	• Flusso del gas
	• Temperatura del letto di polvere

2.2 Vantaggi del L-PBF

Negli ultimi 15 anni ci sono stati sicuramente importanti miglioramenti tecnologici per la produzione additiva in metallo che vale la pena menzionare.

- **Laser aggiuntivi**
I laser e i sistemi di scansione ottica necessari per gestirli rappresentano una parte significativa del costo di un sistema di produzione additiva in metallo; Nella maggior parte delle applicazioni, l'aggiunta di laser aggiuntivi a un sistema AM può aumentare la produttività dell'apparecchiatura di circa il 70%. Oggi molti sistemi utilizzano fino a 4 laser.
- **Ottica avanzata**
Uno dei limiti dei sistemi di produzione additiva in metallo originali era l'utilizzo di un obiettivo f-theta. L'obiettivo f-theta è in realtà un insieme di lenti che regola la lunghezza focale della sorgente di alimentazione laser in relazione alla posizione di scansione del raggio. Questo è un requisito per una corretta elaborazione alle estremità dell'area di costruzione. Sfortunatamente, è difficile

produrre obiettivi f-theta con una precisione sufficiente oltre un'area di scansione di circa 300 mm². Quando si utilizza una lente f-theta, il diametro del raggio è uniforme su tutta la piattaforma di stampa. Per soddisfare la necessità di aree di stampa più grandi, l'obiettivo f-theta è stato sostituito con un obiettivo con messa a fuoco dinamica. Ciò consente al sistema di regolare il diametro del raggio in funzione della posizione e di aumentare l'area di scansione funzionale. Sebbene fosse un miglioramento necessario per la produzione di grandi parti, la lente di focalizzazione dinamica ha anche introdotto la possibilità di modificare il diametro del raggio (e di conseguenza della densità di energia) che diventa una variabile di processo. Questa funzionalità consente di regolare l'energia per ottimizzare sia la precisione del pezzo che la produttività. In molti casi ciò può comportare un aumento della produttività del 30% pur mantenendo la necessaria precisione dimensionale.

- Automazione

Uno dei problemi principali con i sistemi AM in metallo era il tempo di attività del sistema e l'efficacia complessiva delle apparecchiature. Tuttavia, la maggior parte dei sistemi richiede ancora l'intervento manuale dell'operatore tra ogni ciclo di produzione. Per superare questo limite è stato necessario rendere autonome alcune fasi del ciclo come la sostituzione dei job, lo scarico e carico della piattaforma etc.

Come è stato già detto, questa tecnologia permette di produrre parti metalliche con forme uniche che non possono essere fabbricate con mezzi convenzionali. Ad esempio, strutture con gusci complessi, strutture reticolari interne, canali di raffreddamento interni ed altre.

In questo modo si può ridurre al minimo il materiale usato, ottimizzare la resistenza o migliorarne la funzionalità. Inoltre, si può ottimizzare il flusso di gas o fluidi, il raffreddamento o altre proprietà termiche o meccaniche. I passaggi interni complessi possono essere generati a condizione che la polvere intrappolata durante il ciclo di costruzione e gli eventuali supporti necessari possano essere rimossi durante le operazioni di finitura post-processo.

Questo è di particolare importanza per il caso oggetto di questa tesi per cui a seguito di tutte queste considerazioni sono state prese decisioni sulle strategie di progettazione e produzione del componente.



2.3 Limiti del L-PBF

D'altra parte, come per tutti le tecnologie, questa presenta dei limiti, uno per tutte: la complessità del processo.

Infatti, è necessario il controllo di quest'ultimo, dalla generazione del modello fino alla parte finita.

I problemi relativi alle proprietà del materiale, alla microstruttura, alla ripetibilità del processo (ad es. stessa macchina in un giorno diverso o al passaggio da un lotto di polvere a un altro, macchina diversa, in un luogo diverso, utilizzando gli stessi parametri) devono essere affrontati in modo completo per arrivare ad avere delle caratteristiche confrontabili con quelle delle tecnologie tradizionali.

Inoltre, per diversi motivi anche se questa tecnologia ha le potenzialità per aumentare l'efficienza nell'acquisizione e nella distribuzione delle parti, il processo di Fabbricazione additiva, tuttavia, solleva anche preoccupazioni legali e normative. In tutti quei settori in cui ci sono rigidi protocolli e standard di sicurezza e prestazioni da rispettare, la certificazione del settore dei materiali di stampa 3D è un potenziale ostacolo.

Infatti, è ancora difficile completare la transizione dell'utilizzo della fabbricazione additiva dalla prototipazione all'utilizzo nella produzione di parti finali ovvero pezzi definitivi. Questi devono essere capaci di soddisfare solidi standard di prestazioni e sicurezza. Perciò bisogna acquisire la sicurezza necessaria per la standardizzazione e la certificazione di materiali e processi quando utilizzati in applicazioni critiche.

Come è stato detto, il processo di fusione a letto di polvere, può raggiungere densità fino quasi il 100%. Tuttavia, gli obiettivi del 100% di densità per tutti i materiali, in tutte le condizioni di deposizione, possono essere in conflitto con altri obiettivi, come quelli di accelerare i tassi di deposizione e quindi di produzione.

Ci sono voluti un paio di decenni di sviluppo di processi per polveri e L-PBF per raggiungere l'obiettivo del 100% di densità per determinati materiali. È necessaria più esperienza e la creazione di basi di dati di parametri per ottenere un livello di conoscenza tale almeno per una gamma completa di materiali.

I difetti nel metallo fuso e nei componenti finiti sono onnipresenti in qualsiasi tecnologia e lavorazione tradizionale dei materiali; tuttavia, sapere come queste microstrutture ottenute da tecnologie additive si comportino richiederà uno sforzo importante nel prossimo decennio. I principali difetti che si possono riscontrare sono di discontinuità microstrutturale (vacanze ecc.) e anisotropia all'interno della microstruttura delle parti. Infatti, questa può presentare microporosità, portando a



proprietà e prestazioni ridotte riguardo alla vita a fatica, all'allungamento, resilienza, creep (scorrimento viscoso), rottura, duttilità ecc.

Inoltre, le velocità di solidificazioni che si aggirano intorno ai 10^{-4} s possono provocare microstrutture metastabili o concentrazioni di dislocazioni che possono essere dannose nelle condizioni di lavoro e perciò spesso è indispensabile un post trattamento (HT o HIP).

I principali difetti nei processi di FA metallo dovuti alle azioni fisiche che si sviluppano durante il processo di fabbricazioni sono mostrati in figura 2.8. Per ognuno di questi si studiano delle soluzioni per arginarli ed eliminarli, attraverso l'ottimizzazione del processo di stampa, ovvero l'ottimizzazione dei parametri.

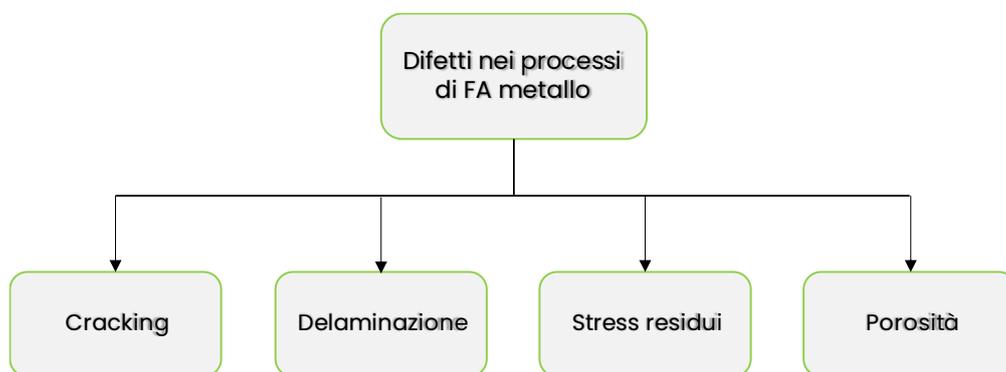


Figura 2.7

Ulteriori limitazioni sono legate alle dimensioni dei sistemi L-PBF disponibili. Attualmente questi sono limitati tecnologicamente alla costruzione di componenti di dimensioni massime dell'ordine di 400–600 mm³.

Infatti, volumi maggiori vuol dire necessità di molto più materiale anche solo per caricare le macchine e per coprire tutta l'altezza dei componenti, che si traduce in costi di set up della macchina elevatissimi in funzione del materiale.

Anche i tempi di stampa, fusione, stesura della polvere, così come il preriscaldamento del piano di lavoro e della polvere e il successivo raffreddamento del letto sono proporzionali direttamente con il volume del pezzo e dell'area di stampa. Anche stampare piccoli pezzi in un volume molto grande risulta poco efficiente dal punto di vista del tempo e dei costi. In aggiunta anche la questione della movimentazione precisa della piattaforma risulta essere ancora tecnologicamente limitante, poiché sarebbe necessario spostare con estrema precisione (spessore dello strato: micron) volumi di polvere che possono pesare tra i 5 e i $9 \cdot 10^4$ kg.

Sulla stessa linea troviamo l'elevato costo delle polveri, come anticipato nei capitoli precedenti questo è dovuto a diversi fattori, che portano il prezzo a kg di polvere a valori decisamente alti e poco competitivi.

Altre considerazioni sui limiti della tecnologia sono legate alla:

- precisione dimensionale ottenibile che è legata alla dimensione dello spot del raggio laser, alla dimensione della polvere e all'orientamento della parte;
- rugosità superficiale che è fortemente dipendente dai diversi parametri e dalla morfologia del pezzo; tuttavia, è nell'ordine dei valori che si ottengono per la microfusione (1/10 di mm), per cui ci si aspetta comunque che le zone di accoppiamento e altre siano sottoposte a lavorazioni successive alle macchine utensili.

Le tecnologie a letto di polvere sono anche limitate ad un singolo tipo di materiale di cui è composto il letto di polvere. Infatti, sostituirlo significherebbe dover completamente pulire la macchina e ricaricarla con un materiale diverso. Procedura assai complessa e costosa. Tuttavia, sistemi più moderni possono presentare dei moduli di gestione dei job e della polvere in grado di arginare questo problema.

Inoltre, esistono anche altre limitazioni intrinseche a queste tecnologie che verranno spiegate meglio nei capitoli seguenti e che, in sede di progetto, bisogna assolutamente tenere in conto. Queste sono ad esempio la necessità di supporti nelle zone sporgenti e con angoli inferiori ad una certa quota rispetto alla normale del piano di crescita. Questi valori di angoli sono tipici del materiale che si stampa.

In conclusione, i vantaggi del SLM includono la capacità di produrre componenti complessi quasi completamente densi con alta precisione e proprietà anche superiori rispetto a quelli prodotti con metodi tradizionali come la fusione.

Tuttavia, esistono anche alcuni svantaggi:

- la dimensione minima (dettagli) che è vincolata dalla dimensione dello spot del raggio laser,
- difetti microstrutturali e metallurgici provenienti dal processo di fabbricazione, che possono essere difficili da valutare e prevenire, come la potenziale distorsione termica dei componenti a causa di sollecitazioni residue derivanti dal rapido raffreddamento durante la fabbricazione
- la rimozione della polvere, infatti i vuoti interni chiusi non possono essere prodotti a causa dell'intrappolamento della polvere.

In aggiunta anche i dati disponibili sulle prestazioni dei materiali prodotti da SLM risultano essere ad oggi ancora limitati.

Quindi, come verrà chiarito meglio nei capitoli successivi (in particolare in quello dedicato al **DfAM**) massimizzare i vantaggi offerti dalla progettazione AM è attualmente limitato dalle centinaia di variabili dell'AM e dai vincoli progettuali.



Inoltre, le decisioni progettuali vengono prese sulla base di un'esperienza limitata o su un set di dati scarsamente popolati, ciò è dovuto al fatto che questa è ancora una tecnologia molto recente.

2.4 I materiali metallici per l'Additive

Le tecniche di fabbricazione additiva per la produzione di componenti in metallo si suddividono in base al materiale di partenza solidi o polveri. Queste ultime possono essere polveri di singolo componente o pre alligate.

La produzione delle polveri metalliche attraversa diversi step, si parte dalla estrazione della materia prima fino alla validazione delle polveri che devono essere opportunamente lavorate e verificate per il tipo di tecnologia.

Nel caso della tecnologia Laser a letto di polvere (L-PBF) la dimensione della polvere deve essere molto fine tipicamente con diametri compresi tra 15 e 45 micron e deve garantire anche una serie di qualità e caratteristiche che in questa sede non vengono trattate.

Il processo tramite il quale si ottiene la polvere può essere condotto con tecniche diverse ottenendo quantità e qualità diverse. Ad oggi si parla di Gas atomization, sistemi al plasma, water atomization e centrifuga. Tali processi sono particolarmente costosi e questo insieme ad altri determina l'elevato prezzo della polvere.

I materiali maggiormente utilizzati in Additive Manufacturing sono i seguenti:

• Lega di alluminio AlSi10Mg:

Ad oggi questa lega è ben consolidata, usata in molteplici applicazioni come automotive e aerospazio fino ai beni di consumo; infatti, questo materiale rappresenta l'alternativa della fabbricazione additiva alle leghe di alluminio classiche. Tale composizione di lega è stata scelta per migliorare la sua processabilità, la presenza di silicio la rende una lega più resistente e dura dell'alluminio puro grazie alla formazione del precipitato Mg_2Si . Inoltre, grazie alla passivazione naturale dell'alluminio si forma uno strato di ossido superficiale che rende il materiale abbastanza resistente alla corrosione. Le principali proprietà di questa lega sono:

- Buon allungamento a rottura;
- densità bassa, ottimo per applicazioni leggere e resistenti;
- elevata conducibilità elettrica e conduzione termica;
- sensibilità ai trattamenti termici.



• **Hastelloy X, In625 ed In718:**

le leghe di Nichel rappresentano uno dei materiali di maggiore interesse per i campi applicativi in cui trova impiego. Le superleghe di nichel-cromo come Inconel 718 e Inconel 625 sono costituite da tanti elementi all'interno ed ognuno con un compito diverso. L'Inconel 718 è una versione indurita per invecchiamento del 625.

Queste leghe sono spesso utilizzate in ambienti aeronautici, petrolchimici e automobilistici ad alto stress e ad alta temperatura. Le proprietà meccaniche delle leghe a base di nichel utilizzate nella produzione additiva, come Inconel 625, sono notevolmente migliorate dall'uso di quantità significative di nichel, cromo e molibdeno nel metallo. In particolare, le leghe di Nichel risultano molto interessanti per applicazioni in cui si hanno temperature di esercizio elevate, maggiori di 700°-800°C. In questo campo di temperature tali leghe performano al meglio. Infatti, sono particolarmente resistenti al creep e alla frattura.

Il processo di indurimento genera precipitati che fissano meglio i grani di metallo in posizione. L'Inconel 718 è un metallo altamente resistente anche agli effetti corrosivi dell'acido e dimostra inoltre un'eccellente resistenza alla trazione e una buona saldabilità che lo rendono particolarmente adatta alla produzione additiva. Le principali proprietà di questa lega sono:

- Termomeccanicamente competitivi come i ceramici;
- Resistenza al creep;
- Proprietà meccaniche costanti tra i 700-1100°C;

• **Acciaio inox: 17-4 / 15-5:**

Gli acciai inossidabili sono di particolare interesse per la Fabbricazione additiva poiché risultano abbastanza complessi da gestire con le tecnologie tradizionali. Ciò ne fa automaticamente dei buoni candidati per la FA.

Queste leghe presentano anche una bassa quantità di Carbonio il che li rende ideali per la stampa poiché si riesce ad ottenere direttamente una struttura martensitica. Le caratteristiche di questi acciai sono circa 2-3 volte migliori di quelle delle leghe di alluminio rendendole adatte a diversi tipi di applicazioni. Le principali proprietà di questa lega sono:

- costo moderato;
- resistenza alla corrosione;
- carico di rottura elevati.



• Lega di Titanio Ti-6Al-4V:

Le leghe di titanio sono tra le più importanti nel mondo della fabbricazione additiva. I campi applicativi principali sono quelli in cui è richiesta complessità e performance dal punto di vista meccanico. I principali settori sono quello aeronautici, aerospaziale e anche biomedico. Infatti, grazie alla sua biocompatibilità il titanio rende il metallo un'opzione praticabile per applicazioni mediche quando è necessario il contatto diretto con il tessuto o l'osso.

Queste applicazioni derivano dalle eccellenti combinazioni di proprietà meccaniche specifiche e l'eccezionale comportamento alla corrosione mostrato dalle leghe di titanio. Infatti, il titanio è uno dei materiali con la più alta resistenza specifica e quindi in un'ottica di ottimizzazione e riduzione della massa è quello che può fornire i migliori risultati.

Un altro vantaggio è sicuramente il fatto che dal punto di vista meccanico questa lega è difficile da lavorare ed è infatti classificata come "hard to machine". Attraverso le tecnologie sottrattive questo può dare problemi e si presenta la necessità di lavorarlo con velocità di taglio minori e non tutti gli utensili sono adatti. Questo è sicuramente un punto a favore per AM che, come è stato presentato precedentemente, non soffre di nessun costo aggiuntivo sul processo. Questo permette di ridurre notevolmente i tempi di produzione e di ottenere una parte semi definitiva direttamente dalla macchina. Tuttavia, a limitare il suo uso diffuso è l'alto costo delle leghe di titanio rispetto ai materiali concorrenti che spesso non ne giustifica l'applicazione, infatti un kg di polvere di questa lega può costare diverse centinaia di €.



3 Design for Additive Manufacturing – DfAM

3.1 Principi

I vantaggi e gli svantaggi delle tecnologie di produzione additiva devono portare i progettisti a pensare oltre la progettazione tradizionale, ai vincoli di produzione e a quelli di assemblaggio. La FA ha da offrire vantaggi geometrici, materiali e di personalizzazione unici non forniti da altre tecniche di produzione. Allo stesso modo, la FA ha bisogno di supporti, produce tipicamente proprietà anisotrope e può richiedere una notevole post-elaborazione. Questi e altri vantaggi e svantaggi della FA hanno portato a una maggiore enfasi sulla formazione dei progettisti dedicati alla produzione additiva. In questo paragrafo, vengono ripetuti alcuni dei concetti dei capitoli precedenti e introdotti alcuni nuovi.

Tuttavia, prima di procedere nell'esplorare quelle che ad oggi sono le tecniche di progettazione additiva, è necessario ancora una volta sottolineare quelli che sono i principali limiti di processo di questo tipo di tecnologie:

- **Costo:** sia il costo delle macchine AM che dei materiali che vengono usati è ancora molto alto, per questo motivo come è stato ampiamente discusso in precedenza per alcune applicazioni le tecnologie tradizionali risultano essere molto più convenienti in termini di costo ed efficienza etc.
I punti di forza dell'AM metallo risiedono infatti nella complessità di geometrie che non sono possibili da produrre con altre tecnologie, nella produzione di pezzi in cui è richiesta una forte personalizzazione etc. (vedi paragrafi precedenti).
- **Dimensioni:** I volumi di costruzione dei pezzi sono ancora oggi molto limitati, le tecnologie a letto di polvere non raggiungono il 1m³ di volume, questo ad oggi è ancora un limite tecnologico da superare. Le dimensioni medie delle macchine in commercio ad oggi è di 250x250x300mm quindi sono orientati ad una produzione di pezzi di piccola misura.
- **Processo:** Sebbene ci sia stato un forte progresso tecnologico e tuttora i sistemi di Fabbricazione additiva metallo sono in continua evoluzione, oggi ancora non sono plug and play come alcuni altri sistemi che lavorano polimeri. La maggior parte delle macchine di FA metallo sono di dimensioni industriali e richiedono stringenti operazioni di controllo, gestione dei materiali, procedure di manutenzioni e collaudo così come operazioni di post processo, carico e

scarico. Queste sono tutte operazioni industriali che tipicamente non possono essere gestite da piccole realtà.

- **Design for additive manufacturing:** Uno degli aspetti più importanti dell'AM è quello della progettazione di componenti adatti a questo tipo di tecnologia. Infatti, è da sottolineare, diversamente da quanto spesso si può pensare, che non tutti i componenti progettati per le tecnologie tradizionali possono essere adatti per l'AM. Tipicamente si può affermare che se un componente è stato inizialmente progettato per essere realizzato con una tecnologia tradizionale, è probabile che quest'ultimo non sia affatto un buon candidato per la stampa 3D. Le ragioni di ciò sono molteplici tra queste ci sono i gradi di complessità della parte, i tempi di costruzione, i costi ecc.

In particolare, riguardo a quest'ultimo aspetto, il *design for additive manufacturing* (DfAM) si ha quando si progetta un componente cercando di creare un design di prodotto che sfrutti al meglio le opportunità uniche della FA. Allo stesso tempo il DfAM deve tenere conto e rispettare anche i vincoli di processo specifici della tecnologia AM che verrà utilizzata per produrre il prodotto. Questo va oltre la semplice riprogettazione delle parti esistenti per la FA. Tuttavia, ciò che non si riesce a fare ancora del tutto è sfruttare i vantaggi aggiuntivi che la FA può apportare a un intero prodotto attraverso miglioramenti nella forma e nella funzione. Per farlo è necessario conoscere i vantaggi che la FA può permettere di raggiungere e i suoi limiti.

Design for AM è sicuramente più un concetto di "pensiero" in cui vengono prese decisioni consapevoli, spesso compromessi, piuttosto che seguire fedelmente una serie di regole di progettazione come nel caso delle tecnologie tradizionali.

Con il crescente interesse per la Fabbricazione additiva, diventa sempre più importante per i produttori di tutto il mondo assicurarsi che le parti siano progettate specificamente per AM quando è possibile, così da sfruttare al meglio le potenzialità e il valore aggiunto dei propri componenti.

Ci sono, ovviamente, alcune aree di applicazione, come i pezzi di ricambio, in cui i componenti precedentemente realizzati in modo convenzionale non verranno riprogettati (completamente) per AM. In generale, però, ci sono spesso ottimizzazioni che si possono facilmente eseguire, anche su parti convenzionali, per ridurre al minimo i tempi e i costi di produzione.



Evoluzione della progettazione

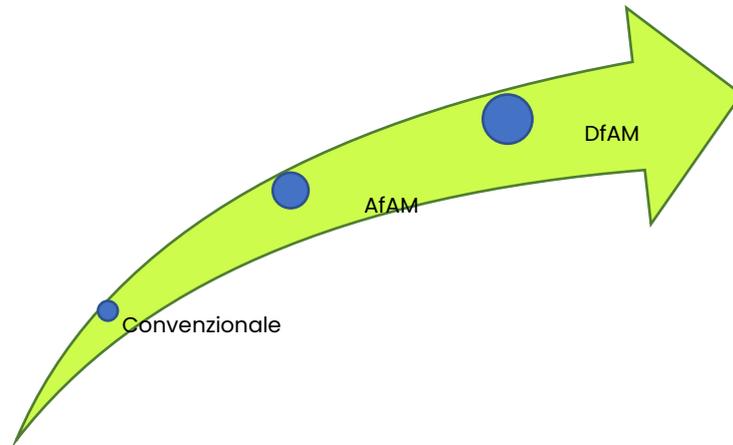


Figura 3.1

In questo paragrafo si propone una descrizione dei vari livelli di riprogettazione delle parti per meglio adattarsi ai processi additivi e l'evoluzione di quello che è la progettazione (figura 3.1). È possibile individuare una gerarchia distinta dei diversi tipi di processi di progettazione utilizzati nella produzione additiva. Tipicamente, vengono individuati tre diversi approcci (vedi figura 3.2):

- **Replicazione con l'AM:** La parte è data e la geometria è fissa; quindi, non è assolutamente permesso nessun cambiamento e la parte deve essere semplicemente replicata nel modo più vicino possibile al componente originale. Di solito si riferisce a ricambi e ai prototipi. Oppure in tutti quei casi in cui i lead time sono così importanti da giustificare l'utilizzo di tale tecnologia.
- **Adattare all'AM (AfAM):** La parte è data ma la geometria può cambiare, si intende sviluppare o modificare il progetto di un prodotto esistente per adattarlo meglio ai vincoli progettuali imposti dalla FA, raggiungendo limitati benefici. Infatti, avere un design preesistente definito riduce la possibilità di lavorare sul design space e quindi avere una maggiore possibilità di progettazione.
- **Ottimizzare per l'AM (DfAM):** Progettare per la FA un nuovo prodotto da zero e quindi avere la possibilità di sfruttare completamente le opportunità che queste tecnologie offrono. Considerando un più grande design space e quindi possibilità maggiori di decidere, il DfAM può essere finalizzato a:
 - Minimizzare il peso;
 - Massimizzare le prestazioni meccaniche;
 - Ottimizzare il comportamento dinamico;
 - Ottimizzare le prestazioni termiche;

- Ridurre il numero di componenti;
- Integrazioni di funzioni in un unico elemento.

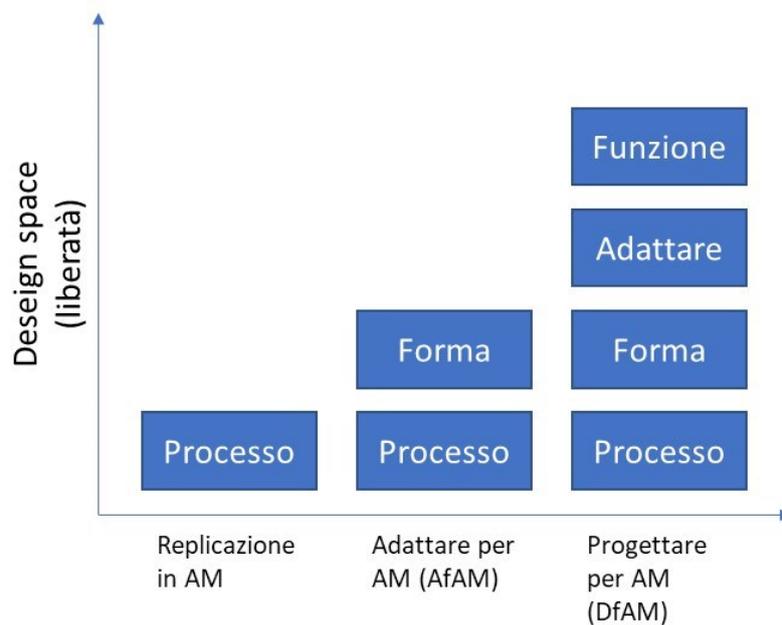


Figura 3.2 Applicazioni della FA [18]

Come affermato in precedenza, l'AM è una tecnologia costosa e, a causa del suo metodo di produzione, sarà sempre relativamente lenta rispetto ad altre tecnologie convenzionali; quindi, è probabile che rimanga relativamente costosa anche in futuro, sebbene il BEP dei volumi di produzione si sposteranno sempre di più verso valori maggiori, diventando più competitive. Pertanto, quando si considera la FA per le parti finali, nella stragrande maggioranza dei casi, dovrebbe essere utilizzata solo se aggiunge veramente valore al prodotto.

Prima di iniziare la progettazione di singole parti, ingegneri e progettisti dovrebbero analizzare il prodotto per vedere quali strategie di valore aggiunto dovrebbero adottare. Ciò avrà un impatto sulla struttura del prodotto e sulla configurazione delle parti. Dopo questo passaggio, è possibile iniziare a progettare per AM in modo da sfruttarne le opportunità.

Tabella 2 - RfAM vs AfAM vs DfAM

	Replicare per AM	Modificare per AM	Ripensare e riprogettare per AM
Vantaggi	<ul style="list-style-type: none"> -Soluzione più facile -Lead time ridotti al minimo -Sostituzione diretta di una parte 	<ul style="list-style-type: none"> - Permette la produzione di design complessi - Ottimizzazione di una parte 	<ul style="list-style-type: none"> -Estrema ottimizzazione e uso del materiale -Strutture senza supporto -Costo/performance al massimo.
Svantaggi	<ul style="list-style-type: none"> -Limitate potenzialità sfruttate -Campo di utilizzo ristretto 	<ul style="list-style-type: none"> -Moderate potenzialità sfruttate -Costo/performance più elevato 	<ul style="list-style-type: none"> - Hard skill ed esperienze consolidate necessarie. - Spesso il pezzo è già dato non sia ha carta bianca.

3.2 Considerazioni generali sulla progettazione per AM metallo

Per ottenere risultati di successo con le tecnologie additive non basta una profonda conoscenza dei principi, dei processi e delle caratteristiche meccaniche, ma anche la conoscenza di come questi processi possono essere usati in modo efficace ed efficiente per realizzare componenti migliori e funzionali.

È stato ampiamente dimostrato che l'AM permetta il sorpasso di molti dei manufacturing constrains delle tecnologie tradizionali quali formatura (laminazione, estrusione, etc), Asportazione (Tornitura, Fresatura, etc), colata, saldatura ecc.

Tuttavia, c'è da sottolineare che anche le tecnologie additive sono soggette a diverse limitazioni di fabbricazione. Per esempio, anche se è possibile in linea teorica stampare con la tecnologia L-PBF delle strutture molto complesse quali canali interni conformi, in realtà questo spesso è molto complesso. Infatti, bisogna garantire la rimozione della polvere dai canali, andando a posizionare strategicamente delle fughe per la polvere, inoltre è necessario che tali canali non siano chiusi da strutture di supporto e quindi devono essere auto supportanti. Ne è un esempio reale il componente trattato in questo progetto di tesi.

Allo stesso modo tutte le parti che presentano delle sporgenze necessitano di strutture di supporto per la crescita della parte, queste possono influenzare la processabilità e la fabbricazione sia per motivi tecnologici legati all'azione dei supporti sia al grosso lavoro di cui c'è bisogno nella fase successiva di rimozione. Questo può spesso creare un limite per cui nasce il bisogno di modificare la parte o trovare delle soluzioni alternative, come verrà spiegato in seguito.

Un altro aspetto sicuramente da tenere in conto è che questa tecnica è molto recente. Infatti, come conseguenza di ciò, molte linee guida per le tecnologie additive sono limitate ed altamente specifiche per un solo macchinario e addirittura per un solo materiale. Queste spesso non forniscono informazioni complete e necessarie per impostare correttamente la fabbricazione. Mentre per le tecnologie tradizionali, le proprietà fisiche e meccaniche dei materiali processati così come le lavorazioni tecnologiche sono standard e ben consolidate.

Sebbene ciascun processo di AM presenti delle caratteristiche uniche, tuttavia, ci sono problemi che sono comuni alla maggior parte delle tecniche di fabbricazione additive. Le qualità geometriche del pezzo lungo la direzione Z, la risoluzione, la finitura superficiale e l'accuratezza geometrica dei processi AM che lavorano strato per strato, sono tipicamente affette dallo spessore dello strato.

Sebbene uno spessore ridotto dello strato indichi generalmente una maggiore precisione geometrica e risoluzione delle caratteristiche, esistono vari altri fattori che svolgono ruoli importanti nel determinare le qualità geometriche di una parte. Per le zone verticali (Fig. 3.3a), l'effetto scala causato dal processo a strati è minimo e la precisione geometrica nella direzione Z è determinata sia dallo spessore dello strato che dalla forma (ad es. profilo di deposizione, ritiro, ecc.) dei materiali durante il processo. D'altra parte, per le zone del pezzo angolate (Fig. 3.3b e c), l'effetto scala è determinato sia dallo spessore dello strato che dagli angoli delle caratteristiche. L'angolo della caratteristica più piccolo si traduce non solo in un maggiore effetto scala, ma anche in una lunghezza di incollaggio meno efficace tra gli strati, che potrebbe a sua volta influenzare le proprietà meccaniche delle strutture.

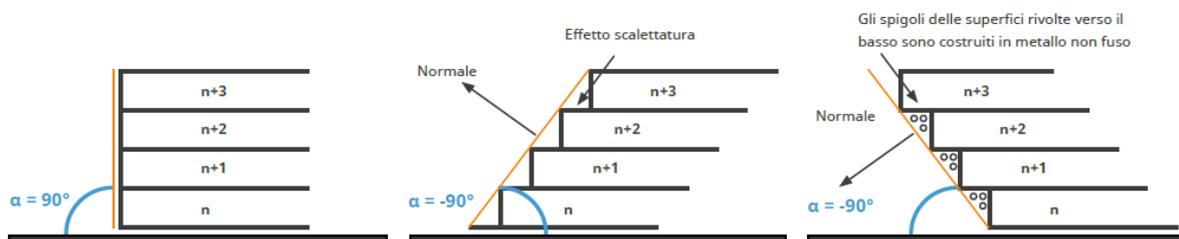


Figura 3.3 Staircase effect of AM parts [4]

Per la fusione a letto di polvere AM, un altro fattore che contribuisce all'errore geometrico è il ritiro, che avviene a causa del processo di fusione e successiva rapidissima solidificazione, che a sua volta è in gran parte determinato dalla densità del letto di polvere. La densità di impacchettamento ottenibile per il letto di polvere è

in gran parte determinata dalla morfologia della polvere, compresa la forma, la distribuzione delle dimensioni e le caratteristiche della superficie della polvere. Come regola generale, le particelle di polvere con forme più regolari possono raggiungere densità di imballaggio più elevate. Le porosità incluse nel letto di polvere provocheranno un ritiro volumetrico durante la fusione/solidificazione, che riduce l'accuratezza geometrica in tutte le direzioni. Per la maggior parte dei processi AM, il ritiro da solidificazione avviene in modo anisotropo. Per i processi di fusione a letto di polvere, l'errore nella direzione Z non ha effetti cumulativi poiché per ogni strato aggiuntivo lo spessore dello strato appena aggiunto sarà sempre riempito di polvere e quindi compenserà il ritiro.

Un altro problema di progettazione comune alla maggior parte delle tecniche AM è legato al controllo qualità. Il controllo di qualità in AM è attualmente realizzato tramite due modalità: misurazione del processo in corso e qualificazione della parte post-processo. Per i processi di produzione tradizionali, sono stati ampiamente utilizzati sia il controllo di qualità in-process che la qualificazione post-process delle parti, i processi di controllo qualità sono ampiamente consolidati ed efficienti.

Tuttavia, attualmente, la maggior parte dei sistemi di produzione AM funziona senza controllo ad anello chiuso. Per alcuni sistemi AM come i sistemi di fusione a letto di polvere, ciò non è causato solo dalla difficoltà di impostare un sistema di rilevamento in-process efficace, ma anche dalla mancanza di comprensione delle relazioni tra le variabili di controllo in ingresso e le variabili di uscita misurabili, quali temperature e distorsioni termiche.

Il controllo di qualità per un sistema di produzione funziona in Real time eseguendo, ad esempio, scansioni sul letto di polvere con delle termocamere che registrano, elaborano e salvano i dati. Tuttavia, ancora con pochissime capacità di aggiustamento del processo. Questo è sicuramente determinato dalla giovane natura di queste tecnologie per cui i dati di cui si ha disponibilità sono ancora pochi e la soluzione agli eventuali problemi che si possono riscontrare durante la stampa sono molti e di difficile correzione.

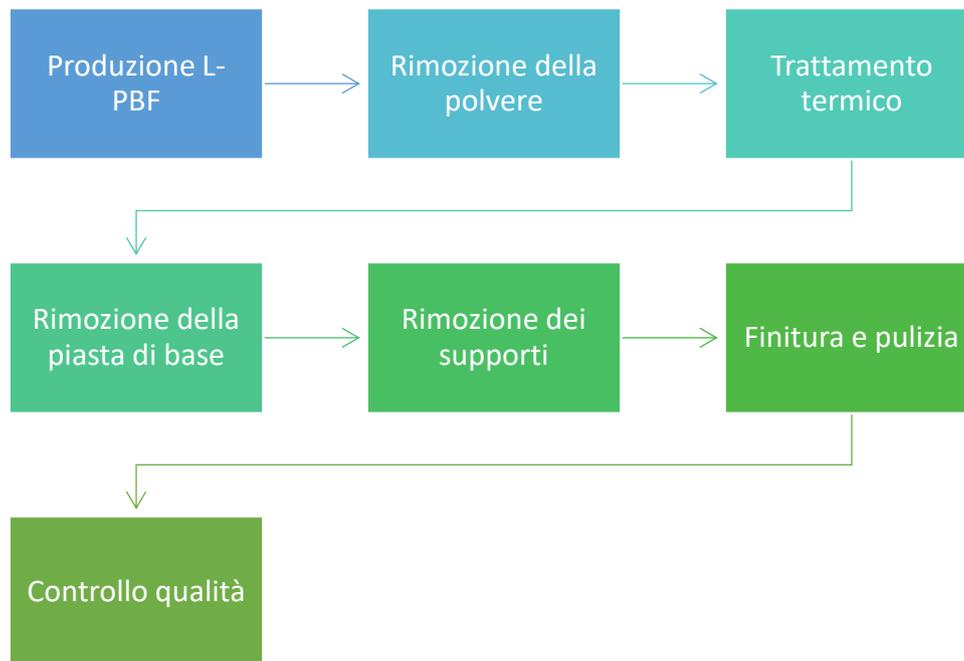
Attualmente si lavora proprio su questo, sulla creazione di correlazioni dei dati e dei parametri ottenuti dai controlli in real time con quelli che vengono dal post processo al fine di stabilire relazioni empiriche processo-qualità, che mostrano le premesse iniziali per il futuro dei controlli di qualità ma richiedono ancora un ampio e ulteriore sviluppo.

D'altra parte, la misurazione post-processo delle parti AM può diventare difficile, specialmente per le geometrie a forma libera e le parti con strutture di supporto



attaccate. Infatti, spesso anche una valutazione della qualità può essere molto complessa e richiedere l'uso di strumentazione molto costosa.

Per avere un quadro più completo del processo di FA, necessario per comprendere anche le successive parti, in figura è mostrato un tipico flusso del ciclo di FA, in cui si possono individuare tutte le fasi.



3.2.1 Considerazioni sulla FA metallo – Driver AM

Spesso è necessario avere una buona ragione per realizzare una parte AM in metallo. In genere, come detto precedentemente, le parti che non sono progettate specificamente per AM in metallo non sono adatte ad essere eseguite con tecniche AM. Sebbene ci siano alcune eccezioni, in generale, la geometria del pezzo deve essere abbastanza complessa da non essere facilmente realizzabile attraverso la produzione tradizionale.

La FA può aggiungere valore laddove la produzione convenzionale non può. Poiché la maggior parte dei componenti in metallo richiede strutture di supporto per fissaggio e per il trasferimento di calore e possono essere difficili da rimuovere, è necessario spesso uno sforzo per ridurre al minimo la quantità di materiale di supporto utilizzato. Anche l'orientamento delle parti è di fondamentale importanza, sia per ridurre al minimo i supporti, sia per la finitura superficiale.

In breve, la FA richiede una grande conoscenza sia da parte del progettista che dell'operatore della macchina. Il paragrafo seguente tenta di mostrare alcune linee

guida di progettazione che vengono utilizzate per aiutare a ottenere parti AM metalliche di successo.

3.3 Linee guida per il processo L-PBF

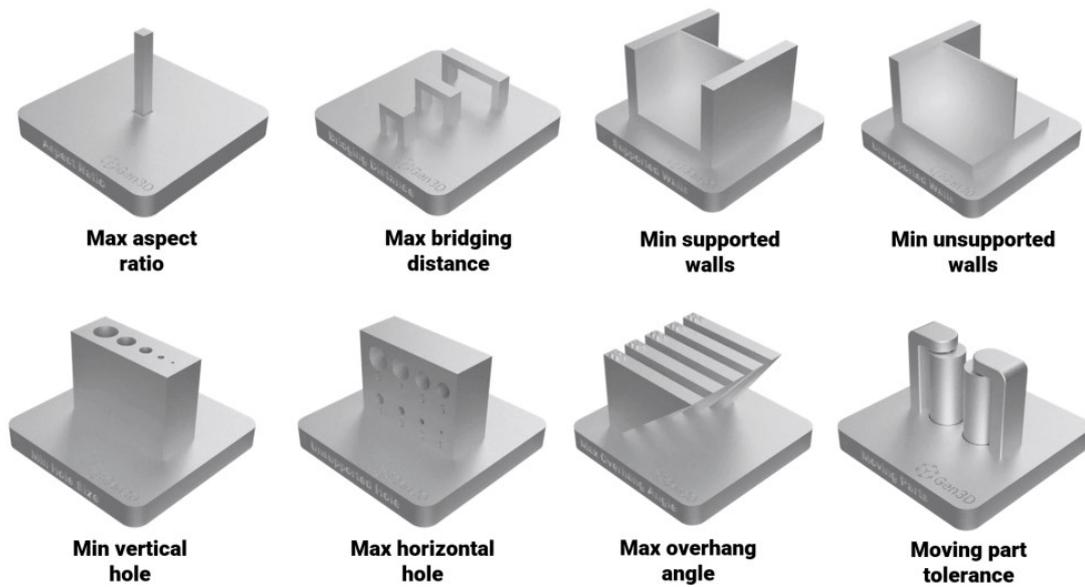
Durante la progettazione per additive manufacturing ci sono dei vincoli tecnologici da considerare e rispettare per una corretta generazione della parte. Uno degli elementi più importanti per la corretta progettazione additive è conoscere i limiti dei processi.

Fortunatamente qui ci vengono incontro le numerose linee guida di progettazione che sono state create e rese disponibili da molte aziende e industrie che lavorano da anni nel settore dell'Additive (Materialise, 3DSystem, 3DHubs etc..). Queste forniscono dei parametri per ciascuna macchina e per ogni materiale. A seconda della parte da produrre bisognerà tenere conto di alcuni aspetti (vedi Fig 3.4):

- Dimensione minima di una geometria – dettagli piccoli;
- Finitura superficiale;
- Strutture a sbalzo (sporgenze);
- Orientamento sulla piattaforma;
- Direzione di costruzione;
- Fori;
- Rimozione polvere;

Allo stesso modo è opportuno:

- Minimizzare i supporti
- Evitare la distorsione dei componenti



www.gen3d.co.uk

Figura 3.4 – Linee guida DfAM.

Molti di questi aspetti sono fortemente legati tra loro (Fig 3.5), ad esempio per ottenere una finitura superficiale migliore possibile sarà necessario disporre e orientare in maniera opportuna il pezzo, ridurre e ottimizzare i supporti così da rimuoverli più facilmente e ottenere una superficie pulita. Infatti, come è mostrato nel diagramma in figura 3.5, per un orientamento ottimale della parte è necessario identificare il tipo di superficie e successivamente l'individuazione della struttura di supporto ideale. Infatti, se il pezzo è stato progettato e posizionato correttamente in macchina è possibile ottenere un componente con tolleranze simili a quelle ottenibili dalla microfusione.

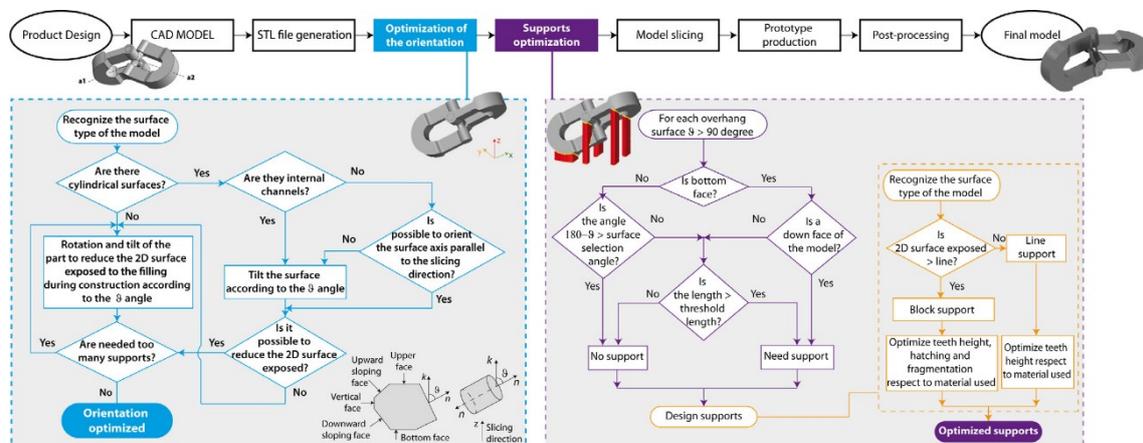


Figura 3.5 - Workflow progettazione AM. [19]

Di seguito è proposta una panoramica breve sulla linea guida di “regole empiriche” per componenti metallici prodotti per L-PBF. Queste possono variare dal produttore e da modello e della macchina. Tuttavia, si possono riassumere le principali caratteristiche comuni.

1. Spessore pareti

È possibile realizzare pareti con spessore inferiore a 1 mm. Tuttavia, non conviene scendere sotto questo valore in quanto in base al materiale utilizzato e ai parametri di processo scelti possono risultare estremamente fragili. Questo dipende anche dall’orientamento della parte e dalla geometria, come verrà discusso anche nel paragrafo successivo.

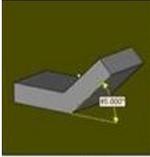
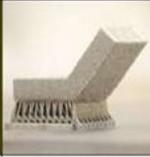
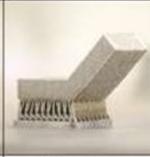
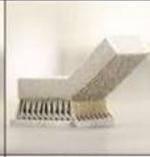
Possono verificarsi problemi con lunghezze estese di pareti non supportate (cioè senza nervature). Senza un rinforzo adeguato, è probabile che le pareti sottili di ampia superficie si deformino. In questo caso, evitare di utilizzare lo spessore minimo della parete o rinforzare la parete con nervature, “rami” o utilizzare materiale di supporto aggiuntivo per evitare che si deformi.

2. Strutture a sbalzo

Per tutte le strutture a sbalzo che presentano degli angoli maggiori o inferiori di un certo valore (Tabella 2) è necessario progettare una struttura di supporto o decidere una diversa orientazione. Infatti, per certi valori degli angoli (misurati dall’orizzontale) la struttura non sarà autoportante quindi se non adeguatamente supportata il pezzo non riuscirà a generarsi e cadrà sotto l’azione del proprio peso, figura 3.5.

I supporti tipicamente possono essere aggiunti automaticamente da software dedicati che aiutano a posizzarli e ottimizzarli. Tali strutture di supporto devono essere rimosse manualmente ed aumenteranno il tempo di post-elaborazione e quindi i costi.

Tabella 3 – Valori tipici di alpha per diversi materiali.

Angolo alfa indicativi					
Inconel	40-45°				
Titanio	40-45°	CAD	50 degrees	45 degrees	40 degrees
Alluminio	50-55°				
Cr-Co	50-55°	35 degrees	30 degrees	25 degrees	20 degrees
Acciaio	50-55°				

Tuttavia, è possibile ruotare la parte in modo che tutta la struttura sia autoportante. Infatti, la soluzione ottimale è trovare un orientamento tale che la zona diventi autoportante ed in questo gioca la conoscenza e l'esperienza degli addetti alla macchina o dei progettisti, che con l'ausilio dei software dedicati riescono a trovare i giusti compromessi per la corretta generazione delle parti.

3. Fori

Per lo stesso motivo delle grandi sporgenze anche i fori perpendicolari all'asse di crescita del pezzo necessitano spesso di strutture di supporto. Quelli con presentano gli assi paralleli alla direzione di costruzione possono essere stampati senza supporti e saranno circolari.

I fori di piccole dimensioni, inferiori a 6mm di diametro sono ideali per poter essere stampati senza la necessita di supporti. Mentre fori di più grandi dimensioni possono mostrare delle rugosità, sulla parte più alta del cerchio, fortemente crescenti in proporzione all'aumento di diametro e quindi potrebbe esserci la necessità di un una lavorazione successiva alle macchine utensili Figura 3.6. Per dimensioni sopra i 10mm o per fori di grandi dimensioni è richiesta l'aggiunta di strutture di supporto al centro per evitare che la parte collassi o si deformi durante il processo di costruzione. Questi supporti, se la zona lo prevede, dovranno essere rimossi mediante taglio o elettroerosione a filo.

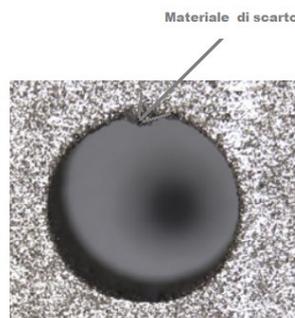
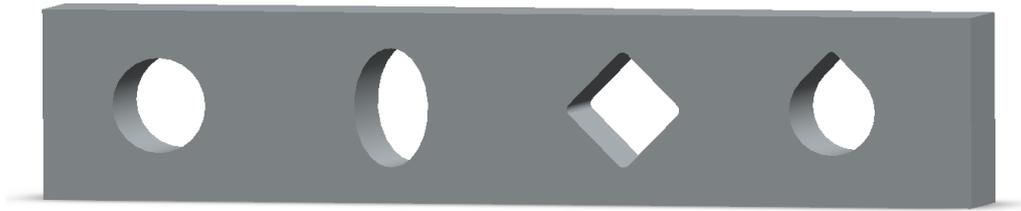


Figura 3.6

Una soluzione per le caratteristiche di questo tipo è modificare il design del foro. Nella tabella di seguito sono mostrate 3 forme del foro alternative che possono essere utilizzate per rispondere alla impossibilita di produrre i fori orizzontali perfettamente rotondi.



Foro Circolare	Foro Ellittico	Foro a Diamante	Foro a Goccia
Può essere stampato senza supporti per diametri intorno a 6-8 mm, a seconda del materiale e della macchina.	Un'alternativa al foro circolare può essere quello di forma ellittica, questo può essere stampato tipicamente fino ad altezze di 25 mm senza supporti quando l'altezza è il doppio della larghezza.	Questo tipo di foro permette la stampa senza supporti teoricamente per qualsiasi diametro, grazie alla sua forma e agli angoli tra i lati di 45 gradi risulta tipicamente auto supportante. Necessita di post lavorazione alle macchine utensili ed è buona pratica raccordare gli angoli per poter stampare in modo corretto	Come il tipo a diamante anche questa forma può essere stampata per quasi qualsiasi diametro finché l'angolo in alto è maggiore del minimo angolo tipico per quel materiale per auto sorreggersi.

Spesso è necessario cambiarne la forma ed in alcuni casi, una forma a goccia o a diamante può anche essere accettabile per il pezzo finale. Infatti, entrambe le forme possono essere utilizzate per i canali del fluido e offrono prestazioni idrauliche simili, sebbene una forma a diamante offra una resistenza significativamente migliore alle sollecitazioni di pressione.

In altri casi, dove è essenziale avere un foro rotondo di precisione, sarà necessaria una lavorazione successiva. Da notare anche che le forme a diamante forniscono un preforo simmetrico per una fresatura successiva e sono migliori di quelli a forma di goccia sotto questo aspetto. Tuttavia, in molti casi, riempire il foro e lavorarlo dal pieno può avere più senso.

4. Dettagli

I più piccoli dettagli stampabili dipendono dal materiale così come dall'orientamento e dalla geometria stessa della parte.

I valori minimi ottenibili che si registrano dipendono anche dal tipo di macchina e dalla combinazione di parametri. Per i fori verticali o le colonne (pins) estruse e viceversa le strutture tagliate, come quelle in figura 3.7, la dimensione minima (consigliata) si registra nell'ordine di 2-5 decimi di mm. Tuttavia, questi valori sono tipicamente limitati da aspetti funzionali, il minimo valore consigliato per un foro e di circa 2mm per permettere la corretta evacuazione della polvere dall'interno del pezzo.

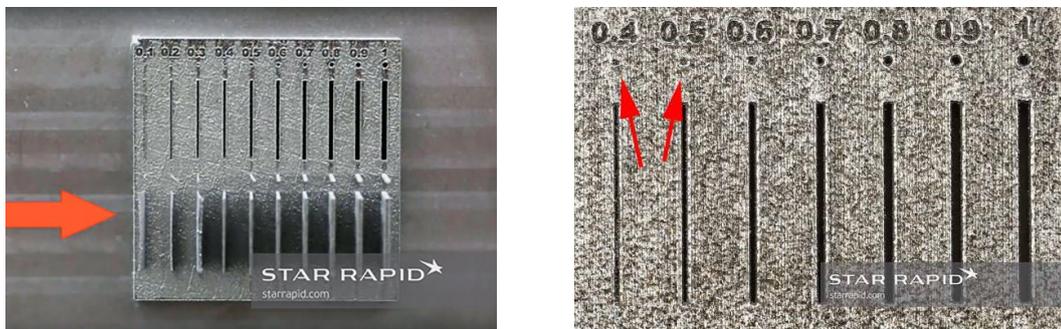


Figura 3.7 – Dettagli estrusione e tagli.

5. Ponti, strutture a sbalzo e angoli non supportati

È possibile realizzare delle strutture a sbalzo senza la necessita di supporti fino a 2mm. Come è mostrato in figura 3.8, per valori maggiori le strutture di questo tipo iniziano a presentare forti valori di rugosità sulla superficie rivolta verso il basso. Per valori più elevati diventa necessario prevedere una struttura di supporto per la buona riuscita del pezzo.

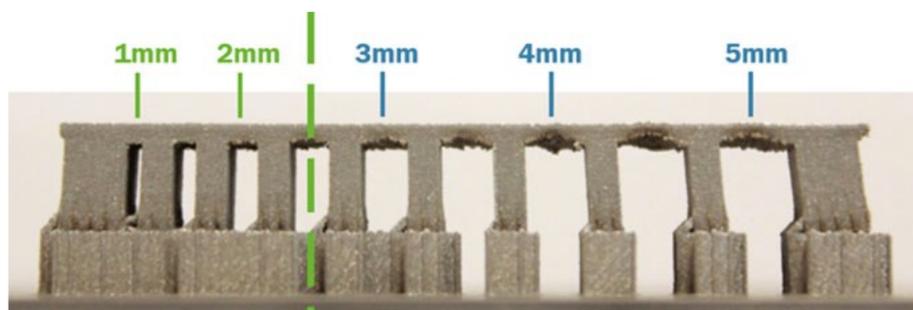




Figura 3.8 Esempio di cedimento di una struttura a ponte non supportata [20]

6. Gioco tra le parti in movimento

È possibile stampare parti accoppiate in movimento tra di loro, progettando adeguatamente i valori del gioco verticale e orizzontale. Questi sono tipicamente compresi tra 0.1 e 0.5mm, per permettere la facile rimozione dei supporti tramite sabbiatura.

Infatti, con l'AM in metallo, tutte le parti mobili dovranno essere saldate alla piattaforma di stampa o collegate tra loro, in modo che vengano danneggiate o spostate durante la distribuzione degli strati di polvere.

Per questo motivo è necessario disporre le parti ad una certa distanza e prevedere degli ancoraggi tra di loro. Queste diventano parti in movimento solo una volta che sono stati rimossi dalla piattaforma e i collegamenti di supporto vengono opportunamente tagliati. La distanza tra le parti costruite separatamente e assemblate successivamente deve essere almeno uguale alla tolleranza generale di costruzione del sistema. Questo permette la creazione, per esempio, di meccanismi e rotismi o oggetti liberi di muoversi all'interno di altri.

7. Filettature

Sebbene, teoricamente, le filettature siano possibili da ottenere direttamente dalla stampa fino a circa M4, la elevata rugosità superficiale che si ottiene determina la necessità di essere sottoposti a una successiva lavorazione o essere sottoposti a maschiatura manuale per ripulire i filetti. È buona prassi anche raccordare alla base dove incontra la parete per evitare concentrazioni

di stress. Raccordare sempre gli angoli dove le pareti incontrano un'altra superficie. Una buona regola empirica è quella di realizzare il raccordo di $1/4$ dello spessore delle pareti.

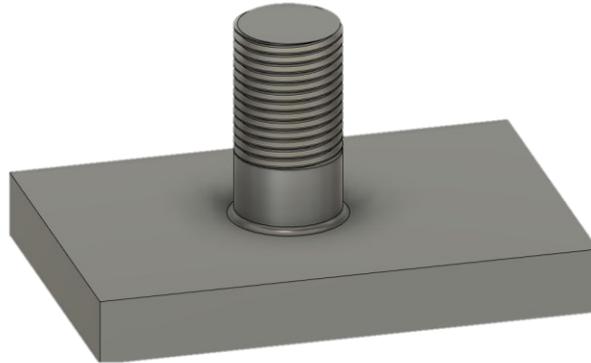


Figura 3.9 – Filettatura modellata su componente.

Come è stato detto tutti questi valori oltre che essere in funzione del tipo di materiale e di geometria da stampare, sono anche molto sensibili al tipo di macchina e al tipo di parametri scelti per la stampa. Tipicamente i produttori di queste macchine offrono oltre che le caratteristiche tecniche e di prestazione anche delle stampe di dimostrazione, simile a quelle in figura 3.10, per permettere di toccare e vedere le prestazioni della macchina nella stampa di geometrie caratteristiche.



Figura 3.10 - Stampe dimostrative.

3.3.1 Tensioni residue e concentrazione di tensioni

Le tensioni residue nei processi a letto di polvere sono il naturale risultato del tipo di processo. Infatti, la parte viene sottoposta a fortissimi gradienti termici durante la sua generazione.

Lo stress residuo può verificarsi a causa di una varietà di meccanismi, tra cui:

- Forti gradienti di temperatura durante il raffreddamento (in particolare nelle zone in cui sono presenti in grandi masse di materiale) comportano il raffreddamento più lento dell'interno della parte e più veloce sulla superficie esposta esternamente;
- Deformazioni anelastiche;
- Cambiamenti strutturali (trasformazione di fase);
- Il calore del laser può causare un'espansione localizzata che viene assorbita dal metallo fuso o da sezioni del pezzo già solidificate. Quando il pezzo finito si raffredda, alcune zone si raffreddano e si contraggono più di altre, lasciando tensioni residue.

Infatti, alle temperature di fusione del titanio, circa 1650° , si possono registrare dei tassi di raffreddamento, anche riscaldando la camera alle massime temperature raggiungibili, nell'ordine di 10^4°C/s (ordine di microsecondi). Per ogni materiale la risposta microstrutturale a questo tipo di condizioni è diversa. In tutti i casi le tensioni residue nei pezzi possono essere molto dannose e portare a risultati catastrofici nei pezzi. In particolare, in questo tipo di tecniche di fabbricazione, queste possono indurre forti distorsioni nelle parti prodotte, deformazioni e delaminazioni, nei casi più gravi, quando queste tensioni superano localmente la tensione massima ammissibile si può arrivare alla rottura del componente.

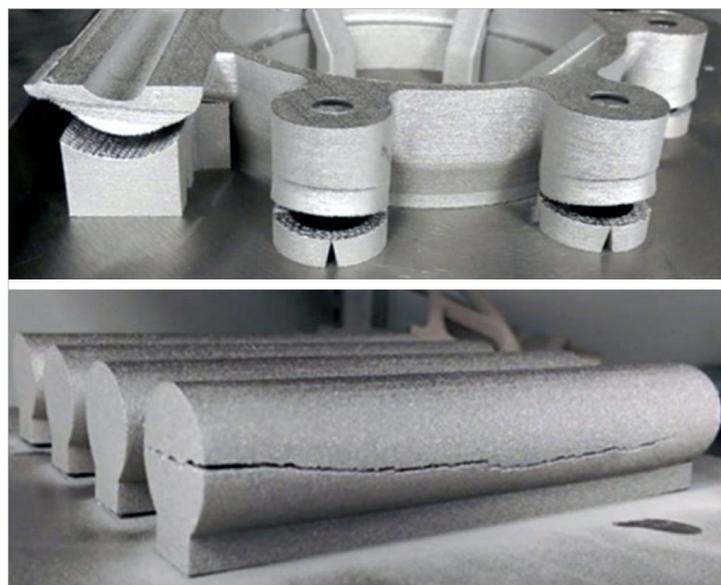


Figura 3.11 – Esempio di delaminazione e rottura [21]

Per minimizzare le tensioni residue esistono degli accorgimenti da seguire durante la produzione per AM delle parti. Infatti, tali sollecitazioni termiche sono proporzionali sia all'area della superficie fusa che al gradiente termico. Per ridurre tali tensioni è possibile:

- Garantire che la direzione di massimo sviluppo della parte sia diretta lungo l'asse Z;
- Ridurre l'area da fondere per ciascuno strato, variando l'orientamento;
- Avere più sezioni piccole risulta preferibile rispetto ad avere un'unica grande sezione;
- Assicurare una buona dissipazione di calore nella piastra di base e tramite i supporti così da mitigare la deformazione della parte (Fig 3.12);
- Variare la strategia di scansione, scegliendo quella migliore possibile per il tipo di geometria della parte e modificandola strato per strato così che gli stress residui non siano allineati sullo stesso piano.

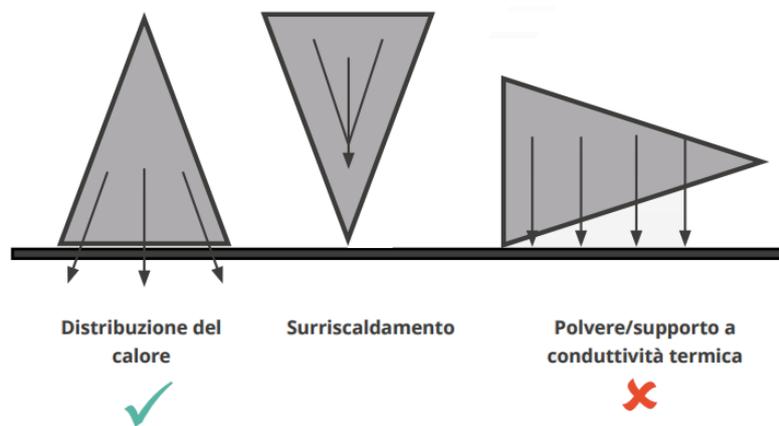


Figura 3.12 Linee guida supporti. [4]

Inoltre, è possibile gestire queste sollecitazioni termiche con una corretta progettazione di strutture di supporto. Queste, come è stato precedentemente spiegato, sono necessarie per evitare la deformazione della parte, mantenerla in posizione e allo stesso tempo ottimizzare, per quanto possibile, lo scambio termico e la diffusione del calore.

Inoltre, non è consigliato rimuovere i supporti subito dopo la costruzione della parte poiché le sollecitazioni rimangono all'interno e senza i supporti la parte continuerà a deformarsi assumendo la posizione desiderata, determinando un discostamento dalle quote nominali del pezzo. Per queste ragioni tipicamente si può pensare al riscaldamento sia del piatto di costruzione, sia della camera che anche della polvere stesse, al fine di diminuire i forti gradienti termici.

Un altro punto importante da ricordare sugli stress residui è che non sono necessariamente negativi. Possono essere desiderabili o indesiderabili. La pallinatura,

ad esempio, comporta delle sollecitazioni residue di compressione ai componenti metallici che risultano positive. Tuttavia, sollecitazioni residue involontarie o incontrollate in una struttura possono causarne il collasso prematuro.

Un'altra delle migliori soluzioni per combattere lo stress residuo, oltre quelle già citate che intervengono sul processo, è quella di intervenire sul prodotto, ovvero, cercare di eliminare il più possibile lo stress residuo dalla parte attraverso l'ottimizzazione della sua forma.

A questo riguardo esistono alcuni accorgimenti da perdere in fase di progettazione che sono relativamente semplici con lo scopo di ridurre al minimo le sollecitazioni residue. Questi includono:

- La riduzione delle aree di spessore irregolare e l'eventuale riduzione di grandi masse concentrate di materiale rispetto alle altre. Infatti, queste sono tra le principali cause di stress residuo ma facilmente evitabile con una progettazione ad hoc.
- Cercare di evitare grandi cambiamenti nella sezione trasversale. Questo può, a volte, significare dover stampare il componente con un orientamento diverso dall'orizzontale.

Inoltre, molte delle regole di progettazione per il casting convenzionale si applicano ugualmente all'AM di metallo.

Infine, con lo scopo di attenuare gli stress termici, le parti una volta stampate possono essere sottoposte a dei trattamenti termici di post processo in modo da ridurre queste tensioni. Tuttavia, una parte adeguatamente progettata per AM richiede dei minimi o addirittura nessun trattamento termico.

Allo stesso modo è utile cercare di evitare di avere zone di concentrazione di tensioni. Queste sollecitazioni si verificano sia all'interno del processo di fabbricazione additiva, sia nel trattamento termico delle parti. Le cricche da fatica iniziano quasi sempre nelle aree di concentrazione delle sollecitazioni; quindi, la rimozione delle aree in cui possono verificarsi tali difetti può minimizzare il rischio e aumentare notevolmente la resistenza a fatica della parte. Alcuni piccoli accorgimenti come raccordare tutti gli angoli acuti (riduce le concentrazioni di stress), può essere molto utile.

3.3.2 Orientamento della parte

La messa in posizione del job può risultare abbastanza complessa; infatti, non si dovrebbe progettare in AM senza prima pensare all'orientamento. Sebbene all'atto



pratico della stampa non sempre l'ingegnere o il progettista è coinvolto in questa fase, tuttavia è importante che si conosca bene il processo e le complessità in gioco. Così che se i progettisti non sono direttamente coinvolti nella stampa ad ogni modo possono avere un buon dialogo con gli operatori della macchina per garantire che le parti soddisfino le loro aspettative.

Come è stato detto, il modo in cui si posizionano le parti sulla piastra di costruzione può avere un impatto importante sul successo e sulla qualità delle parti stampate.

Il processo che va dalla fase dell'orientamento in macchina alla generazione dei supporti, delle volte può risultare soggetto a molte iterazioni. Come è mostrato nei seguenti diagrammi di processo i passaggi durante queste due fasi sono dipendenti tra di loro (Fig 3.13). Una volta modellato il componente questo dovrebbe essere modificato in accordo con l'orientamento migliore che è stato scelto. Questo orientamento a sua volta è stato determinato a valle di altre scelte come il controllo della rugosità su alcune superfici, una minore deformazione o ancora un costo più basso. Infatti, avere meno supporti si traduce in un minor numero di operazioni e costi più contenuti.

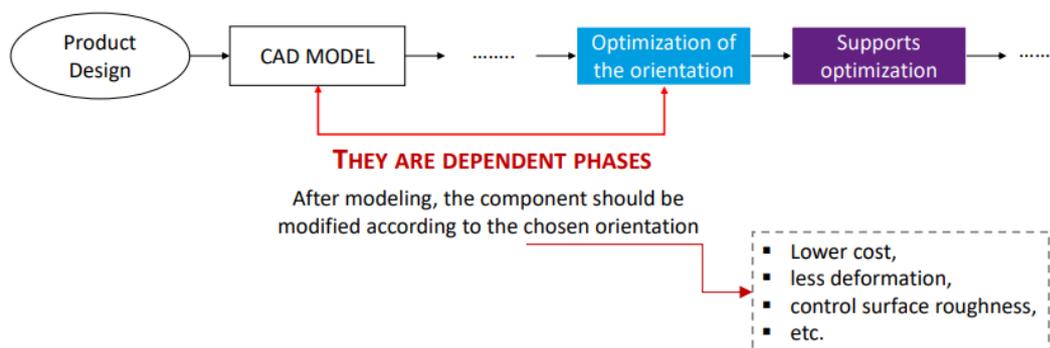


Figura 3.13 Fasi del processo di progettazione con focus alla dipendenza dell'orientamento e del design [17]

• Posizionamento in piattaforma

Una prima considerazione può essere presa riguardo al piatto (piattaforma) di stampa e al sistema di diffusione della polvere. La polvere viene stesa strato su strato con un recoater, chiamato anche lama, che può presentare alla sua estremità una spazzola morbida (spazzole in silicone o fibra di carbonio) o dura (acciaio o ceramica) o direttamente un rullo duro.

Se, durante la stesura della polvere, mentre avviene la solidificazione dello strato precedente si verifica anche solo una minima distorsione della parte, questa può esercitare una forza meccanica sulla lama. Questa può essere sufficiente per piegare

o rompere le parti a seconda che queste siano più o meno elastiche, causando un errore di costruzione e l'usura della lama.

Per ovviare a questo problema è necessario cercare di posizionare correttamente le parti sulla piattaforma di stampa, esponendo al sistema di livellamento della polvere la minor area possibile del pezzo sul piano XY, così da ridurre al minimo la quantità di forza che le parti esercitano sulla lama.

Infatti, il problema in cui si può incorrere è che la lama tocchi la parte a causa di una zona nella polvere che sporge e fa da interferenza. La principale ragione di questo fenomeno è proprio la deformazione della parte. Per evitarla è possibile:

- Progettare accuratamente i supporti della parte, così da ottimizzare lo scambio termico, ridurre il gradiente di temperatura e ridurre il raffreddamento disomogeneo;
- La piattaforma del pezzo dovrebbe essere scelta in base alla sua conduttività termica, per ottimizzare lo scambio;
- Per garantire che un job inizi correttamente, tipicamente gli strati iniziali di una stampa vengono generati su una struttura di supporto che successivamente viene rimossa tramite Wire cut EDM al termine della stampa. Tuttavia, se lo stress termico in una zona supera la resistenza del materiale, questo inizierà a deformarsi, causando infine la deformazione della parte stessa e la potenziale collisione tra la lama e la parte.
- Non posizionare le parti parallele alla lama, ma invece è necessario ruotale attorno all'asse Z per una migliore ripartizione della forza di impatto. Infatti, se la parte fosse parallela alla lama, sarebbe più difficile che questa riesca a passarci sopra in caso di deformazione. Le linee guida suggeriscono infatti di ruotare la parte da 4-5 fino a 45 gradi attorno all'asse Z in modo che la lama non passi su una parete lunga e piatta. Dato che i bordi, in particolare gli angoli di una parte, iniziano sempre a deformarsi per primi, è sempre meglio se la lama inizi su un angolo e poi sul resto della parte invece di affrontare una lunga parete piana. Ciò riduce la probabilità di un incidente (Fig. 3.14).
- Evitare di mettere le parti l'una dietro l'altra: se una parte si deforma e la lama la tocca, la costruzione potrebbe continuare anche se la lama e/o la parte sono danneggiate. Le conseguenze di una tale situazione sarebbero un deterioramento del letto di polvere proprio dietro l'area di collisione. Quindi, se possibile, quando si annidano le parti sulla piastra di costruzione, è utile lasciare un certo spazio dietro le parti lungo l'asse della lama.
- Cercare di evitare che la lama entri in contatto contemporaneamente con più parti. Spesso è sufficiente sfalsare le parti sulla piattaforma di stampa di alcuni

millimetri, per ridurre al minimo il rischio che geometrie distorte possano danneggiare il sistema della lama. Posizionare le parti più alte verso la lama per ridurre l'ingombro in Z.

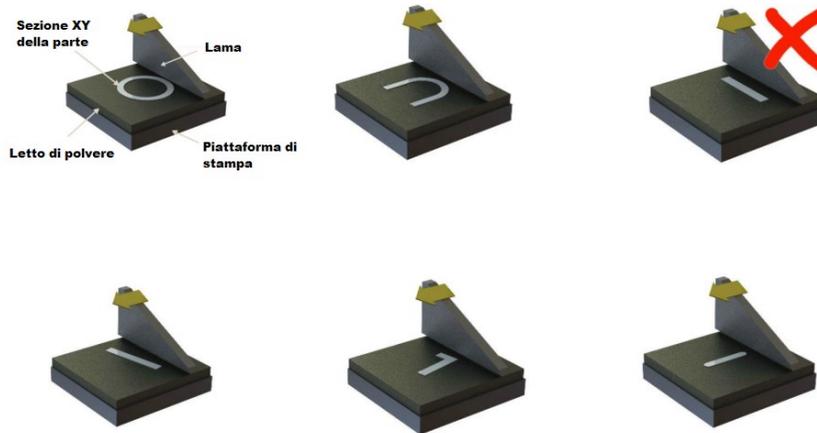


Figura 3.14 - [22]

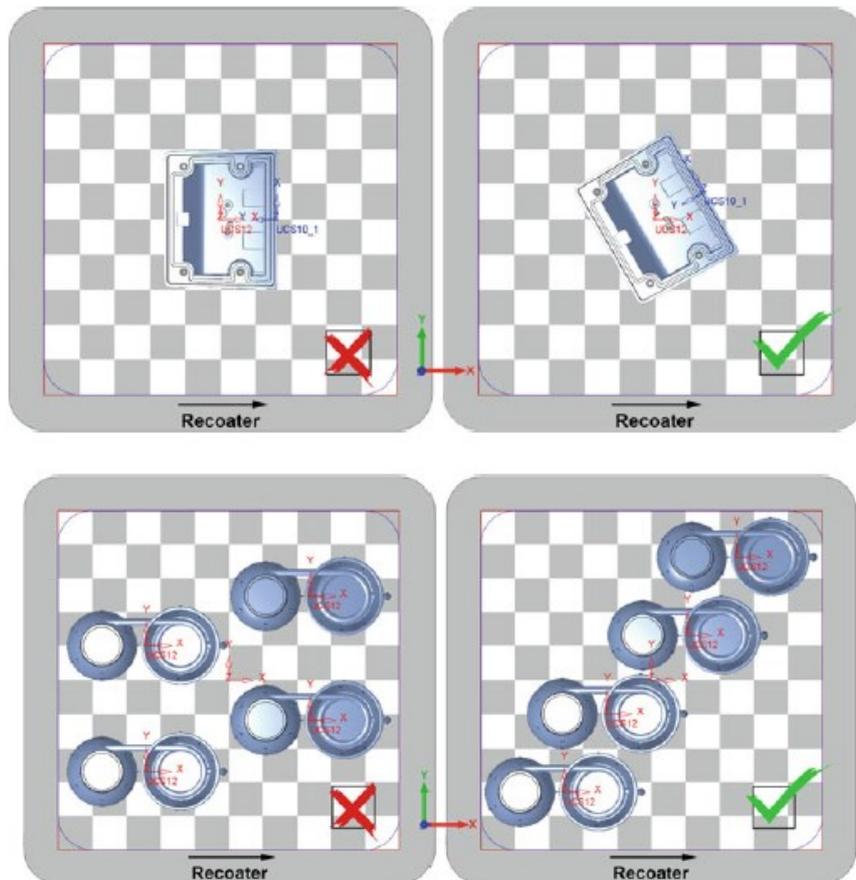


Fig. 9.42 Avoid multiple parts hitting the recoater blade at the same time

Vi sono anche molte altre considerazioni che è utile fare sull'orientamento della parte. Come è stato detto a seconda dell'obiettivo del pezzo è possibile fare più attenzione su un aspetto piuttosto che su un altro. Le parti spesso possono essere costruite con molti orientamenti diversi, idealmente la soluzione migliore sarebbe quella di avere una parte completamente auto supportante.

Se si desidera ottenere la migliore qualità superficiale del pezzo è necessario fare attenzione a tutte quelle superfici che risultano essere rivolte verso il basso. Queste, infatti, risultano essere quelle con valori di rugosità maggiori. Nel grafico riportato in Figura 3.15 è possibile vedere dei valori di rugosità media che si possono ottenere in base all'orientamento della superficie sulla piattaforma: superficie rivolta verso il basso, alto od intermedia. Per questo motivo bisognerebbe cercare di avere il maggior numero di superfici rivolte verso l'alto.

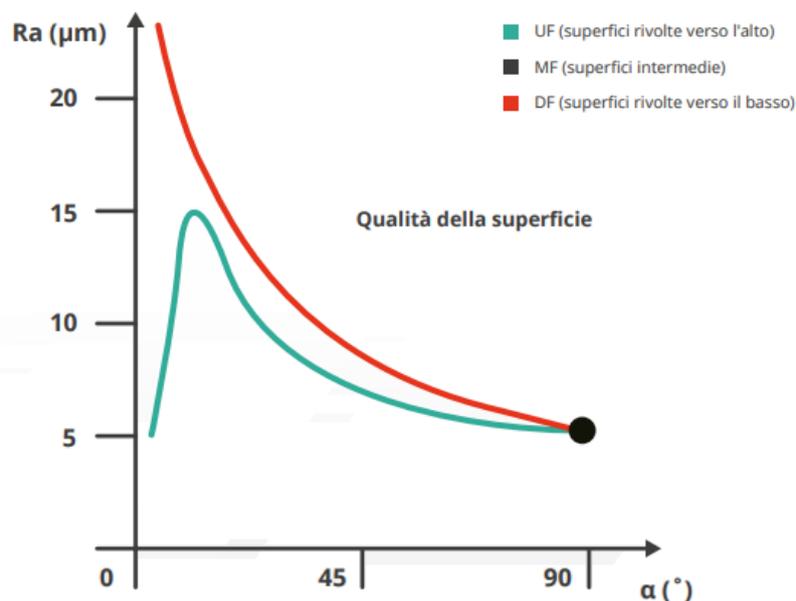


Figura 3.15 - Qualità della superficie a seconda del tipo di superficie e di angolo [23]

Come si è precedentemente spiegato è possibile stampare senza supporti solo le superfici con un certo angolo rispetto all'asse della piattaforma, sia fori che strutture a sbalzo necessitano di supporti quando non rientrano in uno dei casi descritti. Per questo motivo è possibile ruotare a piacimento il pezzo per ottenere un certo angolo con la piastra di costruzione. Solitamente si predilige che la caratteristica geometrica più grande, ad esempio un grande ponte o un grosso cilindro venga orientato nel miglior modo possibile per la sua generazione (ad esempio: l'asse del cilindro parallela all'asse di costruzione).

Tuttavia, è necessario trovare un compromesso se la struttura presenta tante zone che non risulterebbero auto supportante. Per questo motivo è opportuno valutare il maggior numero di soluzioni diverse di orientamento del pezzo, attraverso software

dedicati durante il processo di design, scegliendo quale tra quelli studiati è quello più promettente.

Perciò è facile intuire a valle di tutte queste considerazioni, come le parti che presentano geometrie molto complesse spesso non sono semplici da orientare. Solitamente bisogna scendere a dei compromessi tra:

- Dettagli;
- tempi di stampa (un'altezza z maggiore si traduce in più layer e quindi più tempo di stampa);
- costi;
- strutture di supporto;
- qualità superficiale.

3.3.3 Strutture di supporto

Le strutture di supporto sono parti necessarie per moltissimi processi di FA, in particolare quelli metalli. La loro progettazione, scelta e posizionamento non è semplice né scontata. Queste strutture sono necessarie anche se generalmente indesiderate. Infatti, la progettazione dei supporti causa dei tempi maggiori sia di produzione che di progettazione, inoltre aumenta la quantità di materiale che dovrà poi essere rimossa, ed aggiunge dei vincoli allo sviluppo della parte.

Come è stato già evidenziato nei paragrafi precedenti, le strutture di supporto sono necessarie per varie ragioni. Per i processi di fusione a letto di polvere, lo scopo principale della struttura di supporto è contrastare e contenere gli stress termici residui generati durante i processi di fusione e solidificazione. Inoltre, le strutture di supporto sono necessarie per ridurre la formazione di materiale di scarto, linee di deformazione e di ritiro, figura 3.16 e ottimizzano la distribuzione di calore e ancorano la parte sul piatto di stampa.

Per quanto riguarda la tecnologia L-PBF, secondo le linee guida, per avere strutture autoportanti, le sporgenze devono avere degli angoli rispetto alla normale almeno compresi tra un certo range di valori come mostrato sopra, in funzione soprattutto del materiale da stampare.

Tipicamente questi supporti vengono generati in modo per lo più automatico da software dedicati e successivamente devono essere opportunamente controllati e riposizionati, sia per ottimizzare il processo di stampa e sia per facilitarne la rimozione.





Figura 3.16 Uso di una struttura di supporto per una sporgenza. [4]

Ad oggi sono disponibili diversi software per la generazione delle strutture di supporto ed esistono varie tipologie di queste, ad esempio: (vedi figura3.17):

- il supporto punto;
- il supporto web;
- il supporto linea;
- il supporto blocco;
- il supporto contorno

Type	3D view	Plan view	Type	3D view	Plan view
Block			Contour		
Line			Gusset		
Point			Volume		
Web			Cones		

Figura 3.17 – Tipiche geometrie di supporto [24]

Quindi il contatto tra le strutture di supporto e le parti può essere un punto, una linea o una area a seconda della necessità, del materiale e della forza che deve garantire il supporto. È da considerare che un supporto con una forza più bassa avrà una minore

capacità di fissare la parte, condurre il calore e prevenire le deformazioni ma consentirà una più facile rimozione durante le operazioni di post-processo. La difficoltà della rimozione successiva dei supporti incide fortemente sulla parte e quindi sulle decisioni che si assumono durante la progettazione di un componente. Per le geometrie di supporto mostrate, esistono alcune linee guida generali. Ad esempio, il supporto a blocco viene solitamente utilizzato per le zone piene, mentre i supporti punto e linea vengono utilizzati per le zone più piccole. Un esempio dell'utilizzo di diverse strutture di supporto è mostrato in figura 3.18.



Figura 3.18 Esempio di utilizzo di strutture di supporto in pezzi metallici [21]

Tuttavia, ad oggi si dispone di un ridotto supporto decisionale per la progettazione dettagliata di queste strutture, come la spaziatura dei supporti e l'area di contatto, e i processi di progettazione sono ancora in gran parte basati sulle esperienze personali e i know-how dei progettisti. In molti casi, per garantire il successo della fabbricazione, le strutture di supporto sono spesso sovra dimensionate, il che spesso si traduce in sforzi significativi per la rimozione del supporto e trasforma questo processo in un lavoro artigianale, lungo e complesso.

Ad esempio, le strutture di supporto illustrate possono richiedere una serie di operazioni manuali per poterle rimuovere come taglio, levigatura e lucidatura per soddisfare le specifiche dell'uso finale del componente.

L'obiettivo è quello di ottimizzare i parametri di processo al meglio, così come la geometria dei supporti per ottenere strutture più snelle ed efficaci possibili, sia in termini di funzionalità che successivamente di praticità nelle operazioni di rimozione.

Questi supporti vengono principalmente creati durante la preparazione della parte in software dedicati e possono essere progettati e modificati con una certa libertà; tuttavia, ad ogni cambiamento della geometria del pezzo o dell'orientamento in macchina questi devono essere ricreati.

Anche il loro posizionamento è complesso poiché questi dovrebbero essere sempre stampati con l'obiettivo di minimizzare i tempi di costruzione del pezzo e i costi di post processo. Dei posizionamenti tipici sono mostrati in figura 3.19, come è stato detto non c'è una soluzione categoricamente migliore di un'altra, sta al progettista ogni volta valutare quale sia la più adatta. Nella figura sono proposti 3 posizionamenti di supporti:

- Supporto semplice sulla sinistra, riempimento della zona da supportare con uno delle tipologie di supporto, rimozione successiva per taglio o lavorazione in macchina;
- Supporto ad albero al centro, permettono di ottimizzare la funzionalità riducendo il numero di strutture necessarie;
- supporto esterno, questo spesso è necessario e conveniente per facilitare le operazioni di rimozione o in geometrie molto complesse. Permette delle volte di essere rimosso con meno lavorazioni aumentando la finitura superficiale della zona di appoggio.

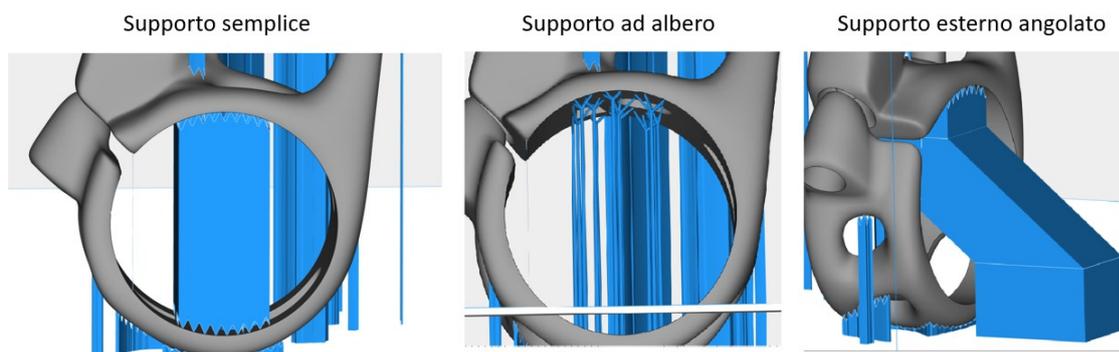


Figura 3.19 Tipologie di posizionamento di supporti.

Per dare un'idea delle alternative progettuali, in figura 3.19 è mostrata la zona che necessiterebbe di supporti e due eventuali soluzioni per lo stesso problema. Nella prima opzione i supporti vengono eliminati modificando la forma della parte rendendola auto supportante; nella seconda soluzione i supporti vengono eliminati creando una forma ottimizzata riducendo la massa.

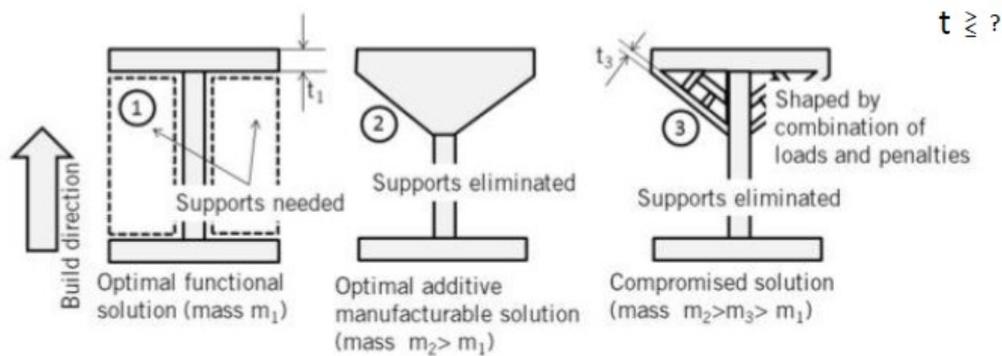


Figura 3.20 – Esempio progettazione supporti [19]

La letteratura che c'è dietro alla pratica della progettazione dei supporti, tuttavia, non è oggetto di questo lavoro. Infatti, in questa sede si vuole offrire solo una panoramica di questo aspetto e delle tipologie di supporti che attualmente vengono usate, per dare un'idea della complessità che sta dietro a questo processo.

Proprio a causa della complessità nella generazione e successiva rimozione dei supporti l'obiettivo sarebbe quello di ridurre, dove possibile, il numero di questi ultimi, aggiustando per esempio l'orientamento della parte come è stato spiegato precedentemente. Avere meno supporti si traduce in una più semplice e veloce rimozione di questi dalle superfici del pezzo. Inoltre, è indispensabile delle volte evitare l'uso di strutture di supporto in canali interni che devono essere liberi e passanti. Quindi vanno evitati in tutte quelle zone in cui non è possibile l'accesso o la visibilità per la rimozione di queste.

Nel tentativo di migliorare ulteriormente l'efficienza di queste strutture e facilitare la rimozione, una tendenza emergente è quella di applicare strutture cellulari nelle zone di supporto, queste vengono anche chiamate strutture di supporto lattice.

Le strutture lattice presentano numerosi vantaggi grazie alla loro ampia superficie, massa ridotta, struttura ripetuta regolare e complessa ed interconnessa.

Tali strutture possono generalmente essere catalogate in base alla loro topologia o al tipo di comportamento e risposta alle azioni meccaniche come flessione o allungamento.

Negli ultimi anni anche grazie alle potenzialità offerte dalla FA è possibile stampare e quindi produrre strutture di tale complessità.

In letteratura è stata studiata un'ampia gamma di topologie ed è possibile classificarle in tre macrocategorie, vedi figura 3.21:

- a) Struct-based lattice
- b) Skeletal-TPMS based lattice

c) Sheet-TPMS based lattice

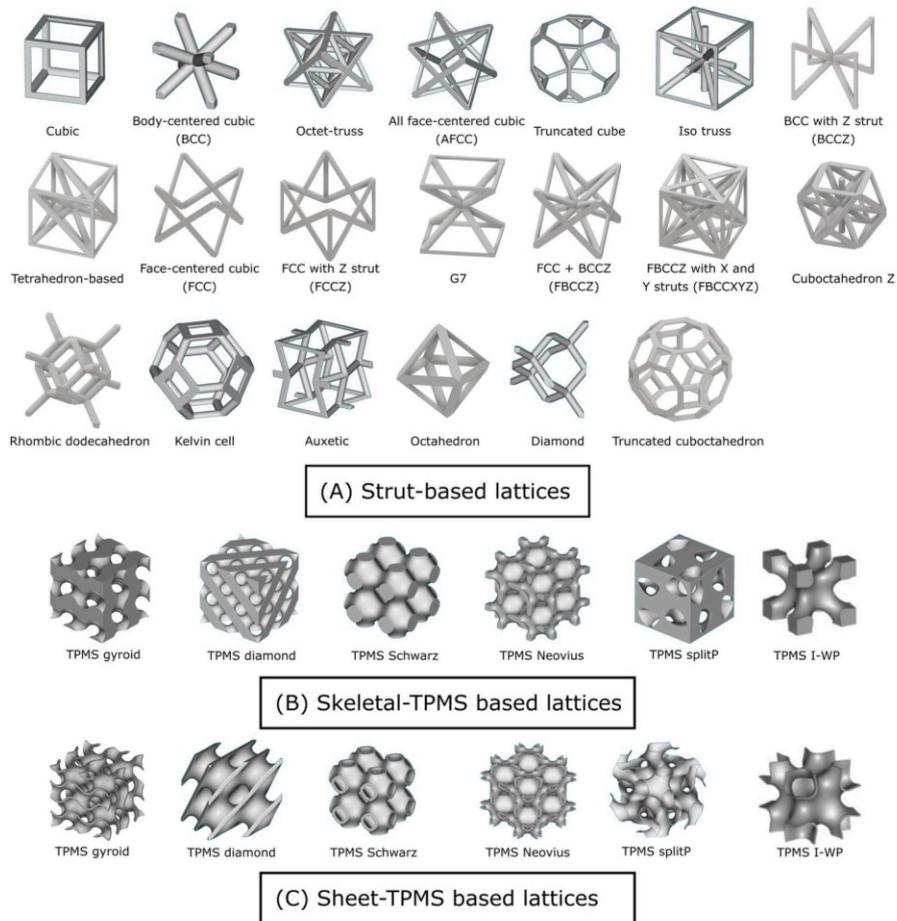


Figura 3.21 – Classificaione strutture lattice [25]

• **Strutture lattice - Strut-based**

Le più comuni topologie di questo tipo di struttura cellulare che sono state investigate sono ad esempio BCC, FCC o altre come BCCZ e FCCZ e prendono il loro nome dalle analoghe strutture cristalline dei metalli. Anche altre topologie esistono come quelle a diamante o ottaedriche. Queste strutture vengono spesso scelte per la loro semplicità di progettazione, inoltre anche per la loro naturale ottimizzazione topologica che massimizza l'efficienza della distribuzione di materiale e abbraccia completamente le opportunità presentate dall'AM.

A seconda della topologia, queste possono essere più efficaci nella risposta all'allungamento oppure alla flessione. Le strutture con più nodi non permettono lo sviluppo dei momenti flettenti, sono rigide e resistenti, soprattutto considerando la loro massa, mentre le strutture con meno nodi, dominate dalla flessione, sono cedevoli e si deformano in modo più coerente.

- **Strutture lattice - Triply periodic minimal surface (TPMS)**

Sono disponibili diverse strutture TPMS; quelle più studiate sono illustrate in Fig. 3.21. Dalla formulazione matematica vengono adottate due diverse strategie per creare strutture cellulari TPMS. Nella prima, le TPMS sono inspessite per creare una struttura solida nota come "Sheet TPMS"; nel secondo approccio, il volume separato dalle TPMS viene riempito per creare una struttura solida nota come TPMS "Skeleton" o "cellular". La mancanza di nodi e punti di curvatura-discontinuità garantita da queste architetture dovrebbe ridurre la concentrazione dello stress e, infine, aumentare la resistenza a fatica [26]. Le strutture a tripla periodica (TPMS), solitamente sono note anche come strutture di superficie o guidate da formula (driven formula).

Le strutture che ricadono in questa categoria come le Schoen gyroid, Schwarz diamond e Neovius sono state studiate e ad oggi si iniziano a vedere delle loro applicazioni, seppur abbastanza sperimentali.

Queste topologie sono determinate dall'uso di formule matematiche (Vedi Tabella 4) che ne definiscono i limiti superficiali tra le zone di solido e di vuoto.

Diversi parametri così come la periodicità di queste formule e la densità relativa possono essere modificate per mettere a punto le proprietà meccaniche di queste strutture.

Tabella 4 - Di seguito è riportata la tabella dei TPMS standard disponibili come celle unitarie con le relative equazioni.

Tipo	Equazione
Gyroid	$\sin(x) \cos(y) + \sin(y) \cos(z) + \sin(z) \cos(x)$
Schwarz	$\cos(x) + \cos(y) + \cos(z)$
Diamond	$\sin(x) * \sin(y) * \sin(z) + \sin(x) * \cos(y) * \cos(z) + \cos(x) * \sin(y) * \cos(z) + \cos(x) * \cos(y) * \sin(z)$
Neovius	$3 * (\cos(x) + \cos(y) + \cos(z)) + 4 * \cos(x) * \cos(y) * \cos(z)$

Le Periodicità di queste strutture sono definite dai valori di k (k_x, k_y, k_z) che è calcolata usando l'equazione 1, (vedi figura 3.7)

$$k_i = 2\pi \frac{n_i}{L_i}$$

Con $i=x,y,z$

Dove n_i è il numero delle ripetizioni della cella nelle direzioni x,y e z , mentre L_i è la dimensione assoluta della struttura in quella direzione, un'altra variabile può essere introdotta per alterare la densità relativa.



Le strutture TPMS hanno potenziali vantaggi in termini di processabilità, i limiti delle tecnologie SLM sugli angoli di inclinazione che si possono avere nelle strutture di supporti strct-based possono essere evitate poiché nelle strutture TPMS.

Infatti, l'angolo di inclinazione delle superfici (TPMS) può cambiare continuamente migliorando la stampabilità, grazie quindi alla curvatura tridimensionale delle loro superfici, (vedi figura 3.6).

Tuttavia, le potenzialità e la comparazione di queste strutture con quelle precedenti rimane ancora un'area che necessita ancora di grandi ricerche.

Sebbene la producibilità rimanga ancora problematica per i sistemi a letto di polvere a causa della necessità della rimozione della polvere, questo tipo di struttura cellulare (lattice) di superficie, è stata ampiamente testata e si è dimostrata avere una resistenza e rigidità superiore ad altre soluzioni presentando, tuttavia, una densità di volume molto basso.

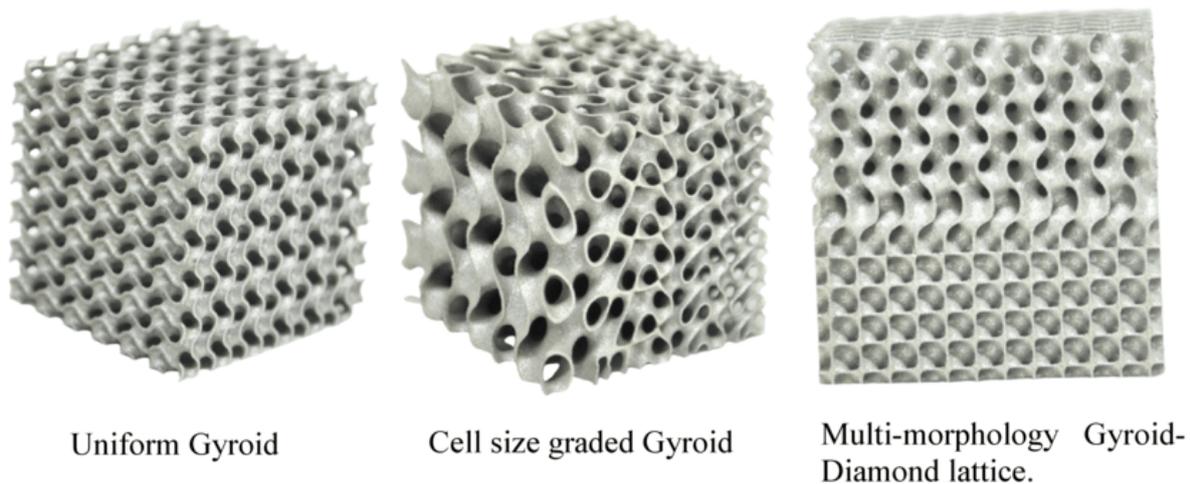


Figura 3.22

Negli ultimi anni si è dimostrato che la geometria particolare di queste strutture è estremamente adatta per la rimozione della polvere quando il reticolo ha frazioni di volume molto basse, inferiori al 10%. Questa possiede inoltre una resistenza strutturale, che la rende molto adatta come supporto fisso permanente per complesse geometrie interne con sezioni a sbalzo. Queste caratteristiche sono infatti adatte per l'uso nella tecnica SLM per risparmiare materiale ed energia, riducendo al contempo tempi e costi di costruzione.

Il design della struttura giroscopica, ad esempio, consente una migliore stampabilità a una frazione di volume inferiore grazie ai suoi puntoni, che sono più spessi e più aperti rispetto ai puntoni più sottili e ravvicinati delle strutture a diamante.

La dimensione della cella unitaria della struttura reticolare influenza anche il tempo di scansione di ciascuno dei tipi di struttura di supporto reticolare. Per capire perché le dimensioni delle celle più piccole richiedono più tempo per essere costruite rispetto alle celle più grandi quando le frazioni di volume sono invariate, è importante comprendere la strategia di scansione laser, figura 3.23. Questo, infatti, è un fattore molto importante quando si tratta di stampare strutture di supporto lattice. Come mostrato in Fig. 3.23(c), il raggio laser scansiona dapprima il contorno (confine esterno) della struttura reticolare; questo è seguito dalla scansione della cartella di materiale interno. Con questa strategia di scansione, anche se il tempo di tratteggio non cambia quando la frazione di volume è fissa, il tempo di scansione del contorno viene aumentato quando si utilizzano celle di dimensioni piccole. Questo perché la dimensione della cella più piccola significa più puntoni per unità di volume, il che si traduce in molti contorni che devono essere scansionati dal laser come mostrato in Fig. 8 (a-d)

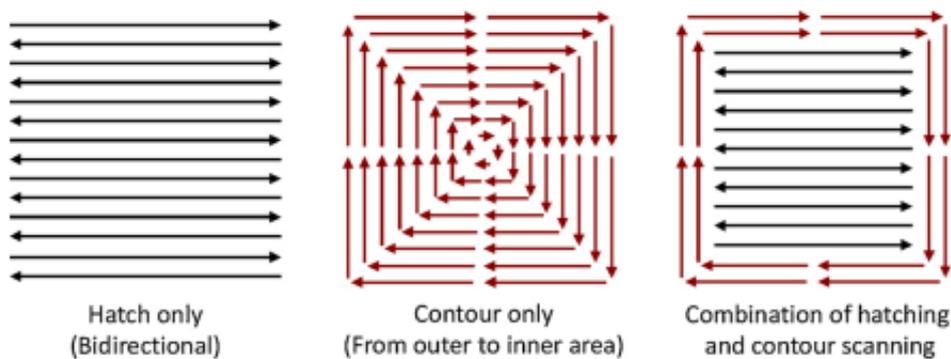
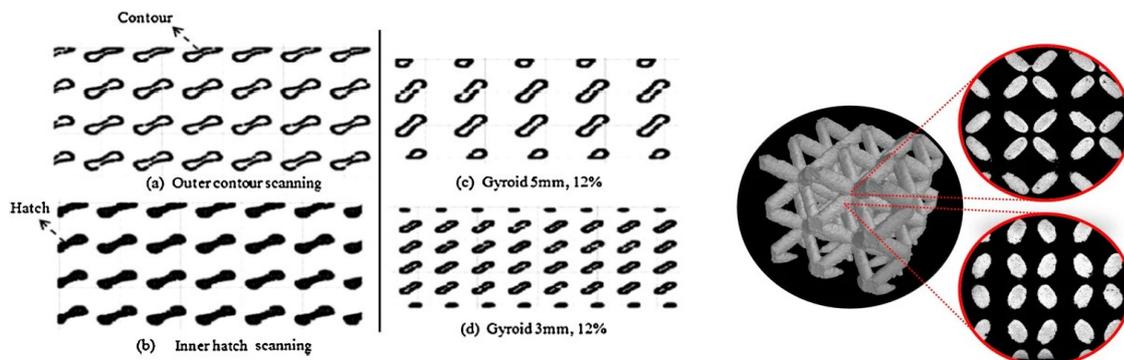


Figura 3.23 [27]



Le strutture di supporto shell lattice con dimensioni di celle abbastanza grandi facilitano i processi di rimozione della polvere; quindi, risultano essere adatti a questo

scopo, sebbene attualmente non sia disponibile alcuna teoria per guidare la selezione di queste geometrie. Esistono infatti ad oggi tante attività di ricerca su questo fronte e grandi esperienze e Know – how che le aziende che operano nel settore hanno appreso negli ultimi anni e che hanno permesso una grossa evoluzione e apprendimento di queste nuove soluzioni.

Sulla base della tradizionale teoria sulla progettazione di queste strutture lattice, le proprietà meccaniche dei supporti possono essere controllate principalmente tramite la variazione della densità relativa, che a loro volta può essere realizzata in modo piuttosto semplice tramite la modifica dello spessore della parete o delle dimensioni delle celle dell'unità cellulare.

Tipicamente le valutazioni, validazioni e le ottimizzazioni di questi tipi particolari di strutture vengono eseguite su base sperimentale per determinare quelle che abbiano un'adeguata resistenza. Infatti, i metodi numerici potrebbero potenzialmente soffrire dei carichi computazionali troppo elevati per gestire queste modellazioni. (Analogamente alle tradizionali strutture di supporto, l'efficacia di queste è significativamente influenzata dal numero di punti di contatto con le parti da supportare.)

3.3.4 Post lavorazioni alle macchine utensili

Le parti stampate in metallo per AM, in generale possono avere una finitura superficiale ruvida sulla zona che si trova sulle superfici inferiori del pezzo e le eventuali aree di interfaccia con le strutture di supporto.

Mentre le superfici superiori possono avere una rugosità migliore e mostrare le tracce lasciate dalle diverse strategie di scansione laser. Tuttavia, queste superfici devono spesso essere rilavorate mediante lappatura, burattatura etc.

Ogni volta che sono necessarie finiture superficiali migliori di quelle fornite direttamente dal sistema di FA è necessaria una rilavorazione alle macchine utensili. Ad esempio, nei casi in cui bisogna garantire un accoppiamento o una sede di una guarnizione o il montaggio di un cuscinetto. La lavorazione di una parte AM non è diversa dalla lavorazione di qualsiasi altra parte metallica. La parte viene opportunamente bloccata e lavorata utilizzando le stesse velocità e avanzamenti della tecnologia tradizionale.

Per queste ragioni bisogna tenere in considerazione alcuni accorgimenti da condurre durante la progettazione di un pezzo per AM:

- L'aggiunta di una certa quota di materiale extra sulle superfici che richiedono lavorazioni successive (sovrametallo). Tipicamente sono sufficienti circa 0,5 mm di materiale in più, ma questo valore può cambiare fortemente in base al



materiale, specifiche progettuali e accordi con il reparto tecnico che esegue le lavorazioni.

- Pensare a delle geometrie o punti di presa nella parte per rendere il montaggio nella macchina CNC molto più veloce. Spesso, ciò che richiede più tempo in questa operazione secondaria, è il bloccaggio del pezzo in CNC. Quindi, l'ideale sarebbe progettare appositamente una feature che possa rendere la parte più veloce da montare nella macchina CNC e permetta di impostare l'origine della macchina. Questo ridurrà il tempo necessario per l'operazione complessiva.
- Se è possibile cercare di mettere le strutture di supporto nelle superfici in cui è necessaria la migliore finitura superficiale, poiché queste superfici sono quelle che probabilmente dovranno essere comunque rilavorate.

3.3.5 Tipiche operazioni di post processo

Le tipiche operazioni di post processo possono essere riassunte come segue e verranno riprese in particolare nel capitolo dedicato alla riprogettazione del componente oggetto di questa tesi.

- Rimozione della parte dalla piattaforma di lavoro;
- Rimozione del materiale in eccesso (pulizia).
- Finitura superficiale.
- Trattamenti termici.
- Ispezione.

Le operazioni successive alla stampa, come i trattamenti termici (HT), possono essere utilizzate per migliorare le proprietà o le prestazioni dei componenti (as build). La rimozione e la pulizia della polvere possono essere seguite da operazioni di finitura superficiale come pallinatura, lucidatura o rivestimento che vedremo nei capitoli successivi in merito al ciclo di lavoro che si è seguito per ottenere il componente in questione.



4 Caso Studio – Riprogettazione del componente

Il lavoro svolto in questa tesi è la descrizione della produzione di un componente idraulico attraverso la fabbricazione additiva, dalla fase di acquisizione del progetto da parte dell'azienda in cui ho svolto l'attività di tesista fino alla consegna del pezzo al cliente. In questo modo sarà possibile affrontare e descrivere nel dettaglio tutte le fasi in modo completo di un vero caso applicativo di progettazione in chiave additive.

Il progetto è stato affidato alla NIRI s.r.l da parte di una nota azienda che opera tra molti dei principali settori industriali, in particolare nel campo dell'idraulica. La richiesta da parte della azienda era la possibilità di sfruttare le potenzialità delle tecnologie additive per produrre un intero blocco oleodinamico, ottimizzandone il numero di condotti. La novità di questo progetto è sicuramente l'applicazione, che come già anticipato nei capitoli precedenti, risulta essere ancora agli esordi per il mondo della fabbricazione additiva. Infatti, questo lavoro, insieme ad altri, pone delle basi per una futura crescita di questo tipo di applicazioni grazie ai vantaggi che è stato possibile sfruttare nonostante i limiti imposti per la progettazione.

Di seguito verrà descritto il componente originale e tutte le fasi della progettazione fino al collaudo in azienda.

4.1 Descrizione del componente originale

Il componente di cui si tratta è un blocco idraulico, a volte chiamato manifold idraulico (o blocco oleodinamico) (figura 4.1), è un componente che regola il flusso del fluido tra attuatori, pompe, valvole e altri componenti all'interno di un sistema idraulico. Il flusso del fluido in pressione è controllato da valvole idrauliche e diretto a un dispositivo funzionante come un cilindro idraulico o un motore. Le principali applicazioni che utilizzano questi blocchi includono: macchinari per l'edilizia pesante, macchine utensili, attrezzature per la produzione e la movimentazione dei materiali, macchinari marini, lavorazione degli alimenti e macchinari fuori-strada, attrezzature nel settore petrolifero e aziende agricole. In termini di funzionalità è simile a un quadro di un circuito elettrico in quanto consente all'operatore di controllare il fluido tra le diverse parti di una macchina idraulica.

I materiali con cui comunemente sono costruiti i blocchi oleodinamici possono variare in base alle pressioni in gioco.

- L'alluminio è impiegato per circuiti in bassa pressione, ad esempio collettori di scarico e circuiti di filtrazione e raffreddamento dell'olio, fino a pressioni di 20

Mpa. Questo è leggero e relativamente facile da lavorare, inoltre è facilmente disponibile in blocchi monolitici di dimensioni che si adattano bene alla stragrande maggioranza delle applicazioni.

- L'acciaio e la ghisa, invece, sono impiegati per costruire blocchi oleodinamici adatti alle alte pressioni ed alle pressioni pulsanti.
- L'acciaio si presta molto bene a requisiti di sistemi a pressione più elevata (tipicamente 25-50 MPa). Anche questo, è relativamente facile da lavorare ed è prontamente disponibile.
- L'alluminio 7075 è uno dei materiali che meno comunemente vengono utilizzati insieme ad altri. Questo è una versione "più resistente" dell'alluminio puro che funziona bene in applicazioni a pressione più elevata in cui il peso dell'acciaio è proibitivo. È più costoso e non così facilmente disponibile, ma è comunque un'ottima alternativa.
- Inconel o Titanio sono piuttosto costosi e rari; tuttavia, utilizzabili quando l'applicazione richiede proprietà di resistenza alla corrosione estremamente buone, drastica riduzione del peso o condizioni particolari di lavoro.

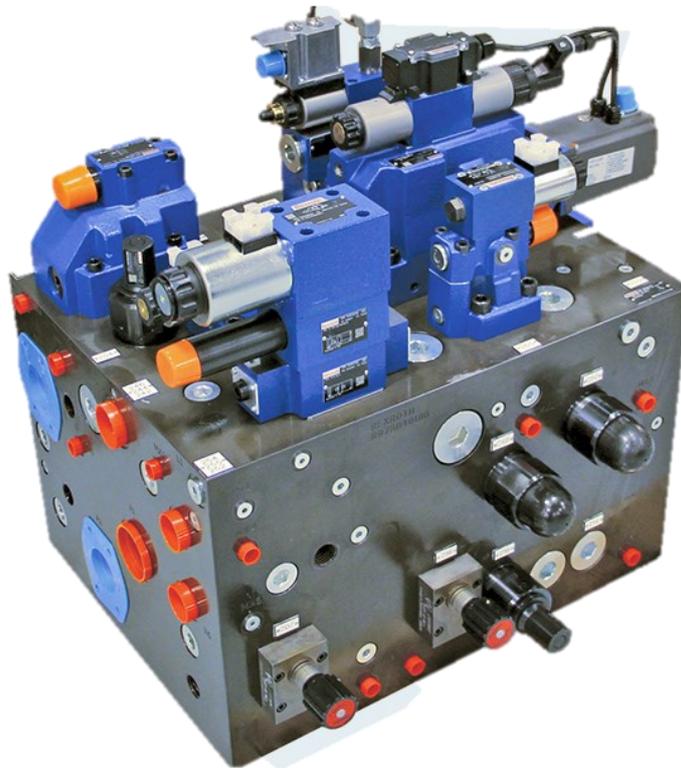


Figura 4.1 Esempio di un blocco oleodinamico. [28]

Questi blocchi vengono forati per ottenere i passaggi di flusso per i requisiti di progettazione. Questi schemi di condotti consentono inoltre di posizionare le valvole come desiderato, tuttavia, con alcune limitazioni. Infatti, i passaggi per il fluido devono

essere dritti e perpendicolari tra loro, essendo queste le uniche possibilità offerte dalle tecnologie tradizionali con le punte degli utensili.

Con la crisi energetica globale e la crescente domanda di efficienza, questi collettori stanno diventando sempre più cruciali per produttori e utenti finali.

Principalmente consente di ridurre i costi di montaggio e installazione/assemblaggio fino al 50%, inoltre permette di ridurre gli spazi, concentrando all'interno tutti i condotti per cui eventualmente sarebbero serviti molti raccordi, molti condotti e, di conseguenza, molto più spazio. In aggiunta, riducono il rischio di perdite e trafiletti d'olio nell'ambiente, infatti, non richiedono connessioni e raccordi, ossia gli elementi maggiormente soggetti a perdite.

Un altro aspetto positivo offerto dai blocchi di questo tipo è la riduzione del rischio d'errore. Infatti, in tutti quei casi in cui vengono impiegati, raccordi e/o flange per la connessione di diversi gruppi di elementi come valvole, attuatori, sensori, ecc, la possibilità da parte dell'operatore di commettere degli errori di installazione o di invertire qualche componente è molto elevata.

Tipicamente il posizionamento di tutte le valvole e collettori viene deciso inizialmente durante la fase di progettazione ed è questo il caso che si è verificato in questo progetto. Questa è sicuramente una parte molto importante da sottolineare dell'intero lavoro, in quanto non ha permesso di sfruttare a pieno le potenzialità di un eventuale riprogettazione da zero dei componenti in chiave additive. Questo avrebbe portato a risultati diversi, sicuramente più performanti e da indagare. Tuttavia, essendo ancora un'applicazione nuova i professionisti che da anni operano in questi settori in modo tradizionale non sono ancora abituati e pronti ad un passaggio del genere.

La FA per applicazioni idrauliche, come i blocchi idraulici, è una potente alternativa ai metodi di produzione tradizionali come la lavorazione sottrattiva e la fusione. Perché adattare la geometria del componente per l'AM consente un livello molto più elevato di libertà di progettazione. Permettendo di ridurre il peso e ottimizzare la forma dei canali interni per un flusso migliore e allo stesso modo permette di integrare molti più nodi di ingresso e uscita in un unico blocco.

Per capire quali sono i principali vantaggi che si potrebbero ottenere bisogna prima chiedersi quali sono i problemi e i limiti dei componenti ottenuti attraverso tecnologie tradizionali. Uno dei problemi principali dei sistemi idraulici tradizionali è che il flusso dell'olio è inefficiente.



I principali svantaggi dei blocchi idraulici prodotti tradizionalmente sono legati al fatto che ci sono molti fattori che possono determinare il guasto del componente:

- spigoli vivi nelle zone di collegamento dei canali: tra la congiunzione dei canali ottenuti per foratura si creano sbavature che non possono essere rimosse. Spesso non vengono individuati e quindi non possono essere eliminati fino a quando il blocco non è in funzione (vedi figura 4.2).
- perdita di efficienza: L'olio scorre con una pressione che può essere facilmente superiore a centinaia di bar. Quando il fluido colpisce le aree di connessione tra i canali, le turbolenze causano grandi perdite e inefficienze;
- perdite in canali adiacenti: più lungo è il foro, più difficile è per l'utensile andare dritto. Il trapano, ad un certo punto, inizia ad andare in instabilità elastica, questo viene amplificato alle alte velocità di rotazione. Il pericolo è che se il blocco idraulico è compatto, con spessori di parete ridotti, allora si possono verificare perdite nei canali adiacenti. Inoltre, l'alta pressione del flusso d'olio può facilmente causare abrasioni e perdite;
- OEE (Overall Equipment Effectiveness) delle apparecchiature è ridotto: Se il blocco idraulico si guasta, è necessario ordinarne uno nuovo. Il tempo di attesa porta ad un fermo macchina.

Una riprogettazione del blocco idraulico per la FA può portare a migliorare l'efficienza del flusso ed a dei vantaggi diretti per i clienti che ne fanno uso. Questi possono essere:

- Una significativa riduzione del peso, questo porta a costi di materiale inferiori. Un effetto secondario ma ugualmente positivo è che un blocco idraulico leggero migliora anche la maneggevolezza per l'operatore.
- Nessun spazio morto dove si raccoglie lo sporco: Il design del canale dell'olio non include angoli morti o acuti dovuti alle operazioni di fresatura. Pertanto, non ci sono nemmeno aree in cui si possono raccogliere residui. Questo può causare problemi di funzionamento che porterebbero a danni alle valvole, ecc.
- Efficienza del flusso migliorata: I fori orizzontali non sono più necessari, l'olio può scorrere con altri angoli e non è disturbato da spigoli o altre geometrie poco efficienti.
- È possibile ottenere una migliore efficienza energetica e affidabilità: Con blocchi idraulici più complessi, è possibile regolare le lunghezze dei canali dell'olio tra loro. Più lungo è un canale dell'olio, maggiore è l'attrito e le perdite sulla parete. Inoltre, anche i blocchi più complessi permettono di ospitare fino



ad un numero massimo di canali e sedi per le valvole. Infatti, per soddisfare configurazioni più complesse sono richiesti più blocchi di dimensioni più grandi.

- Le tecniche di FA consentono di risparmiare spazio e gli spessori delle pareti possono essere regolati secondo necessità e in modo parametrico.
- Iterazioni di progettazione più rapide e nessun costo di attrezzatura: L'AM offre agli utenti più tempo per le decisioni di progettazione dell'ultimo minuto ed una maggiore flessibilità. Infatti, con la FA è possibile apportare modifiche al design in qualsiasi momento. Con i processi di produzione convenzionali, come la microfusione, è necessario produrre un nuovo utensile se si desidera modificare la posizione dei fori per ottimizzare il flusso dell'olio o un'altra modifica strutturale di questo genere.
- Circolarità e produzione on demand: I sistemi idraulici esistenti possono sempre essere riprogettati e ottimizzati con la produzione additiva e sono sempre pronti per la produzione.

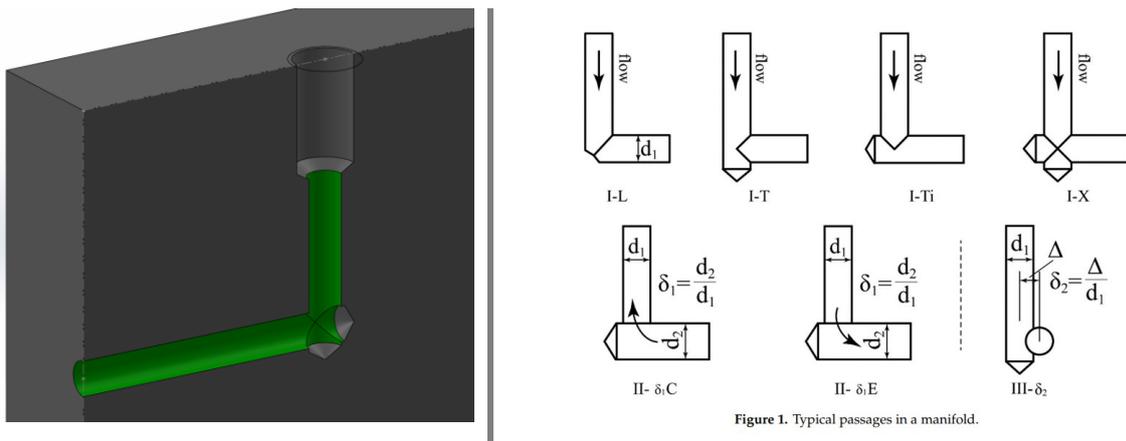


Figure 1. Typical passages in a manifold.

Figura 4.2 – Immagine qualitativa di uno possibile errore durante la fabbricazione tradizionale di questi componenti, a destra tipici passaggi di Manifold Idraulici. [29]

4.2 Analisi critica del componente originale

Grazie alle sue caratteristiche la fabbricazione additiva offre un grande potenziale per la progettazione di componenti per applicazioni fluidodinamiche.

Tuttavia, queste potenzialità nella progettazione, nella funzionalità e nella produzione non sono facilmente realizzabili.

In questa sede si propone una metodologia di sviluppo per componenti idraulici come quelli presentati nel paragrafo precedente. Cercando di porre altre basi e investigare le potenzialità di queste tecnologie in questo settore di applicazione.

In particolare, come è stato appena detto il componente in oggetto è un blocco idraulico che verrà usato in un banco prova in un assieme più complesso. In particolare, verrà usato per testare delle valvole a cartuccia.

I blocchi di questo tipo come in figura 3.1, usati in applicazioni in pressione, come è stato appena spiegato, sono tradizionalmente fabbricati da un blocco monolitico di materiale. Su questo blocco vengono successivamente ricavati gli schemi dei condotti attraverso lavorazioni alle utensili. Questi condotti sono usualmente fatti a 90° tra di loro, proprio a causa di questi limiti della tecnologia tradizionale che non permette nessuna libertà sulla geometria e percorso dei condotti. Infatti, per ottenere dei blocchi con degli schemi idraulici molto complessi sono necessari grandi e pesanti blocchi, proprio a causa della tecnologia di fabbricazione tradizionale.

Nei blocchi più complessi, dove sono presenti un maggior numero di fori e quindi necessariamente un maggior numero di punti di tenuta, questo si traduce nella necessità di utilizzare più blocchi, più grandi e quindi più pesanti.

Attraverso le potenzialità che offre l'AM riguardo alla possibilità di stampare geometrie molto complesse, questi blocchi hanno un grande margine di ottimizzazione.

Per avere un miglior quadro delle fasi con cui si è svolto il lavoro di questo particolare progetto, in figura 4.3 è possibile osservare quelle principali che compongono lavori di questo tipo nelle aziende; dalla presa in carico del progetto alla spedizione dei pezzi al cliente.

Una volta che l'azienda NIRI s.r.l è stata contattata e ha preso in carico il progetto sono avvenuti i primi contatti con il reparto tecnico della azienda di cui non si cita il nome. Con loro è stato possibile visionare le parti 2D e 3D e successivamente ottenere i file digitali. In seguito, a valle di una analisi di fattibilità, consulenza e individuazioni degli obiettivi, vincoli ecc.... è stato deciso un piano e delle scadenze periodiche di revisione.



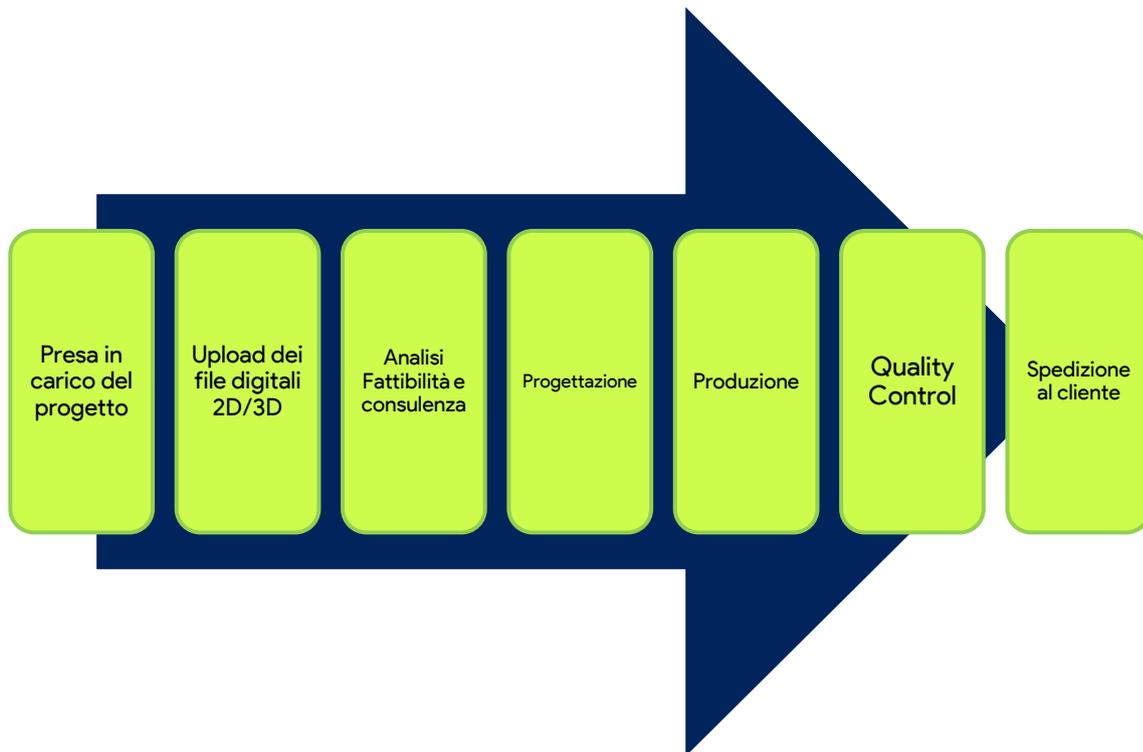


Figura 4.3 Rappresentazione del percorso con il cliente

Dai primi colloqui gli obiettivi desiderati nello svolgimento di questo progetto erano molteplici. Principalmente l'obiettivo era quello di riuscire ad avere il componente che era stato da loro progettato. Questo, tuttavia, non era stato ottimizzato per l'AM ma era stato semplicemente, volutamente complicato, con un design impossibile da ottenere con altre tecnologie tradizionali (CNC).

Tuttavia, la parte era data e solo alcune delle geometrie potevano essere cambiate. Questo è quello che spesso succede con le aziende che si stanno avvicinando per la prima volta con questa tecnologia, in tutti i settori e in tutto il mondo dell'industria. Come è stato sottolineato nel paragrafo precedente, questo è quindi il caso di AfAM in cui non è possibile sfruttare a pieno le potenzialità dell'AM proprio perché la geometria è già data, in particolare, il percorso dei canali in/out e dei fori sono fissi.

I limiti di adattare per l'AM una parte già data come questa sono principalmente:

- Necessità di supporti per tutte quelle geometrie che lo richiedono, questo si traduce in costi più elevati per la rimozione di tali strutture.
- La rimozione di materiale per ottimizzare peso e stampa riducono la rigidità e complicano la lavorazione successiva alle CNC.

Nel dettaglio i componenti da riprogettare erano due blocchi, il più piccolo Blocco 2 e il più grande Blocco 1, da assemblare insieme come mostrato in figura 4.3.

Nella figura a destra è mostrata una vista in trasparenza in modo da sottolineare le feature interne dei blocchi che verranno descritte meglio di seguito.

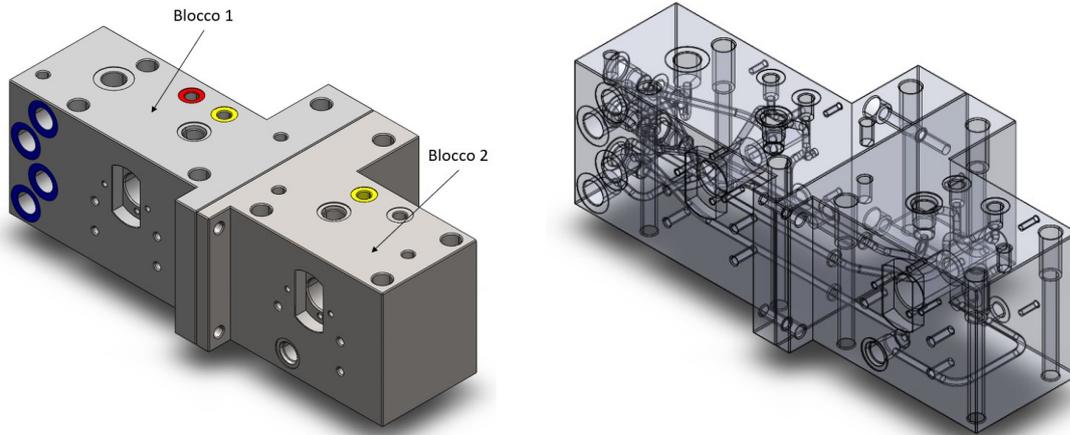


Figura 4.4 Vista dei blocchi assemblati in ambiente CAD, a destra in trasparenza.

Come è stato appena illustrato nel paragrafo precedente, questo genere di componenti sono tipicamente prodotti tramite lavorazione CNC a partire da un blocco in cui vengono praticati un gran numero di fori di collegamento. Si forma così una serie di canali di interconnessione attraverso i quali il fluido scorre verso le uscite appropriate.

Il blocco 1 originale era costituito da un componente inizialmente pensato in acciaio inossidabile 316L di dimensioni 240 mm x 206 (110) mm x 135 mm e avrebbe pesato 31 kg (in trasparenza, Fig. 4.5).

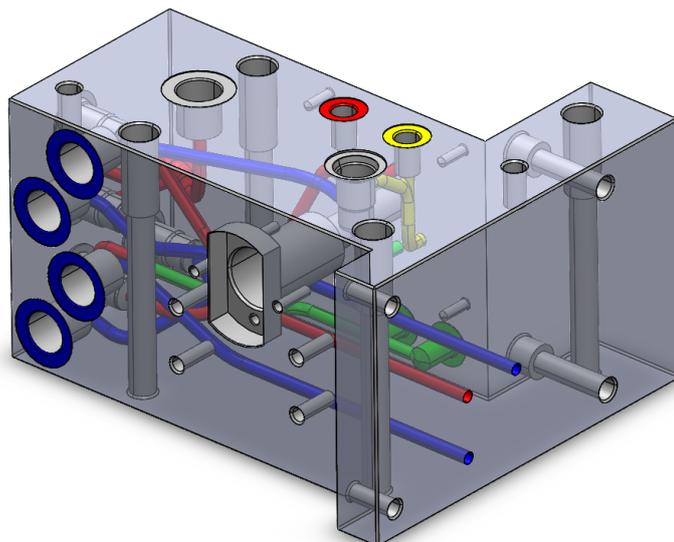


Figura 4.5 – Vista isometrica del Blocco 1 in trasparenza.

Mentre il blocco 2, più piccolo, di dimensioni 191 mm x 206 mm x 135 mm, dello stesso materiale con un peso di 25.5 kg. Complessivamente i due pezzi finiti insieme

sarebbero pesati circa 56.5 kg, e avrebbero invece avuto un peso prima delle lavorazioni alla macchina CNC superiore ai 60 kg. Vedi tabella 1 di riepilogo.

Tabella 5 - dimensioni e pesi dei due blocchi.

	Dimensione [mm]	Peso Blocco pieno [kg]	Peso Blocco Finito [kg]
Blocco 1	240x206x135	33.5	31
Blocco 2	191x206x135	27.2	25.5

Per semplicità di trattazione e spiegazione si proporrà la riprogettazione e analisi di solo uno dei due blocchi, in particolare il blocco 1 quello più grande.

L'altro blocco analogamente al primo è stato sviluppato con la medesima procedura.

Dai file 2D e dall'analisi dei CAD è stato possibile catalogare e segnare tutte le features dei due blocchi ed individuare insieme al cliente il sistema di forze in gioco, i carichi e le condizioni al contorno. Queste sono facilmente individuabili a disegno, come tutte le sedi dei fissaggi, golfari, attacchi gas e le sedi delle valvole.

Analizzando i due blocchi dal punto di vista funzionale è possibile determinare alcuni aspetti da tenere in considerazione. I blocchi devono essere collegati tra di loro con delle viti M10, le facce di interfaccia sono quelle mostrate in figura 4.4, allo stesso modo i blocchi sono fissati ad un supporto a terra attraverso delle viti M12x115 in 4 posizioni per ciascun blocco come mostrato nella stessa figura.

Le zone di interfaccia saranno probabilmente le più critiche, insieme ad altre, poiché verranno saldamente strette per evitare perdite, sviluppando una coppia di serraggio fino a 40kN per ogni bullone (classe 13.8). Mentre le 8 viti complessive che bloccano i due componenti a terra svilupperanno una coppia fino a 10-12kN indicativamente.

Le considerazioni preliminari che è possibile fare su questi due componenti sono di rilievo e verranno trattate con attenzione, vista la complessità del pezzo è necessario sottolinearle per una maggiore comprensione delle scelte fatte durante la riprogettazione.

I condotti interni del blocco hanno una geometria fissata dal cliente, da quello che si nota dai file 3D (figura 4.5) questi sono complessi e irriproducibili in CNC a causa dei percorsi che tali canali seguono. Il diametro interno dei condotti è di 6 mm, all'interno dei quali scorrerà del fluido in pressione con picchi di 200bar. Per queste ragioni, nei condotti, il fluido deve scorrere liberamente ed è necessario che questi canali siano autoportanti o che vengano supportati ma non internamente.

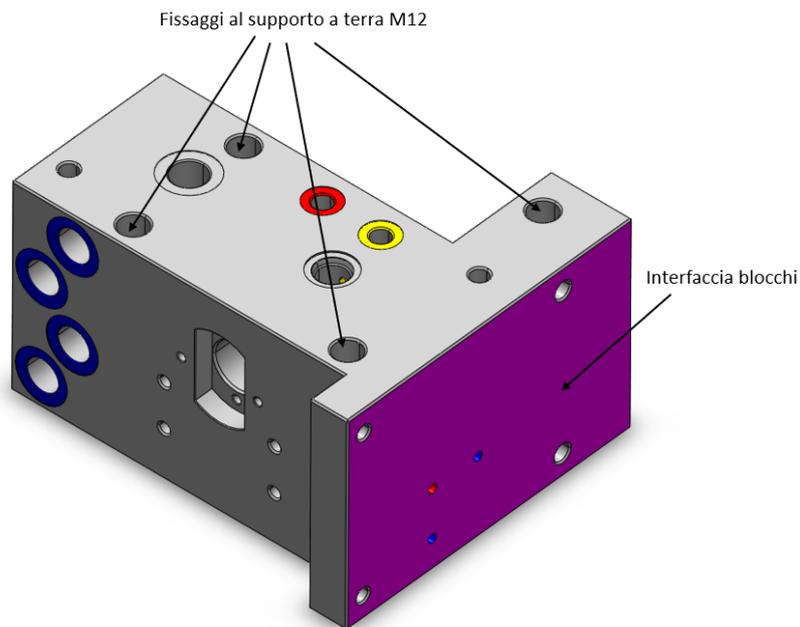


Figura 4.6 Blocco 1, indicazione dei 4 fori passanti per fissare la parte a terra e la faccia di collegamento dei due blocchi

Infatti, come è stato precedentemente illustrato nei paragrafi dedicati al DfAM la tecnologia L-PBF presenta dei limiti tecnologici. Uno di questi sono i fori, tipicamente è possibile stampare fori circolari orizzontali in metallo senza supporto per diametri inferiori a 8mm; tuttavia, questi valori dipendono dal modello della stampante, dalle geometrie specifiche, dalle strategie di costruzione, dalla esperienza e anche dal materiale per cui questo valore può essere più piccolo o più grande. Per evitare ciò è possibile modificare la forma del foro e renderla a forma di goccia, questo tipicamente è una soluzione comune in questi casi, come si vede in Figura 4.7.



Figura 4.7-Tipica soluzione a goccia.

Inoltre, questi valori differiscono ancora per i fori verticali, orizzontali o angolati. Quindi il principale vincolo riguardo i condotti è proprio quello che presentino l'interno privo di strutture di supporto e che venga preservato lo schema dei condotti per come è stato progettato dal cliente.

Un altro aspetto critico di questo componente sono i valori delle deformazioni massime ammissibili nelle sedi di attacco dei condotti e delle guarnizioni, queste devono essere contenute al minimo, nell'ordine del 1/10 mm per garantire al meglio l'azione di tenuta ed evitare perdite.

4.3 Carichi, vincoli e condizioni al contorno

Nel dettaglio il componente originale è sottoposto a diverse condizioni di carico, tipicamente è possibile procedere in diversi modi per determinarne le azioni interne in gioco. Prima di tutto è importante individuare e conoscere i carichi a cui sarà sottoposto.

Questi sono stati analizzati e determinati insieme al cliente, come le pressioni in gioco e gli eventuali carichi di compressione o trazione applicati dall'esterno sulla struttura.

Tutte queste informazioni sono di fondamentale importanza per una prima determinazione degli stati tensionali della struttura attraverso un'analisi FEM.

Come è stato detto questi componenti sono stati progettati dal cliente e l'obiettivo era quello di riuscire ad ottenere tale geometria così come era stata pensata, considerando tutti i vincoli progettuali e funzionali. Tuttavia, il compito del team di NIRI non era solo quello di riprogettare e adattare tali componenti all'AM ma anche quello di verificare la parte e scegliere il materiale migliore per l'applicazione.

Questo è un caso piuttosto singolare nello spettro delle possibilità della progettazione. Ovvero avere una geometria ben definita e data che tuttavia ancora non esiste; quindi, come se fosse una nuova parte in fase di progettazione. Perciò prima di procedere alla fase di riprogettazione dei componenti è stato necessario effettuare un'analisi agli elementi finiti.

Questa ha permesso di valutare gli stati tensionali e le deformazioni così da poter scegliere il materiale e fare le successive considerazioni.

Per preparare il modello CAD all'analisi è stato necessario assegnare un materiale di primo tentativo ai componenti, in questo caso è stato scelto come prima prova il materiale con cui solitamente vengono prodotte queste parti e quello che inizialmente era quello pensato dal cliente: AISI 316L (tabella 1, range tipici delle proprietà meccaniche).

Le principali azioni in gioco considerate in definitiva sono state le coppie di serraggio (pretensionamento) nelle sedi di fissaggio a terra e tra i due blocchi, le pressioni interne dei condotti, da quella tipica di esercizio a quella massima, e successivamente sono stati aggiunti dei carichi in accordo con le specifiche mostrate dal cliente.



Tabella 6 – Datasheet AISI 316L.

Carico di rottura Tensile strength	Carico di snervamento Yield strength	Allungamento	Durezza Hardness
R_m [Mpa]	$R_{p0.2}$ [Mpa]	A_5 [%]	HV
490-690	190-220	20-30	-

Per questa prima fase di analisi preliminare sono stati applicati i vincoli e i carichi presenti sull'assieme, si è deciso di condurre diversi Load Case ed in tutti i casi di sovrastimare le forze in gioco. In tabella 7 sono mostrati i principali carichi che agiscono, mentre nella figura 4.8 è stato mostrato uno dei load case che si è dimostrato il più critico.

In questa simulazione sono state usate delle feature particolari all'interno del software **Inspire** come i fissaggi in tutte le sedi dei bulloni abilitando il pretensionamento. Infatti, applicando un pretensionamento alle connessioni imbullonate e avvitata è possibile ottenere una maggiore compressione del comportamento di una struttura. Spesso questi precarichi hanno un'intensità significativa e possono influire sulle decisioni di progettazione.

Inoltre, è possibile studiare diverse tipologie, andando a variare il tipo di rigidità di connessione, impostando infine quella calcolata con il metodo di Huth-Schwarman: La rigidità assiale è impostata su Rigido, mentre la rigidità al taglio viene calcolata utilizzando il modulo di elasticità del materiale. Questo metodo con varie prove sperimentali e da dati analitici si è mostrato uno strumento molto efficace durante le simulazioni.

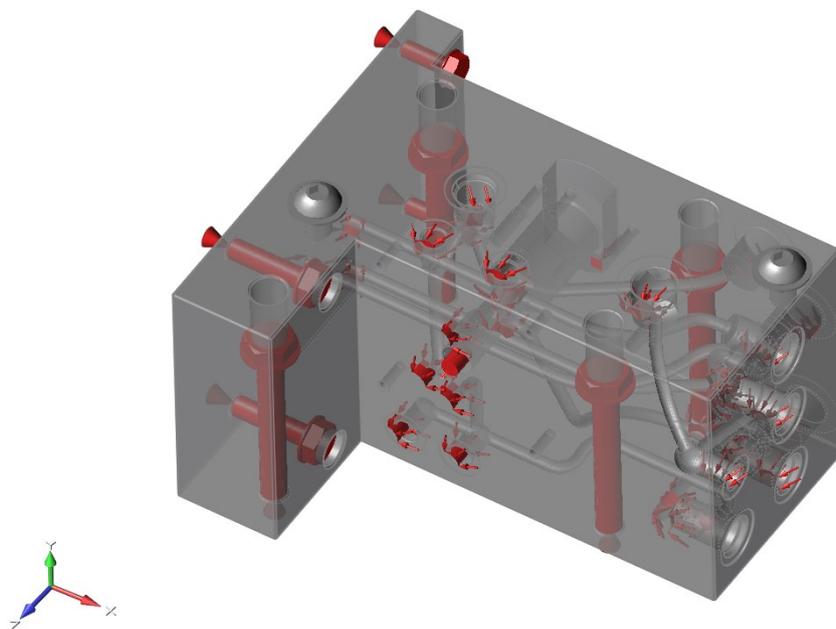


Figura 4.8 - Load case più critico.

Tabella 7 – Condizioni di Load case.

	Precarico [kN]		Pressione interna canali [Mpa]
M12	Up to 50	Pressione massima	30
M10	Up to 40	Pressione di lavoro	5
M8	Up to 20		
M6	Up to 13		

4.4 Analisi FEM preliminare

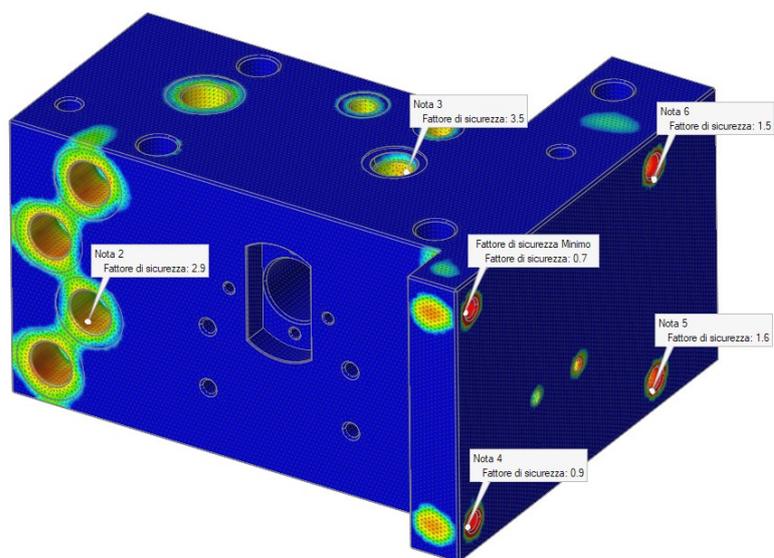
Una volta che sono stati creati e determinati i load case è possibile procedere con l'analisi. Vista la dimensione non ridotta del pezzo è stata svolta una prima analisi statica sul pezzo originale (con elementi di 5 mm) in modo da poter evidenziare le prime caratteristiche e fare le prime osservazioni sul componente in esame.

Successivamente sono state condotte diverse altre analisi con elementi di dimensione più piccola fino a 1 mm, il tipo di elemento è stato Linear Tetra 4 (primo ordine) e parabolic Tetra 10 (second'ordine) che necessita di una capacità computazionale molto alta.

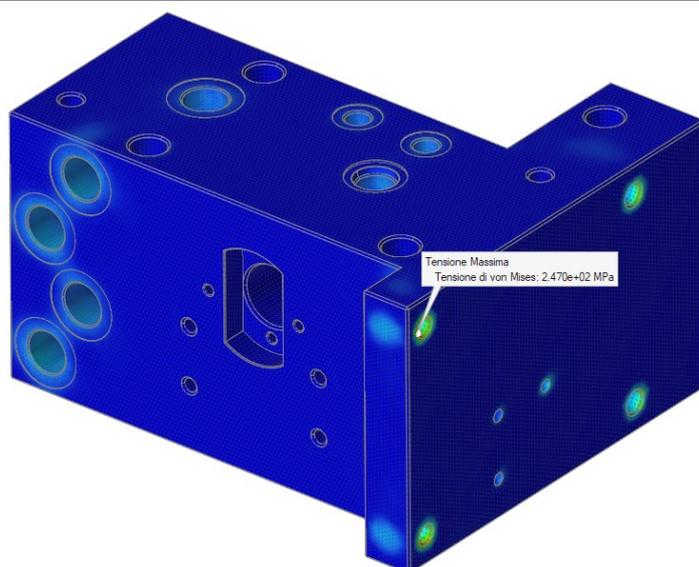
Su software come **Inspire** è possibile in maniera rapida ed estremamente efficiente preparare il modello e lanciare un'analisi di questo tipo, scegliendo elementi di second'ordine mettendo la spunta sulla ottimizzazione "più accurata". [30]

Per non complicare il modello e per non avere un carico computazionale troppo elevato e non giustificato, si è deciso di analizzare a parte che i condotti in pressione fossero verificati con coefficienti di sicurezza > 3 .

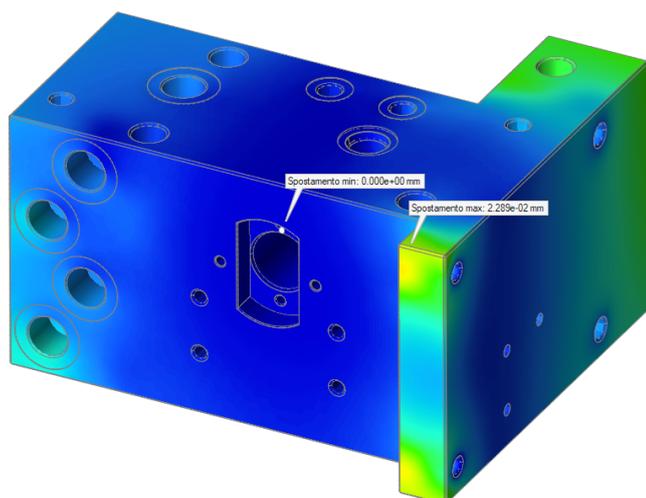
I risultati di tali analisi sono mostrati nelle figure di seguito 4.9 e 4.10, con l'aggiunta di alcuni callout è possibile anche evidenziare alcune delle zone critiche. Nella figura 4.9 sulla destra sono mostrate le tensioni di Von Mises sulla struttura, queste sono individuate nelle stesse zone in cui il coefficiente è minimo.



**Fattore di
sicurezza**



**Tensione
massima di Von
Mises**



**Spostamento
massimo**

Condizione di carico	SF Minimo	Von Mises max [Mpa]	Spostamento massimo [mm]
Result Evelope (Load case 5) – Pressione massima, serraggio viti massimo	0.7	~250	>0.05

Dall'analisi si attesta che lo spostamento massimo e il fattore di sicurezza minimo sono tali da dover passare ad un altro materiale per garantire la funzionalità e le prestazioni richieste.

- Analisi stato tensionale e deformazione massima:
 - la zona più sollecitata risulta essere l'interfaccia tra i due blocchi e la zona di accoppiamento delle viti. Riprogettando il pezzo questa zona sarà quella che richiederà maggiore attenzione per rispettare il coefficiente di sicurezza; Inoltre, bisognerà garantire lo spostamento massimo consentito nell'interfaccia tra i due blocchi dove si trova la sede di uscita dei 3 condotti in cui saranno presenti delle guarnizioni (OR), per permettere il corretto funzionamento; si nota come questo valore sia particolarmente basso poiché il blocco risulta essere pieno, e quindi molto rigido da questo punto di vista, bisognerà fare attenzione in fase di riprogettazione;
 - la zona più scarica è invece la sede dell'albero della pompa.
- Analisi fattore di sicurezza:
 - le zone più sollecitate, sono la sede delle viti di fissaggio dei due blocchi tra di loro, in cui la struttura in AISI 316L non sarebbe verificata.

Perciò a valle di queste simulazioni sul componente originale, l'AISI 316L non risulterebbe verificato nelle sedi individuate. Mentre come era immaginabile visto le forze in gioco complessivamente ridotte, la maggior parte del pezzo risulta praticamente scarico.

Tranne in alcune zone a causa di effetti di forze esterne di taglio randomiche o di quelle applicate sui due golfari per la movimentazione e trasporto del pezzo. Questo è un aspetto importante che dovrà essere tenuto in conto nella parte di riprogettazione.



Tuttavia, tenendo presente la caratteristica spiccatamente sperimentale di questo tipo di progetto e considerando che il componente risulta ancora una novità in questo settore, è stato deciso di avere come coefficiente minimo di sicurezza almeno 3 e di sovrastimare le forze in gioco.

In questo modo è stata proposta al cliente un'alternativa, ovvero il passaggio al Titanio, che sebbene comporti elevati costi sia di stampa che di successiva post elaborazione risulta l'alternativa migliore per la realizzazione dei due componenti.

Infatti, bisogna considerare che, se da una parte il titanio risulta molto più costoso dell'acciaio, questo pesa anche circa la metà, e grazie alle sue proprietà meccaniche si sposa bene con i processi L-PBF. Inoltre, permette di ottenere strutture molto più snelle con qualità superiore.

Di contro, il titanio risulta molto più difficile da lavorare alle macchine utensili e questo è un limite data la necessità di compiere molte lavorazioni una volta stampato.

Tra queste, le filettature delle viti e degli attacchi Gas che presentano tolleranze dimensionali e geometriche stringenti che verranno mostrate successivamente nel dettaglio.

Un altro aspetto di cui verrà tenuto conto nel capitolo successivo, sarà quello legato allo spessore dei canali, così da poter ridurre al minimo il peso.

4.5 Caratteristiche del materiale

Le leghe di titanio sono tra i metalli più utilizzati nel mondo dell'Additive Manufacturing, di grande interesse e largo impiego soprattutto nelle applicazioni in cui i prodotti sono caratterizzati da complessità del design e sono richieste elevate performance meccaniche, per cui le esigenze di prodotto giustificano costi produttivi elevati.

Come è stato largamente descritto nei capitoli precedenti i campi applicativi principali sono sicuramente quello aeronautico, aerospaziale e biomedicale. Il titanio è uno dei materiali con la più alta resistenza specifica e, in ottica di ottimizzazione topologica, è quello che dà il massimo dei vantaggi nella riduzione di massa complessiva e quindi è il più indicato se si desidera snellire una struttura.

Nel dettaglio le principali caratteristiche delle leghe di titanio sono:

- densità molto basse, intorno a 4.4 g/cm³ rispetto a 8 g/cm³ delle super leghe, caratteristica indispensabile in tutte quelle applicazioni dove è particolarmente ricercato una riduzione di peso;
- buona resistenza a corrosione e a creep anche ad elevate temperature;
- buona resistenza meccanica.



Il materiale scelto per la nuova ottimizzazione topologica è quindi il titanio Ti6Al4V, dal sito del produttore sono state acquisite le schede tecniche di questo materiale, queste sono state riportate in tabella 7. Come si evince dai dati il titanio rispetto all'acciaio presenta proprietà notevolmente superiori, come una resistenza ultima a rottura maggiore del 320%, il 360% in più di tensione di snervamento e allo stesso tempo presenta una buona percentuale di allungamento a rottura.

Tabella 8 Heat-treatment: 720°C/2h (Additive Industries Heat Treatment Module)

Proprietà meccaniche	Direzione	As built	Heat-treated(1)
Young's Modulus [GPa]	Z	110 ± 5	118 ± 7
	X	100 ± 5	113 ± 10
	Y	112 ± 5	113 ± 6
Yield Strength [MPa]	Z	1109 ± 55	1060 ± 46
	X	1114 ± 56	1070 ± 25
	Y	1153 ± 65	1083 ± 64
Ultimate Tensile Strength [MPa]	Z	1212 ± 30	1120 ± 10
	X	1246 ± 10	1125 ± 5
	Y	1280 ± 22	1150 ± 10
Elongation at Break [%]	Z	9 ± 1	11 ± 2
	X	8 ± 1	10 ± 2
	Y	9 ± 1	9 ± 3

Come è possibile vedere dal datasheet del titanio questo mostra tra i più alti valori delle proprietà meccaniche. Infatti, come da figura 4.9, il titanio prodotto attraverso L-PBF risulta avere statisticamente le proprietà più alte fra tutte le altre tecnologie. Nella figura 4.11 è mostrato un grafico della resistenza a trazione e allungamento a rottura del titanio prodotto attraverso varie tecniche di fabbricazione.

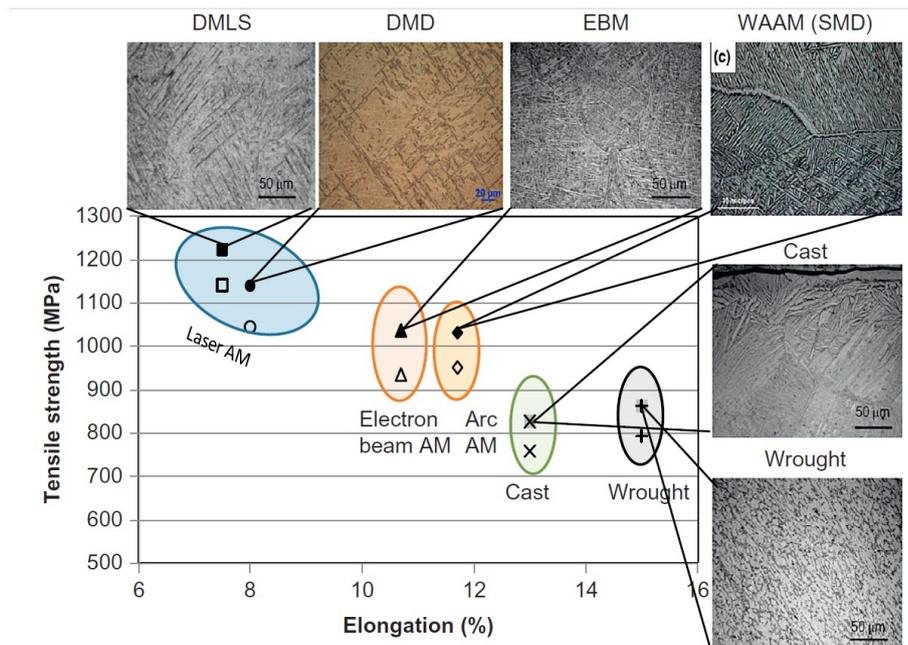


Figura 4.9 – Resistenza a trazione vs allungamento a rottura del Ti6Al4V per le diverse tecnologie di fabbricazione [31].

4.6 Identificazione Design space e preparazione modello

La prima operazione che si è eseguita è la preparazione del modello di ciascun blocco per la riprogettazione, attraverso il defeaturing del componente originale rappresentato in figura 4.10. Tale operazione permette di massimizzare il volume possibile di design space, riempiendo gli spazi ed eliminando raccordi e smussi non necessari. In questo modo dove è possibile si aumenta il dominio di ottimizzazione rispettando i vincoli funzionali del pezzo, lasciando più ampia libertà all'ottimizzazione eseguita dall'algoritmo. Infatti, questo serve a lasciare la massima possibilità di ottimizzazione, aumentando il volume di design space là dove è permesso dai vincoli di progetto.

In questo caso tali vincoli sono sul volume massimo, in cui il pezzo deve sempre essere compreso. Quindi tutto il componente dovrà stare entro i limiti che definiscono le facce esterne del pezzo. Tuttavia, in questo caso l'operazione è stata molto veloce in quanto il componente in oggetto presenta solo degli smussi, lamature e svasature.

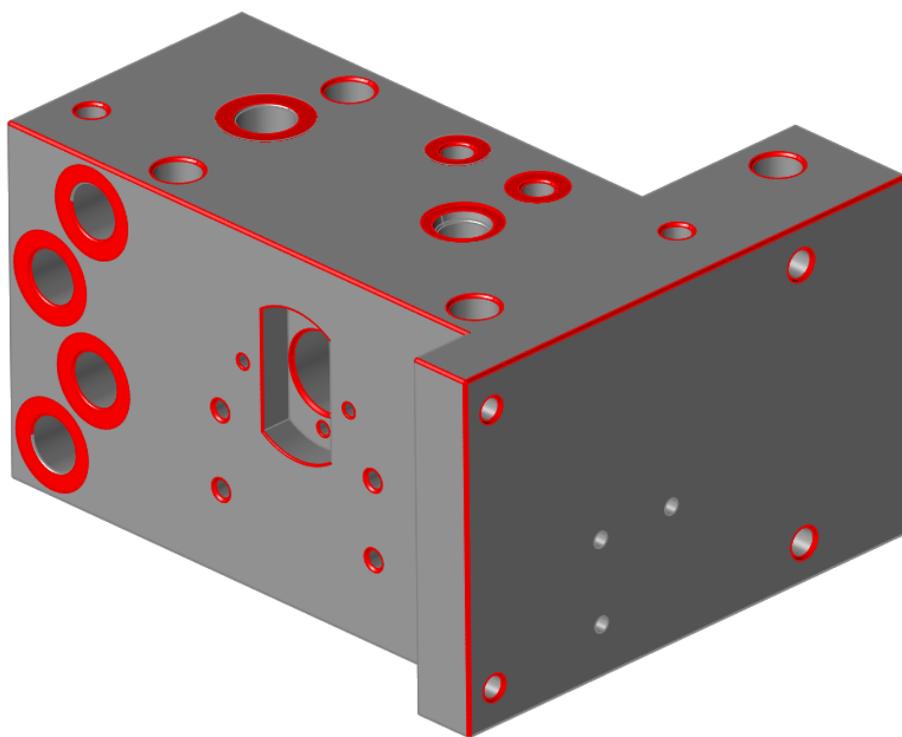


Figura 4.10 – defeaturing componente, rimozione elementi non necessaria, migliore mesh.

Successivamente l'operazione da eseguire è quella della individuazione di tutte le geometrie da preservare quindi di "non design". Infatti, sono state suddivise le zone del design space da quelle di non design. In particolare, si sono individuate le zone di non design che sono quelle in cui sono applicati i carichi, vincoli e in cui sono previsti gli accoppiamenti; mentre la restante parte del componente può essere oggetto della ottimizzazione topologica. Le zone di non design così identificate sono raffigurate 4.11.

Nel software si è deciso di tenere divise tutte le parti di non design tra loro, permettendo, in vista della riprogettazione, di andare a variare gli spessori di queste zone, inizialmente impostate a 2 mm.

Questa operazione è fondamentale perché permette di garantire e preservare sempre e comunque la sede dei vincoli su cui il pezzo andrà fissato. Allo stesso modo è stato fatto per tutte le zone in cui sono applicati i carichi e dove agisce una forza per cui deve essere garantita una porzione di materiale per la funzionalità del pezzo.

Da ora in poi tutte le zone di non design verranno anche chiamate geometrie preservate. Queste zone come è stato spiegato devono essere garantite a valle di una qualsiasi ottimizzazione e riduzione di peso.

Ognuna di queste zone è stata appositamente analizzata poiché bisogna considerare in questa fase l'intero processo di produzione ed il ciclo del componente. Poiché ognuna di queste zone deve svolgere una particolare funzione si deve decidere lo spessore di materiale intorno a queste zone.

Tuttavia, non basterà solo determinare un offset esterno di materiale nelle sedi individuate da preservare ma bisognerà tenere in conto le operazioni di post processo a cui verrà sottoposto il componente.

Infatti, una volta stampato, questo dovrà essere successivamente portato e fissato adeguatamente in CNC per ottenere tutte le filettature standard delle valvole, delle viti e raggiungere tutte le specifiche da 2D, quali tolleranze dimensionali e geometriche.

Per questo motivo bisognerà prevedere in questa sede anche il sovrametallo da mantenere all'interno di tutte quelle cavità da rilavorare.

Bisognerà considerare le difficoltà legate al processo, la pluralità di quote dimensionali e geometriche da assicurare e tenere in conto errori da parte dell'operatore durante queste operazioni. Inoltre, considerare eventuali errori di stampa come un ritiro eccessivo del materiale.

In tabella 9 sono mostrati i valori dei diametri scelti per ognuna delle zone individuate divise per macrocategorie, sia la quota di sovrametallo che l'offset esterno di materiale:



Tabella 9 – Lista delle features presenti nel blocco 1.

Feature	Dim. originale [mm]	Geometrie Preservate	Offset[m m]	Sovramet allo [mm]
Bulloni	6	n°2 fori M6	12	3
Bulloni	6	n°2 fori M6	12	3
Bulloni	6	n°4 fori M6	12	3
Bulloni	12	n°2 fori M12x1.5	18	9
Bulloni	10	n°2 fori M10	16	7
Bulloni	10.5	n°2 fori 10,5	16.5	7.5
Bulloni	17	n°2 lamature 17	23	14
Bulloni	17	Φ17 □40	23	14
Bulloni	12.5	Φ12.5 □ (lamatura)	18.5	9.5
Albero	30	Φ30 H11 +0,130-0;	36	27
Albero	16	Φ16 H7 +0,018-0	22	13
Bulloni	8	n°4 fori M8	14	5
Cav.C019E	11.5	n°4 Cav.C019E	17.5	8.5
Cav.C019E	28	counterbore x 5mm □0.5 max	34	25
NP108-M22x1,5	22	n°4 attacchi NP108-M22x1,5	28	19
NP108-M22x1,5	34	counterbore x 5mm	40	31
(B) NP108-1/4"G	11.5	n°2 attacchi NP108-1/4"G	17.5	8.5
(B) NP108-1/4"G	22	counterbore x 5mm □0.5 max	28	19
Preserved interface internal ducts	6	Φ6	10	-

In tutti i fori passanti basterà quindi determinare un offset di materiale esterno da preservare e una certa quota di sovrametallo da aggiungere nel diametro interno di tutte le cavità. Mentre nelle sedi di tutte le viti non passanti (quindi cieche) oltre all'offset e al sovrametallo bisognerà anche prevedere quanto materiale dare in profondità.

Infatti, se per un foro M10x30 la geometria preservata risulta profonda solamente 30 mm durante la foratura nella macchina a controllo numerico si avrebbero dei problemi.

Inizialmente, in accordo col reparto tecnico per la stampa e il Know – How dell'azienda è stato deciso un offset per tutte le sedi delle viti di 3 mm sul raggio e un sovrametallo di 1.5mm sul raggio. Questo permetterà di avere sufficiente rigidità strutturale di queste geometrie e abbastanza materiale di sovrametallo per la successiva lavorazione alle macchine utensili.

Un' alternativa era quella di stampare le zone delle viti e delle filettature delle valvole come pieni e successivamente rilavorarle da zero alle macchine utensili. Tuttavia, la scelta che è stata fatta è diversa e si è deciso di fornire queste sedi già preforate con una certa quantità di sovrametallo come precedentemente esposto.

La scelta è stata giustificata da diverse considerazioni, una di queste è che le sedi delle viti M12 in figura 4.11, se fossero piene e non preforate, potrebbero creare dei problemi di diffusione e scambio termico durante la stampa della parte essendo queste zone molto grandi rispetto a tutte le altre. Un'altra considerazione è sicuramente il peso della parte, infatti stampare tutte le geometrie piene inciderebbe sul peso complessivo della parte stessa.

Per l'ottenimento di queste geometrie preservate esistono diversi metodi, in questo caso il più pratico è stato quello manuale che ha consentito le modifiche e creazioni di queste geometrie in maniera controllata e parametrica. In questo modo è stato possibile ottenere tutte le geometrie di non design come mostrato in figura:

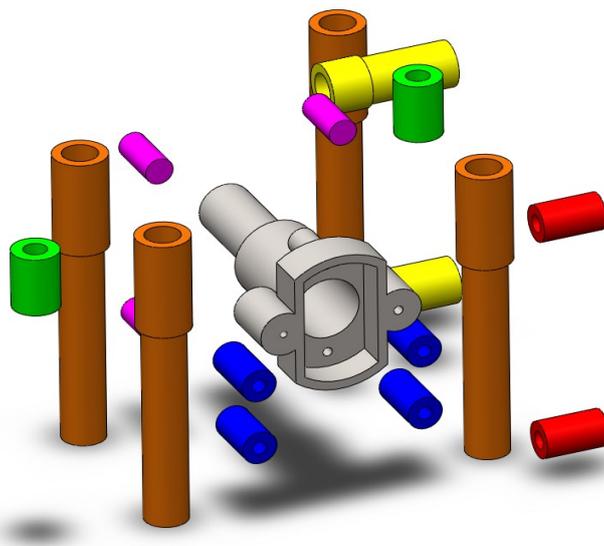


Figura 4.11 - Geometrie preservate blocco 1.

Tutte queste geometrie preservate, ottenute manualmente su CAD, sono state successivamente importate su Inspire e rappresentano le zone di non design.

Successivamente si è proceduto allo stesso modo per i condotti e per tutte le sedi di attacco gas e delle elettrovalvole. Rispettivamente Cav.C019E, NP108-M22x1,5 e NP108-1/4"G.

Come per le altre geometrie preservate il criterio è stato lo stesso ovvero dare un offset di materiale esterno per sopportare la pressione a cui sono sottoposti e per garantire la rigidità strutturale per il corretto funzionamento, non di meno per consentire delle corrette operazioni di post processo nella CNC.

Per quanto riguarda i condotti interni questi sono stati ricavati dal file 3D riempiendo il volume di vuoto e successivamente è stato dato un offset di materiale verso l'esterno. In ragione della loro complessità, queste geometrie sono state ricreate manualmente. Al fine di determinare il loro spessore si è fatto ricorso alle formule di Barlow e di Mariotte [32]. Queste hanno permesso di individuare lo spessore minimo dei condotti sottoposti alla condizione di pressione più critica. I valori usati sono rappresentati in tabella:

Variabile	Valore	Unità di misura
Spessore minimo	s_o	incognito
Pressione massima	p	30
Diametro	D_e	6
Sovraspessore	a	0
Tensione ammissibile	σ_{amm}	285

$$s_o = \left(\frac{p * D_e}{20 * \sigma_{amm} + p} \right) * \frac{100}{100 - a} \quad (1)$$

Il risultato è stato di 0.6mm ed è per questo si è scelto cautelativamente un valore di 2mm. Successivamente i condotti con tale spessore sono stati analizzati agli elementi finiti e verificati. Il risultato di questa operazione di creazione delle zone di non design è mostrata in figura 4.12.

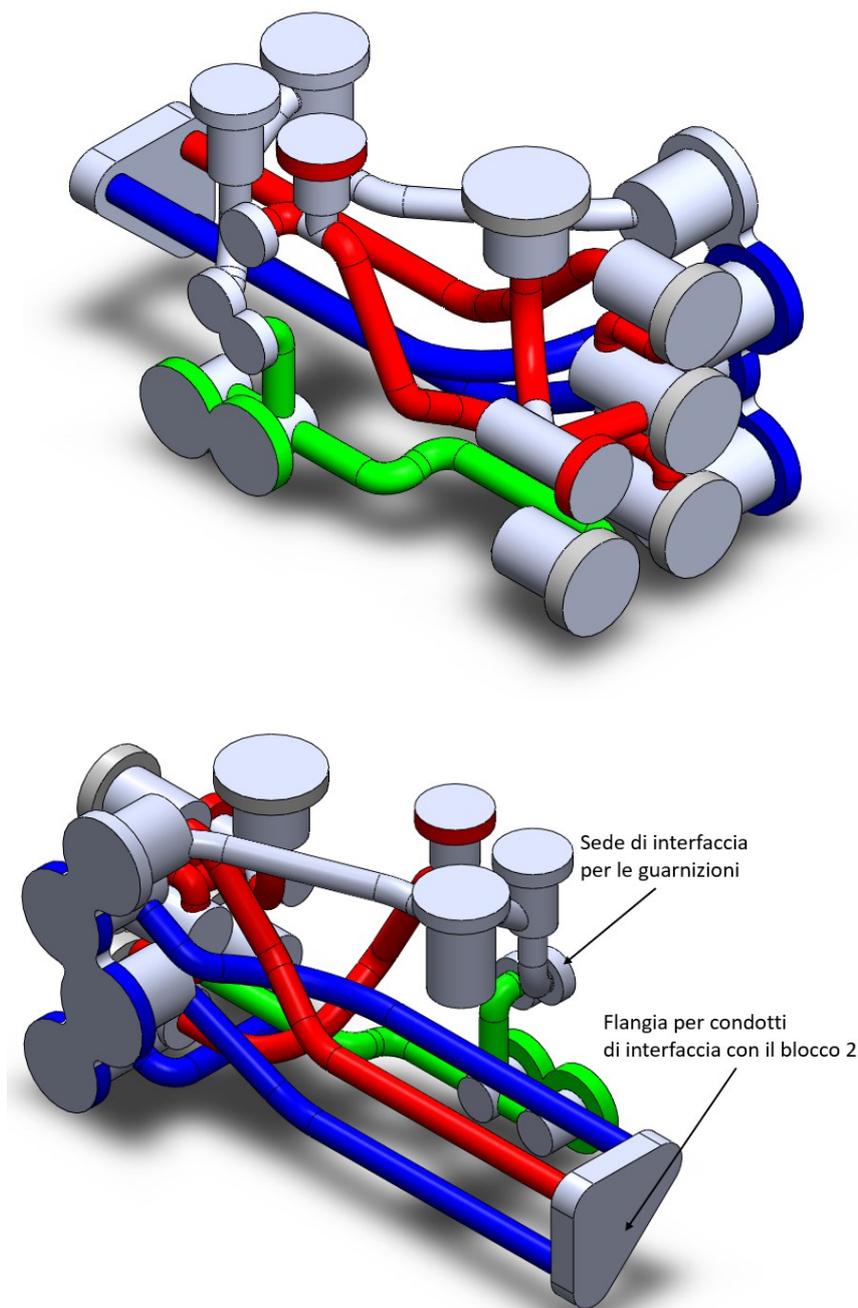


Figura 4.12

Come è possibile notare dalle foto i condotti sono stati isolati e si è creato del materiale intorno secondo l'offset deciso. In aggiunta a ciò, è possibile osservare due nuove zone che sono state pensate e progettate per aspetti funzionali del blocco.

Infatti, proprio a causa della loro geometria a sbalzo, i 3 canali dritti (2 blu e 1 rosso in figura), così pensati e progettati senza alcun materiale che li contenga e li unisca, sarebbero stati soggetti a delle deformazioni troppo importanti durante il montaggio o la messa in opera.

Per questo motivo è stata pensata una flangia con una geometria triangolare che potesse racchiudere i tre condotti con il minor peso possibile e che potesse conferire

la rigidezza necessaria in caso di flessione o ad altre forze generate durante il montaggio.

Tale modifica si è resa necessaria anche in quanto questa è la zona di interfaccia con il blocco 2, in cui sarà presente la stessa flangia ma specchiata (vedi figura 4.15) dove saranno ricavate le sedi per gli OR di tenuta. Queste sedi devono garantire la tenuta del fluido in pressione e perciò gli spostamenti massimi di quella zona devono essere contenuti.

Allo stesso modo un'altra sede è stata modificata per lo stesso motivo, ed è indicata a disegno come "sede di interfaccia per le guarnizioni". Anche in questa zona, dove confluiscono i 3 canali, si è pensato all'aggiunta di materiale comune che potesse contenerli e conferirgli stabilità e allo stesso modo potesse garantire la battuta con un altro componente dell'assieme.

Infatti, in questa zona verrà fissato un altro componente attraverso le 4 viti M6. Inoltre, a disegno 2D è specificata una certa tolleranza dimensionale e di rugosità da garantire su quella faccia: Ra 1.6. Vedi figura 4.16.

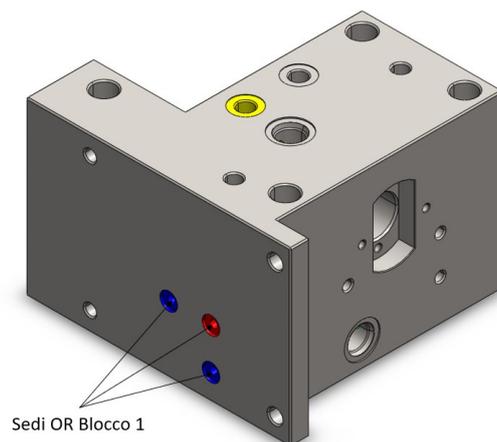


Figura 4.13

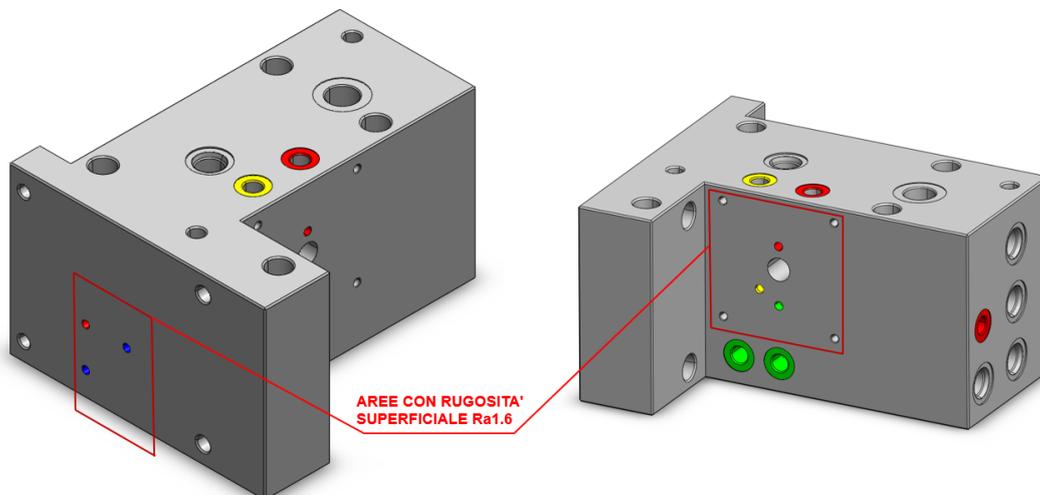


Figura 4.14 – In alto, sedi degli Oring nel blocco 2, in basso le aree in cui è richiesta una certa tolleranza superficiale Ra1.6.

Come si può vedere, queste geometrie preservate che sono state disegnate contengono sia i condotti che le sedi delle elettrovalvole e gli attacchi GAS che risultano pieni. A valle di tutte le operazioni di riprogettazione in ambiente CAD software verranno effettuate delle operazioni Booleane di sottrazione per ottenere i diametri interni specifici a disegno, con il loro sovrametallo nelle zone da rilavorare. Infatti, come è stato detto precedentemente, solo i canali interni verranno lasciati con un diametro interno di 6mm poiché data la loro complessità non sarà possibile condurre delle post lavorazioni.

A questo punto è stato possibile ottenere tutte le zone di non design, Figura 4.15.

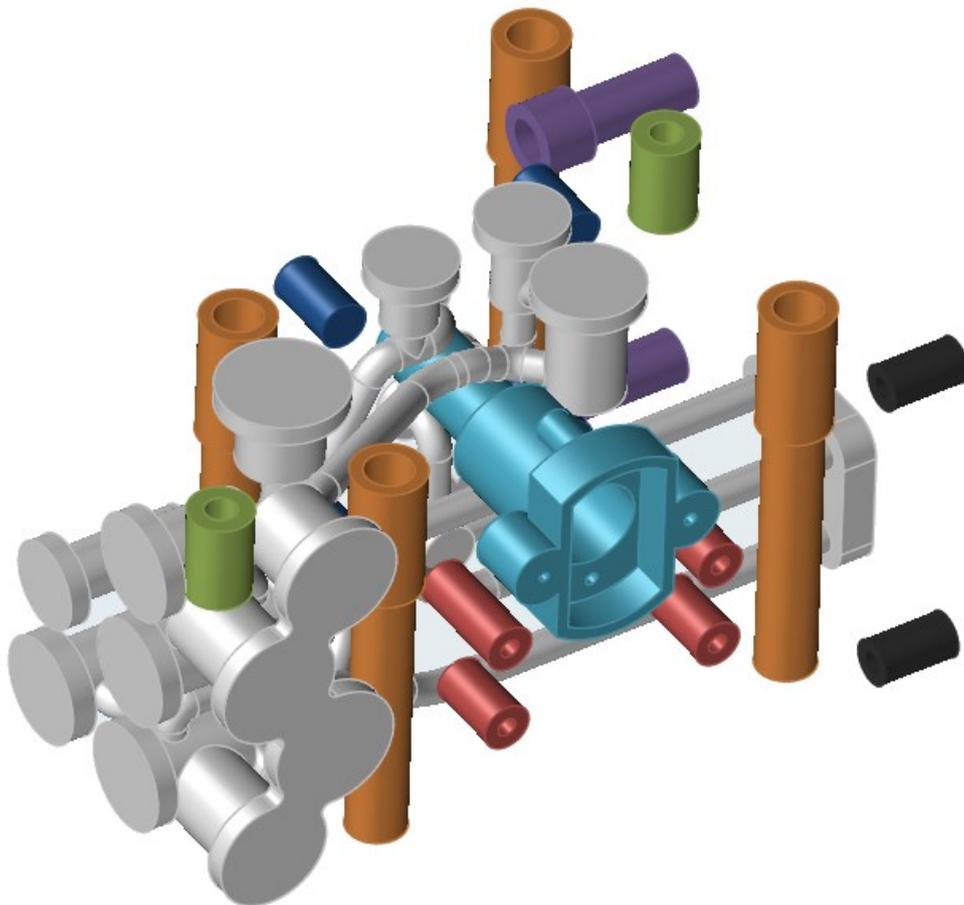


Figura 4.15 Rappresentazione di tutte le geometrie preservate.

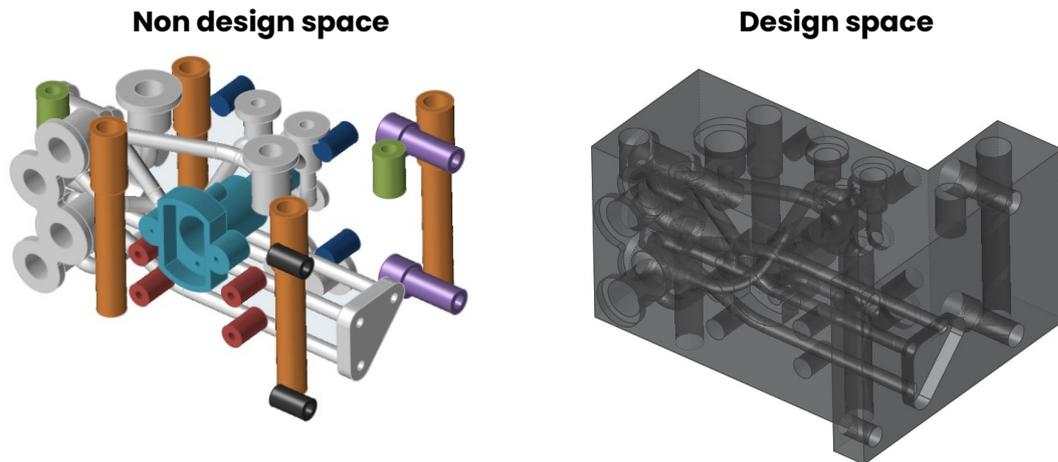
La sfida più grande è quella di ottenere una struttura coerente e che unisca tutte le geometrie preservate; infatti, come è stato mostrato durante l'analisi FEM preliminare la struttura risulta pressoché scarica nella maggior parte del volume.

Quello che bisogna fare è ottenere una struttura che metta in collegamento tutte queste geometrie seguendo le linee di carico e verificando i vincoli di progetto.

Per questo motivo si è deciso di effettuare un'ottimizzazione topologica utilizzando tutto il volume esterno alle geometrie preservate come design space da ottimizzare.

Le zone di non design già preforate e con le quote di sovrametallo necessario per le lavorazioni successive richieste dal componente in titanio sono mostrate in figura insieme alla zona di design.

In tabella sono evidenziati i pesi e si può notare che, a fronte di un totale di circa 17.5 kg, il peso delle geometrie da preservare del componente e di soli 2.35 kg. Ovvero solo il 13.4% della massa totale del blocco è indispensabile.



	Non Design Space	Design space	Totale
Peso [kg]	2.35	15.14	17.49

4.7 Analisi e processo di ottimizzazione

Una volta definito il design space, è possibile eseguire l'ottimizzazione topologica. Tuttavia, prima di procedere è utile distinguere le varie tipologie di ottimizzazioni. L'ottimizzazione consiste in una ricerca iterativa di una soluzione ottimale che risolve un problema. La ricerca di punti di minimi o di massimo di una data funzione obiettivo, si può cercare in un dominio con vincoli (vincolati) o in un dominio senza vincoli.

L'obiettivo è cercare il minimo o massimo di una funzione generica di "x" così che gli n-vincoli siano rispettati e il parametro di interesse sia all'interno dei valori stabiliti.

Un problema di ottimizzazione si può formulare generalmente come segue:

$$\text{Min: } F(x) \quad \text{Funzione obiettivo} \quad (1.1)$$

$$\text{s.t.: } g_j(x) \leq 0 \quad j = 1, m \quad \text{Vincoli di disuguaglianza} \quad (1.2)$$

$$h_k(x) = 0 \quad k = 1, l \quad \text{Vincoli di uguaglianza} \quad (1.3)$$

$$g_j(x) \leq 0 \quad i = 1, n \quad \text{Vincoli sulle variabili} \quad (1.4)$$

I vincoli permettono di individuare il campo di esistenza e ammissibilità delle variabili di ottimizzazione entro cui si può ricercare la soluzione ottimale del problema, questi possono essere descritti da equazioni lineari o non lineari nelle variabili di ottimizzazione

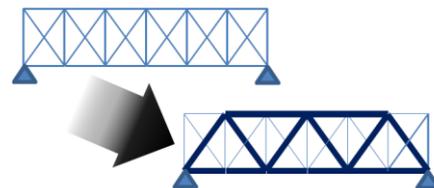
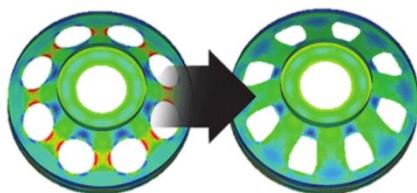
Esistono tre principali tipi problemi di ottimizzazione che sono state esplorate per la progettazione per FA, figura 4.19.

-**Ottimizzazione topologica:** è quella che noi consideriamo maggiormente e che ci permette di definire la topologia, ovvero dove andrà messo materiale per raggiungere quella funzione obiettivo. Questa consiste nella definizione di una struttura ottimizzata partendo dal massimo ingombro che potenzialmente potrebbe avere, detto dominio di esistenza (o design space). La ricerca di una soluzione ottimizzata viene svolta mediante un processo iterativo in cui si elimina materiale in eccesso al fine di rispettare alcune condizioni di vincolo. (esempio: vincoli sul volume, rigidità o massima tensione ammissibile.)

-**Ottimizzazione di forme:** riadattare le superfici di un solido per compiere meglio un compito, non creiamo parti senza materiale ma ottimizziamo la forma di quanto c'è già nel nostro componente. Ad esempio, in un'ottimizzazione di forma non creiamo dei nuovi fori.

-**Ottimizzazione dimensionale:** consiste nel mantenere completamente la geometria del componente e far variare solo alcuni parametri (come lo spessore ecc.).

Le principali differenze tra l'ottimizzazione della topologica e l'ottimizzazione della forma o quella dimensionale risiedono nella configurazione geometrica di partenza e nella scelta delle variabili, che possono portare a miglioramenti molto significativi delle prestazioni strutturali. Il recente interesse per l'ottimizzazione della topologia come metodo di progettazione per AM garantisce uno sguardo più attento a questa tecnologia.

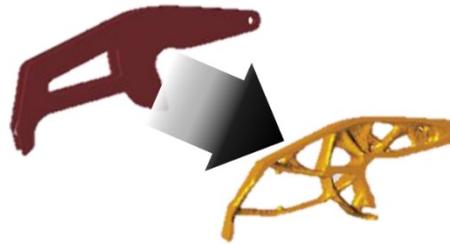


Forma

Ottimizzazione permette di trovare la forma migliore della struttura senza cambiare topologia

Dimensione

Ottimizzazione permette di trovare le migliori dimensioni di elementi strutturali



Topologica

Ottimizzazione permette di trovare la migliore distribuzione del materiale "eliminando" materiale da un dato spazio progettuale

Figura 4.16 – Tipologie di ottimizzazioni.

4.7.1 Ottimizzazione topologica

L'ottimizzazione topologica (OT) come è stato già anticipato nei capitoli precedenti di questo elaborato è una tecnica matematica che permette di ottimizzare la distribuzione di elementi (del materiale) di un determinato spazio (dominio) di un progetto vincolato.

Tipicamente i vincoli possono essere:

- Geometrici e funzionali;
- Rigidezza;
- Energia;
- Frequenze e modi propri;

Solitamente, le forme prodotte dall' OT spesso sono complesse per la tecnologia convenzionale. Sono stati sviluppati tre approcci principali per risolvere i problemi di OT:

- Truss-Based Methods
- volume-based density
- level set methods

Tuttavia, questi tre approcci non sono oggetto di questo lavoro e pertanto la loro trattazione matematica non verrà svolta in questa sede, poiché non aggiunge alcun valore all'elaborato. Infatti, questi approcci influenzano le potenzialità e l'efficienza dell'algoritmo mantenendo comunque il suo obiettivo che è quello della ricerca del massimo di una funzione. Sono di maggior rilievo invece gli step che si seguono

durante una riprogettazione per ottimizzazione topologica, come mostrati in figura 4.17. Dopo una la definizione del Design Space, analisi agli elementi finiti e successiva ottimizzazione, la geometria ottimizzata viene di nuovo analizzata in modo tale da verificarla. Questo è un processo iterativo che porta fino al design ottimale.

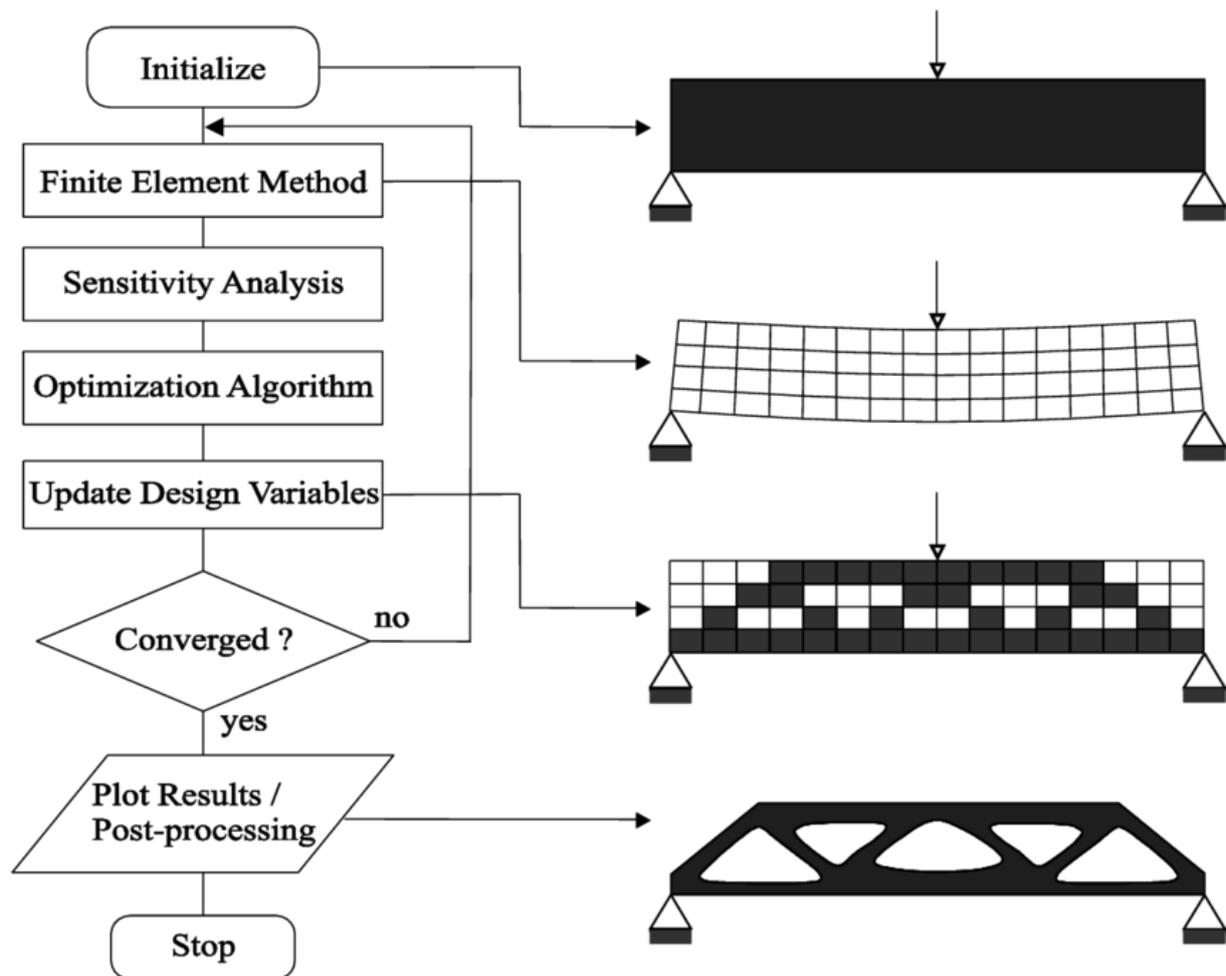


Figura 4.17 – Flowchart ottimizzazione topologica. [33]

Inoltre, anche altri aspetti sono di maggior rilievo, come ad esempio le considerazioni sulla produzione delle parti ottimizzate. Come è stato anticipato precedentemente, sebbene le tecniche di FA siano in grado di produrre “virtualmente” qualsiasi forma, ciascuno di esse ha dei limiti.

L’OT ha trovato infatti impiego già molti anni prima dell’esplosione dell’AM. Tuttavia, nelle applicazioni per la FA ci sono alcune considerazioni comuni di cui bisogna tenere conto e che vanno analizzate. Queste includono il controllo delle sporgenze che permette di eliminare la necessità di strutture di supporto e i vincoli sulla dimensione minima delle feature. (capitolo dedicato DfAM).

Un tipico approccio che viene usato per rispondere alla necessità di minimizzare le strutture di supporto è quello di determinare a valle di una OT le regioni che superano i vincoli sugli angoli e aggiungere in quelle zone delle feature e successivamente individuare l'orientamento ottimale per la produzione.

Infatti, avere strutture senza supporti incide sia sulla velocità di stampa ed infine sulla finitura superficiale. Un esempio di processo di iterazioni per ottenere una geometria senza supporti è mostra in figura 4.20.

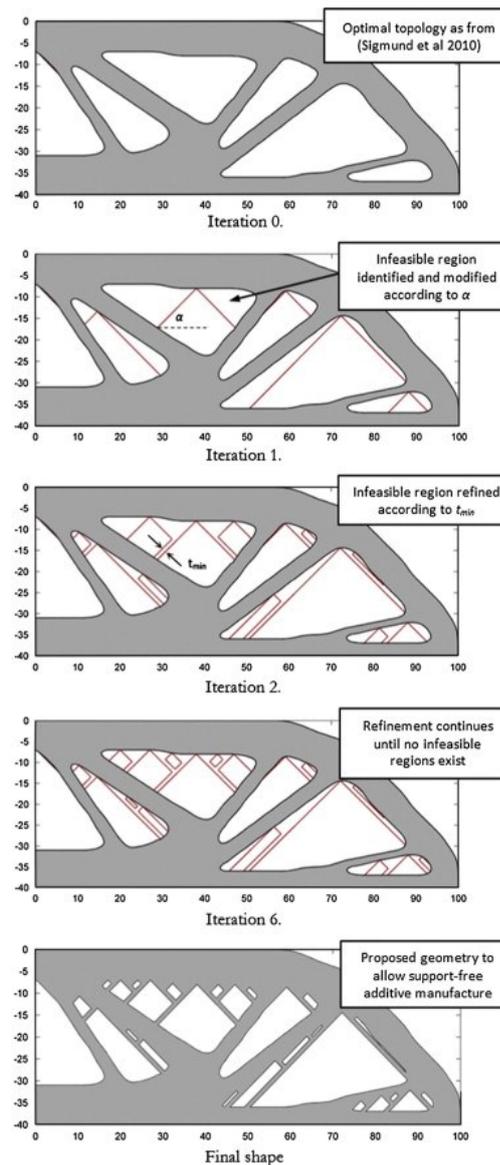


Figura 4.18 Iterazioni per ottenere una struttura libera da supporti. [34]

4.7.2 Design generativo

L'ottimizzazione topologica e il design generativo sono comunemente usati dai progettisti per ottenere la forma della parte che con il peso più basso possibile permette di svolgere la funzione per cui è stato progettato, con il tipico motto: “mettere il materiale solo dove serve”. Gli strumenti di simulazione dei processi AM sono un insieme relativamente nuovo di strumenti CAE, introdotti nel mercato negli ultimi anni. Questi strumenti di simulazione del processo AM possono prevedere alcuni difetti (distorsione, ritiro, delaminazione), la microstruttura, la porosità e altre caratteristiche di una parte AM prima della sua creazione. Simulando gli effetti di un processo AM su una geometria specifica, è possibile ridurre gli errori di costruzione e compensare i cambiamenti di forma che si verificano nella parte prima della produzione, in modo che questa possa essere prodotta con una tolleranza più elevata e con una maggiore probabilità di successo.

Ad oggi, praticamente tutte le società di software di progettazione si stanno avvicinando al mondo della progettazione additiva, con quelli che comunemente sono chiamati metodi di progettazione generativa, e si trovano a fare i conti con la rapida crescita di questi settori.

Con il termine “generative design” si intende un metodo di progettazione in grado di generare molteplici e alternative soluzioni geometriche che soddisfino i requisiti di progettazione. Nella pratica, i metodi di progettazione generativa sono una metodologia di esplorazione dello spazio di progettazione (design space).

La progettazione generativa è illustrata in modo efficace in figura 4.19, dal sito di Autodesk Generative design che presenta molte soluzioni progettuali alternative per la stessa parte.

Infatti, questo approccio di progettazione permette di ottimizzare un componente a partire da molti più vincoli quali le prestazioni meccaniche, i vincoli sul volume, sui materiali e sui processi di fabbricazione, il costo ed altri parametri rilevanti.

È possibile specificare in modo interattivo i requisiti e obiettivi del progetto, compresi i materiali e i processi di produzione preferiti. Il software realizzerà automaticamente un progetto pronto per la produzione (soluzione finale) o come punto iniziale per ulteriori modifiche o iterazioni. È possibile, pertanto, interagire con la tecnologia per creare con maggiore rapidità progetti più efficienti e prodotti innovativi. [35]

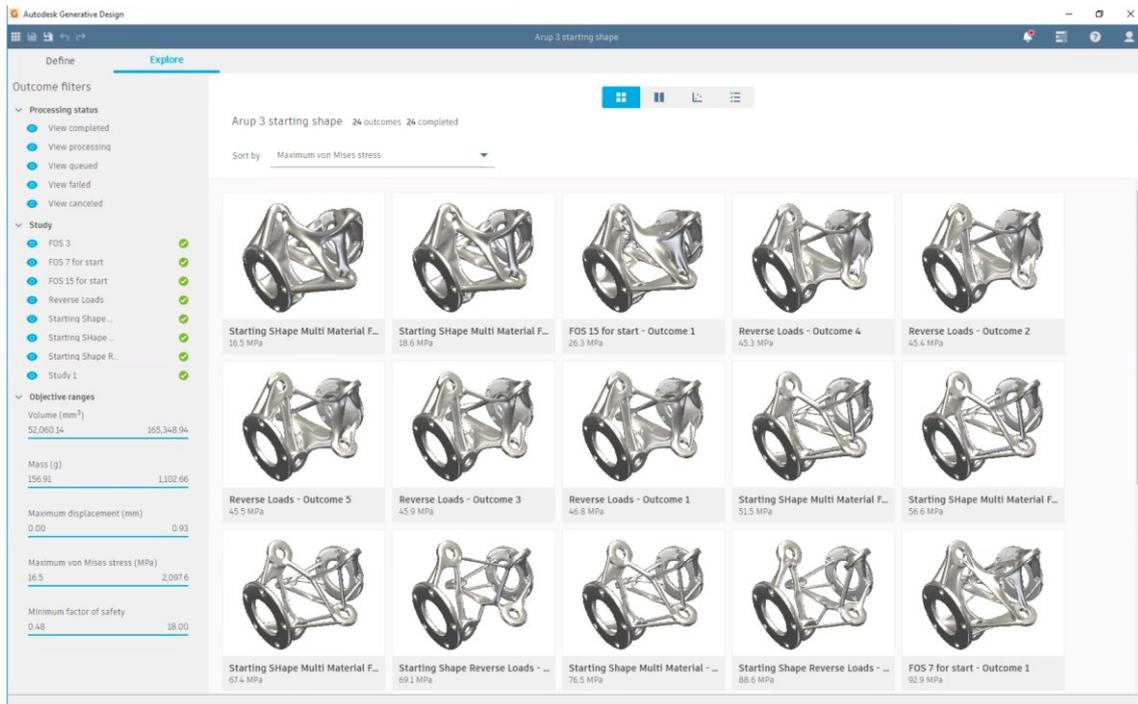


Figura 4.19 – Interfaccia con i risultati a valle del generative design. [36]

Le potenzialità di poter generare soluzioni alternative per lo stesso componente nascono a causa di intervalli di valori dei parametri di progettazione. Infatti, in tutti gli algoritmi di OT, vengono utilizzati diversi parametri per controllare il metodo e la convergenza. Questi includono ad esempio l'esponente di penalizzazione nel metodo SIMP, le dimensioni come la "thickness" e altri fattori che controllano la velocità di convergenza. L'idea alla base della generazione di soluzioni progettuali alternative utilizzando i metodi di OT consiste nel variare il valore di tali parametri.

Ad esempio, un tipo di filtro controlla la "thickness", giocando su questo parametro è possibile, ad esempio, generare strutture molto diverse. Utilizzando un valore di filtro piccolo verranno generate strutture piccole e viceversa geometrie più grandi. Di certo le linee di carico sul componente saranno macroscopicamente le stesse ma riducendo questo valore è possibile comunque ottenere un orientamento diverso e una struttura trabecolare e snella più intensa.

Ad oggi sono molte le attività di ricerca in quest'area, i ricercatori stanno esplorando le possibilità di sfruttare i moderni algoritmi e le potenze di calcolo disponibili come il deep learning ecc. per migliorare questi software.

Una domanda che ci si può porre è se la progettazione generativa sia legata in modo univoco alla stampa 3D oppure no. C'è stato sicuramente un malinteso sul fatto che il design generativo sia esclusivamente correlato alla stampa 3D. Infatti l'utente nel software è in grado di specificare il metodo di produzione che può essere: additivo (stampa 3D), sottrattivo (lavorazione CNC), fusione, ecc. Una volta definito il metodo, il

software genererà solo progetti che possono essere prodotti con quel metodo di produzione specifico, in figura 4.22 un esempio.

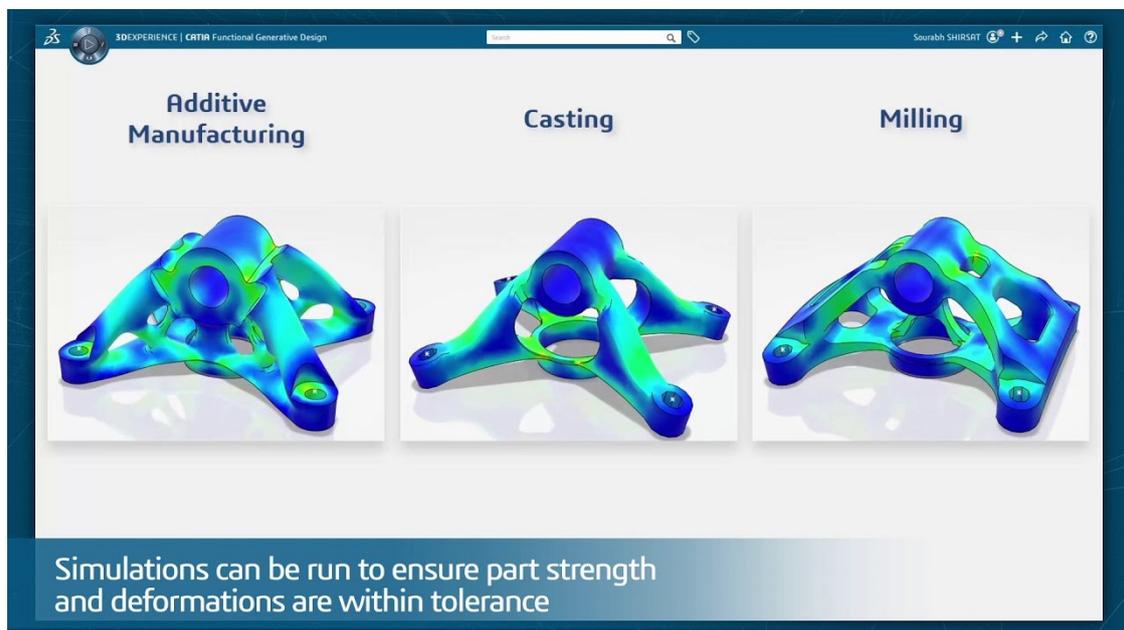


Figura 4.20 – Soluzione con il modulo di Generative design di CATIA V5.

4.7.3 Ottimizzazioni iniziali

Il processo di riprogettazione e ottimizzazione di un componente può seguire diverse vie, ad esempio è possibile condurre una prima ottimizzazione topologica sul design space del componente con un certo obiettivo, ricostruire il pezzo e successivamente ripetere una seconda ottimizzazione.

In generale questi step sono iterativi per indagare la soluzione che più si adatta ai vincoli di progetto e alla fine ottenere il design migliore. Gli step di questo elaborato sono quindi:



Nel primo step, data la complessità del pezzo, l'obiettivo era il rispetto dei vincoli andando a mettere il materiale necessario per dare rigidità e struttura al componente e per rispondere alle esigenze funzionali.

Considerando le ottime proprietà meccaniche del titanio e il costo, si è quindi deciso inizialmente di lanciare delle ottimizzazioni per minimizzare il peso. In questa fase

quindi il vincolo dell'ottimizzazione è fondamentalmente uno ovvero il coefficiente di sicurezza minimo del componente. Inoltre, su software come Inspire (software scelto per l'ottimizzazione) è possibile impostare alcuni altri parametri come i vincoli di spessore. Quando si esegue un'ottimizzazione topologica su Inspire, è possibile controllare gli spessori delle pareti e i diametri degli elementi a "trave" in una forma specificando uno spessore minimo e/o massimo. Gli spessori delle pareti sono controllati dallo stesso parametro. Tuttavia, i tempi di esecuzione dell'ottimizzazione aumentano man mano che i vincoli di spessore si riducono. Quindi, per mantenere i tempi di esecuzione ragionevoli bisogna scendere a compromessi.

In ordine sono state eseguite diverse ottimizzazioni andando a verificare ogni volta, in maniera preliminare (prima della ricostruzione) che il coefficiente di sicurezza fosse maggiore almeno di 2. Questa scelta di imporre come vincolo un coefficiente di sicurezza minore di quello minimo da garantire per questa applicazione ($SF > 3$) è giustificata dal fatto che le analisi statiche sulle ottimizzazioni grezze non ancora ricostruite restituiscono dei dati poco attendibili. Infatti, dall'analisi statica preliminare, si riescono ad individuare le zone del componente in cui si possono riscontrare concentrazioni degli sforzi. In questo modo si può ricostruire la geometria facendo attenzione che in tali zone il coefficiente non risulti troppo basso. Per questa ragione si è condotta un'analisi per minimizzare la massa ponendo come vincolo un coefficiente di sicurezza anche inferiore a 3 (SF accettabile prima della ricostruzione 2 se localizzato ed in una zona critica). Le ottimizzazioni condotte in questo modo portavano a dei buoni risultati in termini di peso e coefficiente di sicurezza; tuttavia, mostravano problemi sulla integrità strutturale poiché, come mostrato dalle analisi FEM preliminari sul componente originale, questo risultava scarico in diverse zone. Nella tabella 9 sono mostrate le principali ottimizzazioni che hanno fornito risultati accettabili per soddisfare la funzionalità del pezzo.

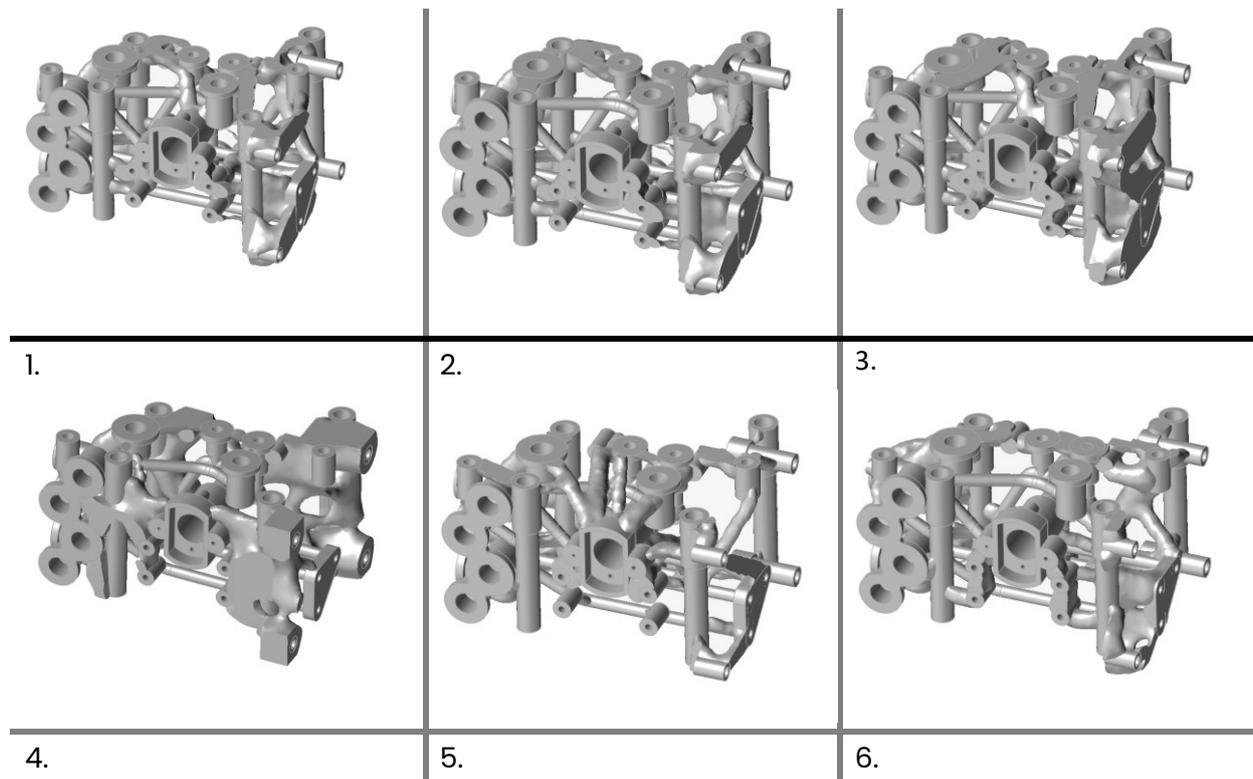
Tabella 10 – Migliori risultati delle ottimizzazioni topologiche sul componente.

Obiettivo	Target	Spessore Max-Min [mm]	SF (result envelope)	Max spostamento [mm]	Peso [kg]*
1.Min mass.	3 (SF)	20-40	>Target	<0.15	3.8
2.Min mass.	3 (SF)	16-32	>Target	<0.15	3.6
3.Min mass.	3(SF)	12-24	>Target	<0.15	3.8
4.Max Stiff.	4 kg	10-20	>Target	<0.08	4.2
5.Max Stiff.	4 kg	20-40	>Target	<0.08	4.5
6.Max Stiff.	4 kg	15-30	>Target	<0.08	4.4

*dipende dal valore settato del software.



Infatti, dalle analisi risultava che il componente non avesse bisogno di materiale nelle zone intorno alla sede delle viti M12 e in altre zone: questo non poteva essere corretto dal punto di vista funzionale considerando anche le successive lavorazioni a cui sarebbe dovuto andare incontro il componente. Bisognava quindi garantire una struttura che sostenesse tutte le geometrie preservate.



Dopo aver effettuato diverse analisi si è deciso di ricostruire, come primo tentativo, il risultato dell'analisi presentato in figura 4.21, in cui si è posto come obiettivo la **minimizzazione della massa** con spessore 12-24 mm. Tale soluzione risultava essere la migliore, in quanto combinava la riduzione massima della massa, ma allo stesso tempo, consentiva di rispettare il vincolo sul coefficiente di sicurezza nelle zone più critiche. Nonostante presentasse diverse criticità queste risultavano essere concentrate e localizzate in alcune piccole zone del componente, quindi potenzialmente modificabili.

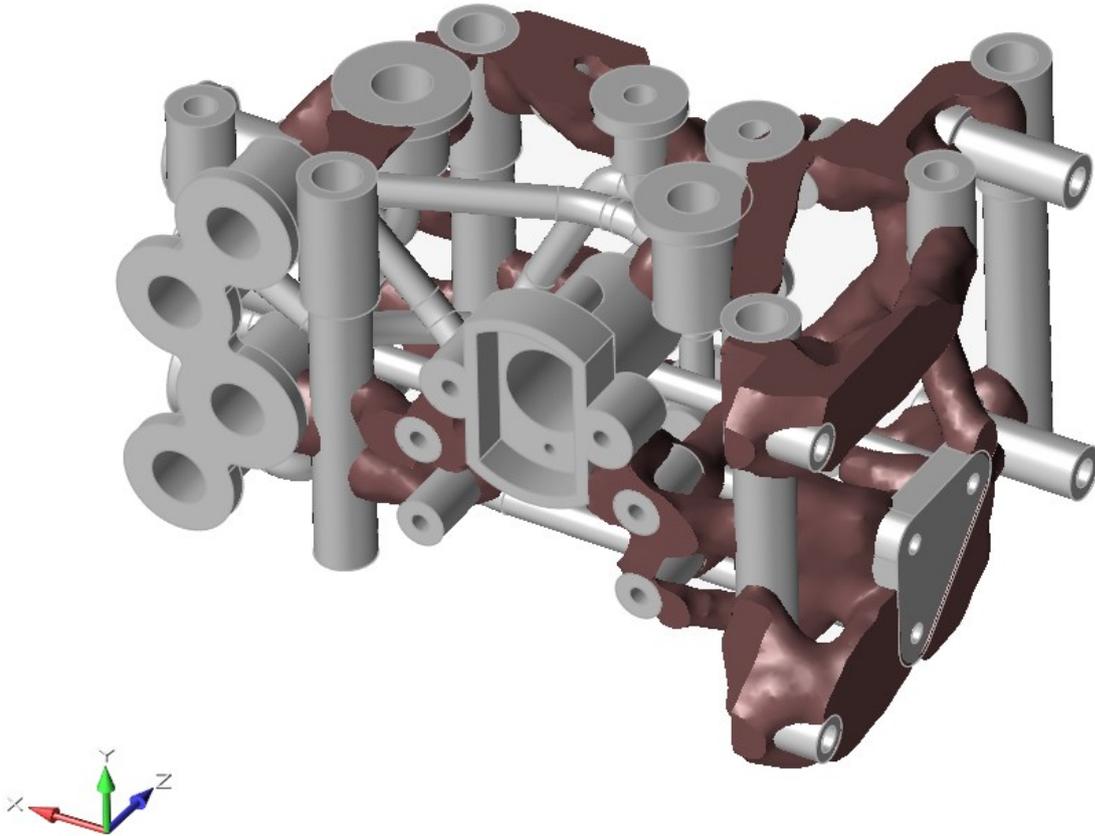


Figura 4.21 – Design prima di ricostruire.

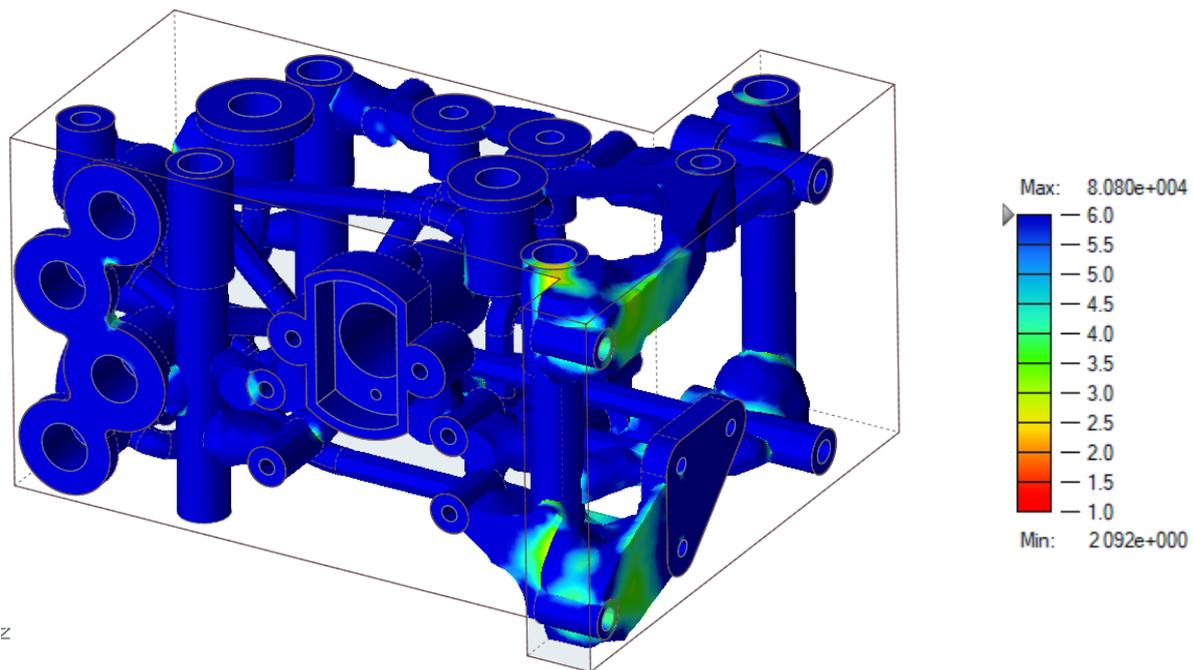
La fase successiva è stata quella di individuare le criticità ottenute dalle analisi statiche preliminari delle ottimizzazioni topologiche per poter già stimare ed individuare eventuali problemi in fase di ricostruzione e di successiva verifica. Tra questi si è fatta particolare attenzione:

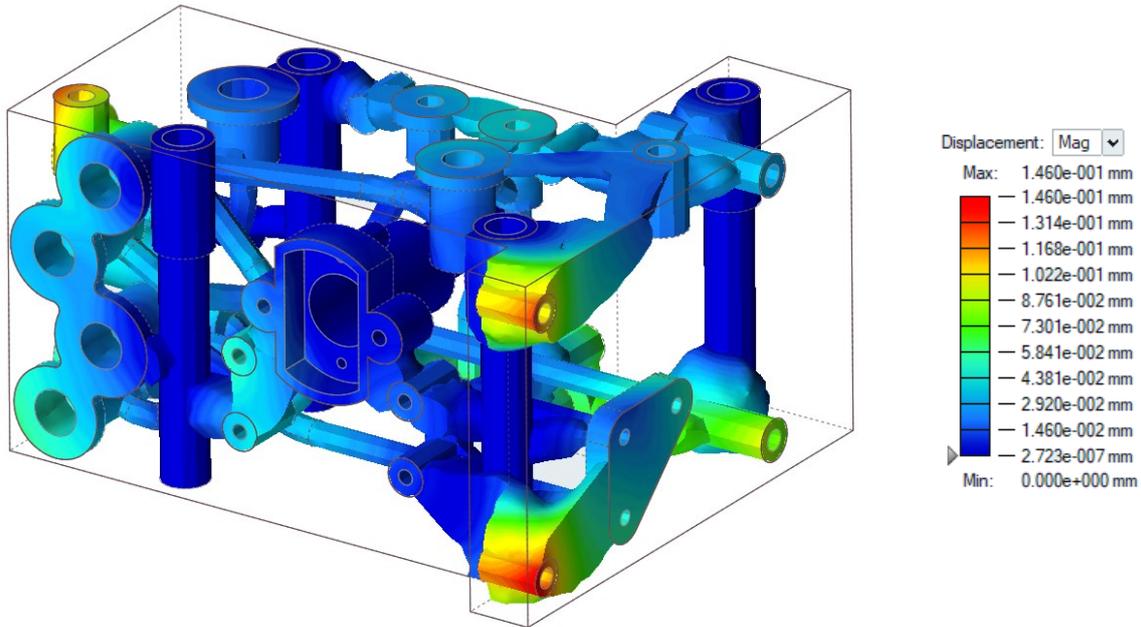
- Agli spessori (sono state condotte delle analisi degli spessori con software dedicati (SW));
- Alle rapide variazioni di sezione che avrebbero potuto portare a problemi di coefficiente di sicurezza;
- Al rispetto dei vincoli dimensionali, ovvero non uscire dal volume di design e quindi rispettare gli ingombri massimi di progetto;
- Ad eventuali altri difetti derivanti dalla ricostruzione, come parti tra loro sconnesse.

4.7.4 Ricostruzione del componente in lega di titanio

Dall'analisi preliminare del file da ricostruire, oltre agli spostamenti massimi e al coefficiente di sicurezza minimo, si è prestata particolare attenzione al rispetto del volume totale del pezzo per non andare a compromettere il montaggio futuro nell'assieme di cui fa parte questo componente. Si è fatto attenzione all'ingombro di massima e quindi a non uscire dai limiti individuati dal design space.

Le zone che risultano più critiche sono quelle che ci si aspettava nella zona dei fissaggi con l'altro blocco. Queste sono facilmente individuabili attraverso i colori evidenziati in legenda.





È stato necessario aggiungere materiale per creare dei collegamenti tra alcune zone di non design e quelle di design. Le zone scollegate erano localizzate in prossimità dei fori M12 e alcune delle sedi per le viti di attacco gas ed altre zone.

Essendo parti scariche, così come l'analisi statica iniziale sul pezzo riportava, queste non risultavano essenziali per supportare i carichi. Pertanto, sono state collegate in modo da utilizzare meno materiale possibile ma allo stesso tempo tenendo presente i parametri di produzione, avendo cura di creare dei bracci/linee di collegamento non troppo fini.

Dopo una prima ricostruzione della struttura sono emerse complicazioni a seguito di un'analisi preliminare in termini di coefficiente di sicurezza e rispetto della funzionalità del componente. In particolare, per garantire il corretto montaggio, nelle zone in prossimità dei fori passanti per i collegamenti filettati con l'altro blocco, è stato necessario assicurarsi che il materiale non andasse a collocarsi fuori dai limiti del domino nelle zone cerchiato in verde in figura. Inoltre, rispetto al design di partenza, sono state compiute delle modifiche per rispondere ad alcune necessità strutturali.

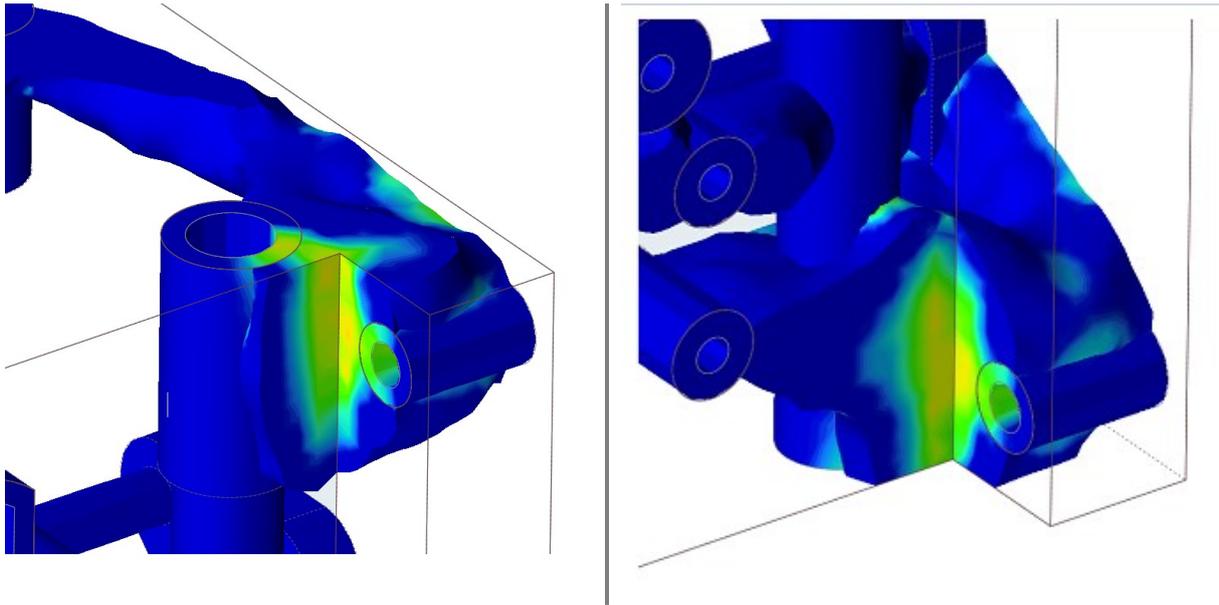


Figura 4.22.1

Nelle zone in figura, e in tutte quelle dove si verificano forti variazioni dimensionali si è avuto cura di mantenere il materiale all'interno degli ingombri e allo stesso tempo addolcire tali variazioni. Questo permette di rispettare i vincoli di progetto ed assicurare una buona propagazione delle tensioni, diminuendo quelle zone di concentrazione degli stress. Inoltre, in queste sarà necessario pensare a dei raccordi dove possibile.

Ad ognuna di queste, con l'obiettivo di ottenere il design migliore del componente, si è verificata la struttura tramite analisi FEM ed in accordo con queste, dopo diverse iterazioni, si è giunti al design finale, figura 4.23.

4.7.5 Verifica componente

Una volta che si è ottenuto il design finale sono stati eseguiti i raccordi nelle zone di connessione del design space e di non design in modo tale da distribuire al meglio le tensioni e diminuire i problemi indotti da brusche variazioni di sezione. Inoltre, tutti gli angoli acuti sono stati raccordati secondo le linee guida del DfAM (capitolo precedente).

Una volta completate queste modifiche il componente è stato verificato ancora una volta tramite un'analisi agli elementi finiti.

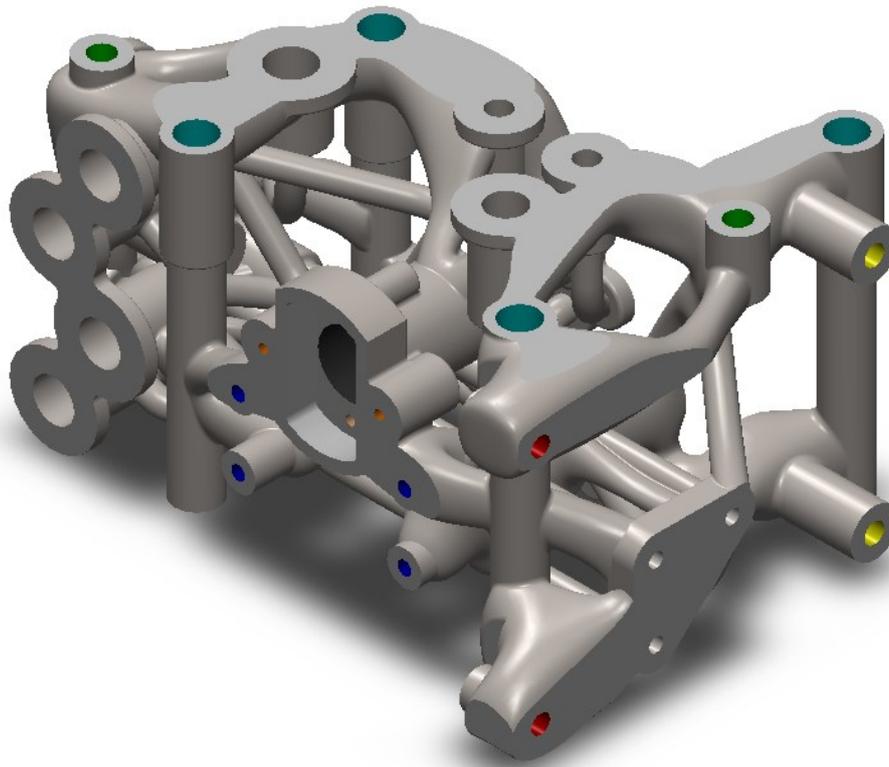


Figura 4.23 - Design Finale, raccordato

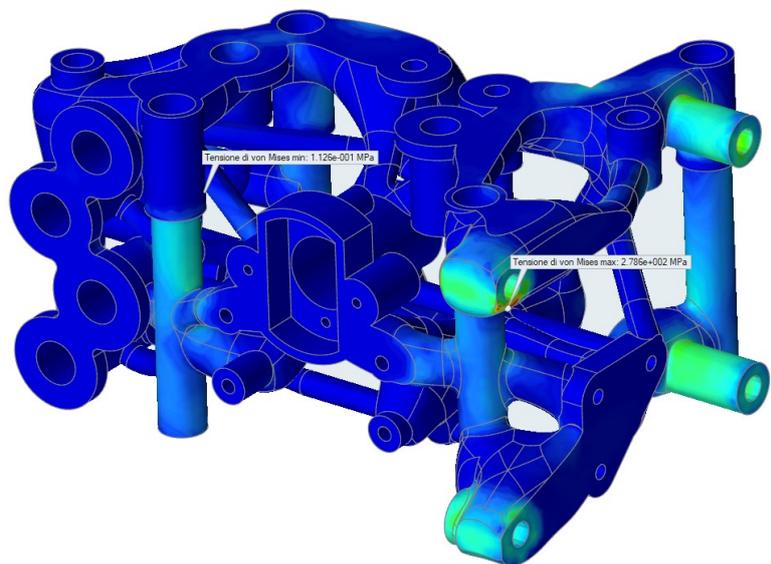
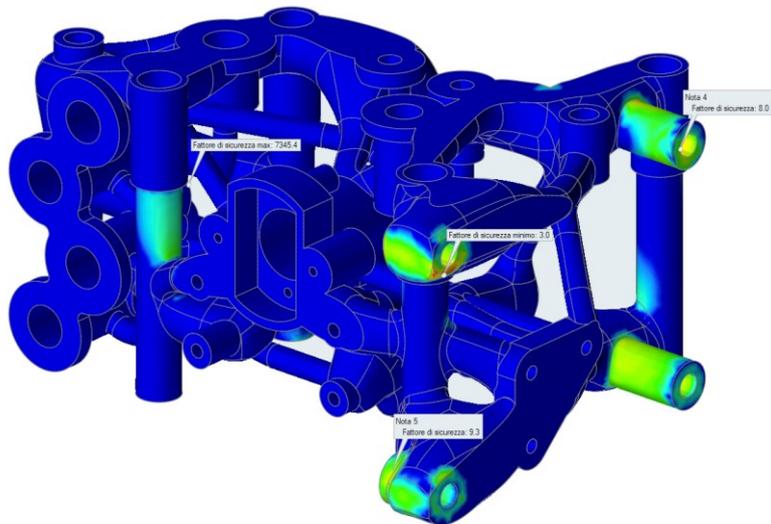
Dai risultati della analisi statica il componente definitivo è risultato verificato con valori del coefficiente minimo di sicurezza maggiori di 3 e spostamento massimo consentito inferiore al decimo di mm. Dalla tabella 10 si vede come questi valori oscillino in base al mesh ma essendo tutti maggiori del minimo richiesto si considera il componente come definitivo e verificato.

Tabella 11 - convergenza mesh pezzo definitivo per la produzione

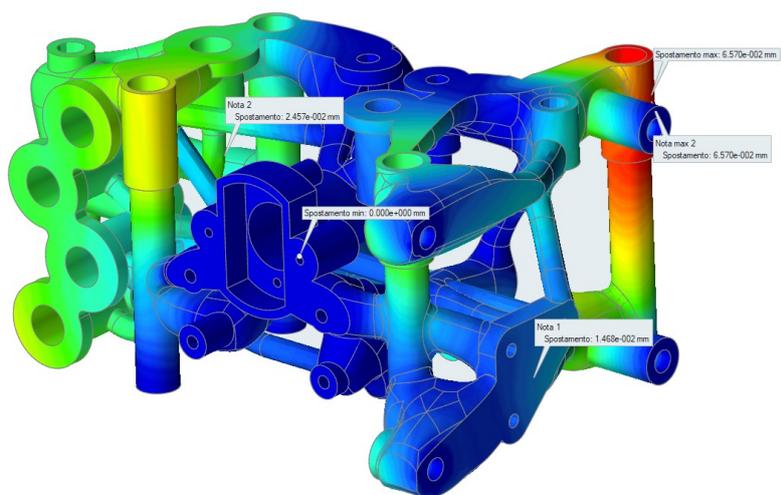
Mesh [mm]	Massimo spostamento [mm]	Coefficiente di sicurezza minimo	Massa totale [kg]
1	5.553e-02 mm	3.0	4,35 kg (-75%)
2	5.473e-02 mm	3.2	
3	5.415e-02 mm	2.8	
4	5.345e-02 mm	3.3	
5	5.945e-02 mm	3.5	

Fattore di sicurezza

Min: 3.0



Tensione di Von Mises
Max: 280 Mpa



Spostamento
Max: <0.2mm

4.8 Ciclo di lavoro del componente in macchina L-PBF

4.8.1 Superfici da rifinire e preparazione modello

Una volta che il design finale è stato verificato si deve preparare il modello in vista delle fasi successive, quindi in ottica della fase finale di produzione.

Infatti, come è stato anticipato nel paragrafo riguardo l'analisi critica del componente, per la produzione in SLM è necessario prevedere del sovrametallo in diverse zone per le successive lavorazioni alle macchine utensili.

In accordo con i tipici valori di sovrametallo per questo tipo di applicazioni e materiali e a seguito della consulenza con il reparto tecnico e gli addetti alla macchina, si è deciso di assegnare 1.5 mm di sovrametallo su tutte le geometrie da rilavorare.

Dall'analisi della messa in tavola 2D le zone da rilavorare sono tutte quelle geometrie preservate individuate e listate nella tabella 4.

Il valore scelto di sovrametallo è la quota necessaria di materiale per consentire le successive lavorazioni del pezzo durante il suo ciclo di lavoro e permettere di raggiungere le tolleranze dimensionali e geometriche richieste da 2D. Infatti, vista la grande quantità di tolleranze dimensionali di posizione è stato necessario anche prevedere almeno 1 mm di sovrametallo su tutte le facce del pezzo successivamente da fresare e quindi su tutte le superfici che sarebbero venute in contatto con la fresa. A titolo di esempio nella figura sottostante è mostrata in verde la quota di sovrametallo applicata alle features e sulla destra la parte dopo le lavorazioni finali.

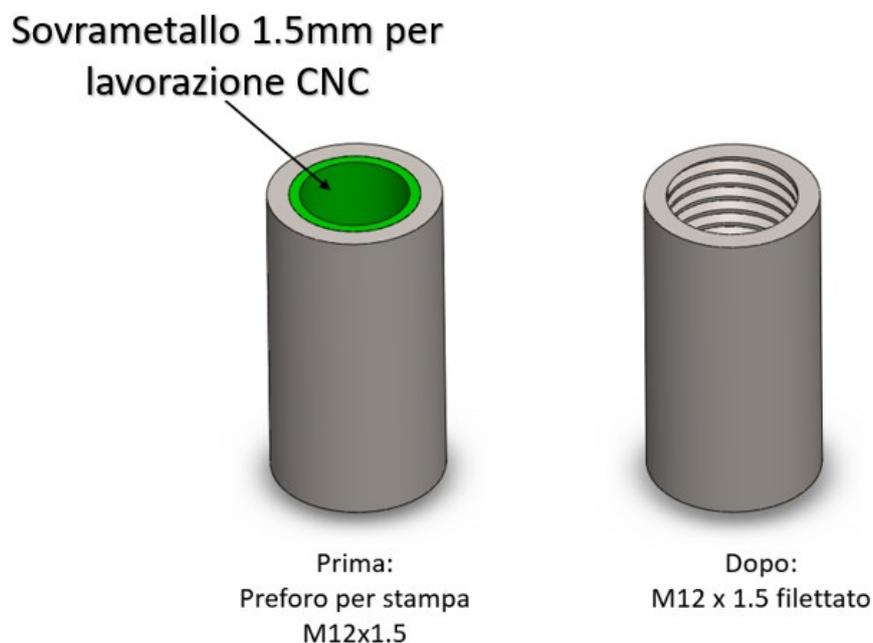
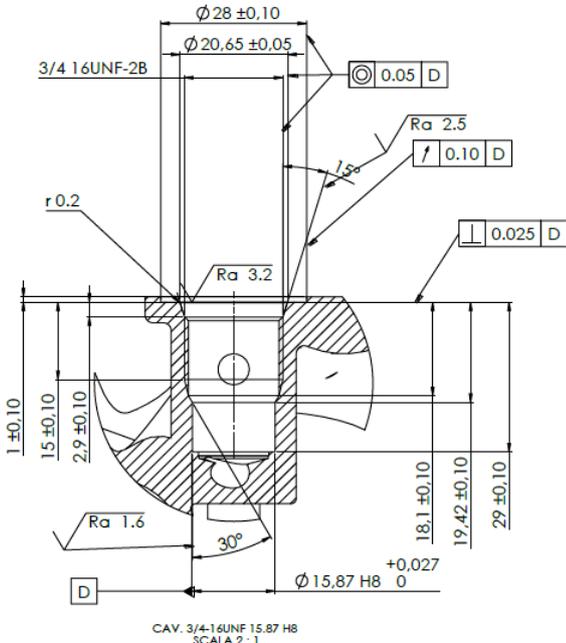
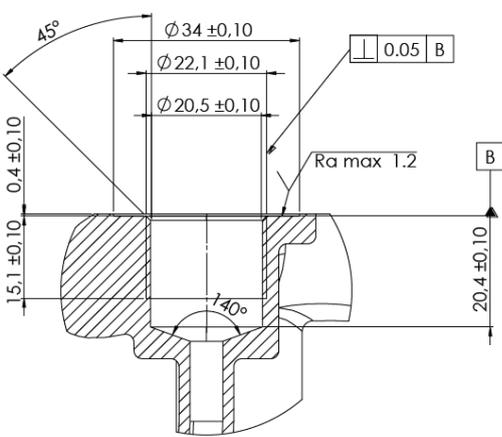
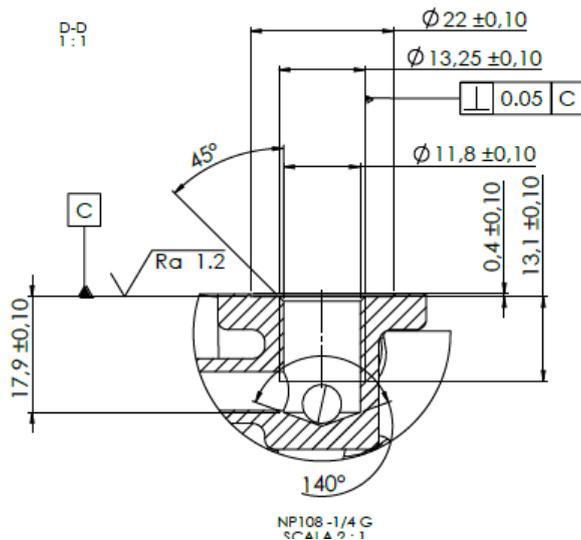


Figura 4.24

Le lavorazioni più critiche e problematiche dal punto di tecnologico sono sicuramente le filettature unificate degli attacchi gas. Queste, infatti, presentano diverse tolleranze geometriche per cui si dovrà prestare particolare attenzione. Nella tabella 11 sono mostrate le viste dettagliate in sezione delle tavole 2D e le relative tolleranze geometriche e dimensionali. Nota la difficoltà di lavorazione del titanio è stato necessario quindi prevedere 1.5 mm di sovrametallo sul raggio. Infatti, bisogna tenere conto anche di eventuali problemi sia durante la stampa sia durante le lavorazioni; ad esempio, ci potrebbe essere un errore durante le lavorazioni CNC o un forte ritiro termico del materiale durante la stampa.

Tabella 12 – Dettaglio viste 2D.

Disegno 2D- filettature attachi gas	Numero di features
	<p>5 x CAV.C019E</p>
	<p>5 x NP108-1/4"G</p>



4 x NP108-M22x1,5

Inoltre, per facilitare la comunicazione tra il reparto tecnico e quello progettista si è svolto un lavoro di revisione dei documenti 3D in modo che potessero essere chiari e facili da leggere. Si è deciso quindi di rifare le tavole 2D dei componenti in modo da centrare tutti i valori delle tolleranze richieste dalle specifiche del cliente, così che potesse essere più semplice la successiva interpretazione e applicazione.

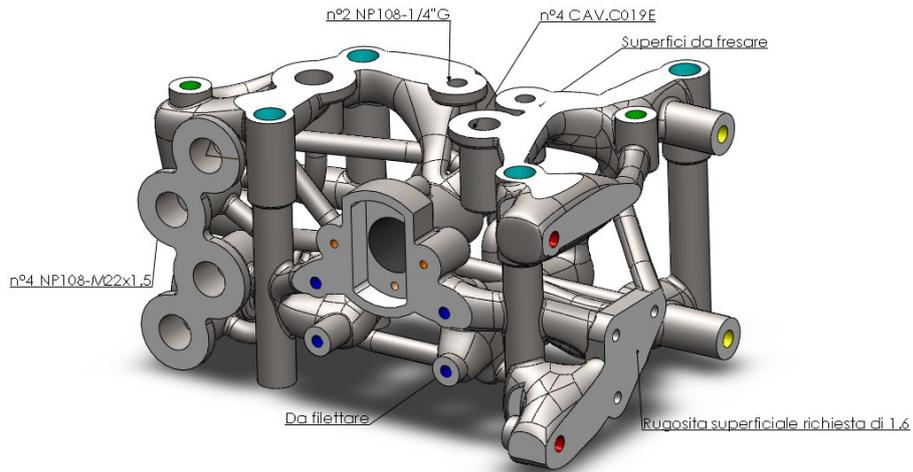
In vista delle seguenti lavorazioni alle macchine utensili CNC è quindi nata la necessità di fornire oltre che i file dei disegni 2D e il 3D da stampare anche un ulteriore file 3D di come sarebbe stato il pezzo a valle delle lavorazioni e quindi a meno del sovrametallo.

Questo file è quello che viene caricato e letto dalla CNC ed usato per creare i percorsi utensili per il raggiungimento delle tolleranze dimensionali del disegno.

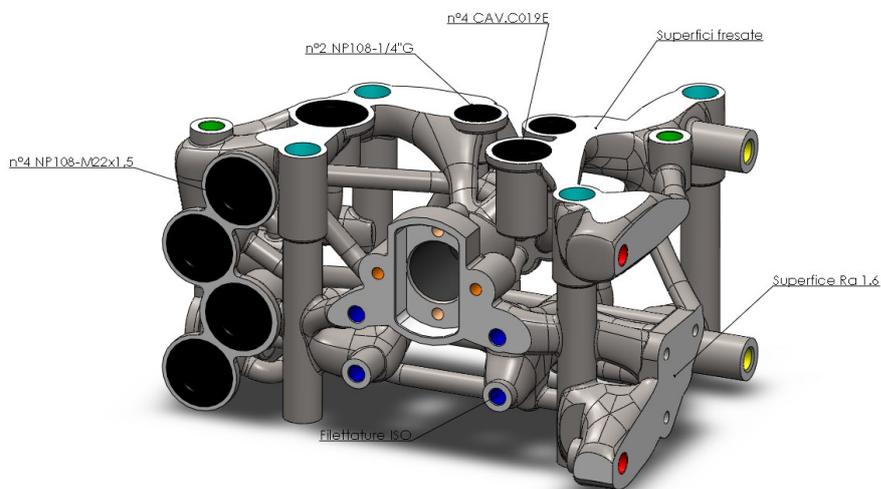
In figura 4.23 è mostrato il confronto dei due CAD prima e dopo le lavorazioni ed è possibile osservare, in particolare, le superfici colorate di bianco del pezzo prima delle lavorazioni. Queste, infatti, evidenziano le zone di sovrametallo del pezzo, ovvero tutte le zone in cui passa la fresa. Per questo scopo il file 3D del componente da stampare risulta avere tutte le superfici che delimitano il suo volume 1mm fuori. In Figura 4.26 i due CAD sono sovrapposti in modo da cogliere al meglio tali differenze.

Una volta apportato il sovrametallo e raccordato, il componente definitivo è pronto per la fase successiva, ovvero l'effettiva messa in macchina.

Le operazioni di questa fase finale sono la scelta di un orientamento per la stampa ed eventuali modifiche che questa fase spesso richiede. Come è stato possibile sottolineare nei paragrafi precedenti, questo processo risulta spesso iterativo e non privo di sfide per poter stampare in modo efficace un pezzo cercando il miglior compromesso tra costi e risultati.



**Geometria prima
delle lavorazioni
finali CNC**



**Geometria a valle
delle lavorazioni
CNC**

Figura 4.25

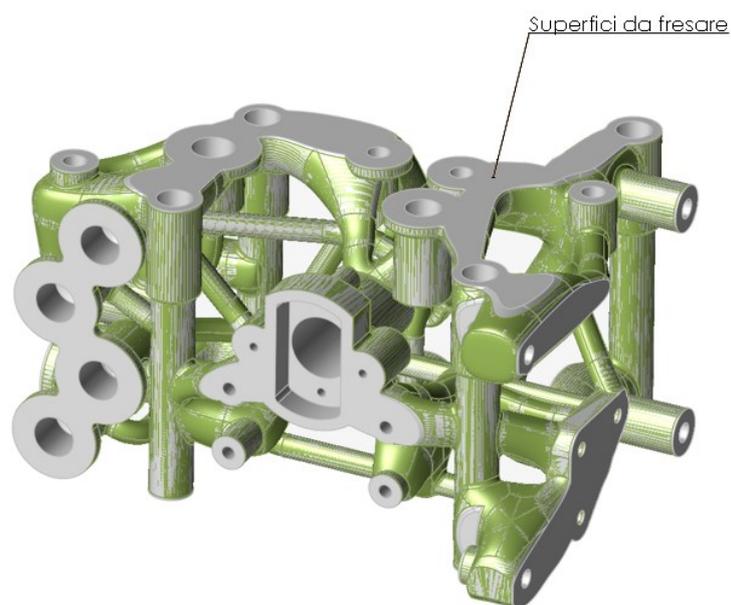


Figura 4.26 In verde il componente dopo le lavorazioni CNC, in bianco il componente prima della stampa

4.8.2 Preparazione per la produzione mediante L-PBF – lattice infill

Una volta ottenuto e verificato il design finale del componente, lo step successivo è quello della messa in macchina e della stampa. In questa fase le operazioni più importanti sono la scelta dell'orientamento in macchina sul piano di lavoro e la generazione dei supporti.

Sia la complessa geometria ottenuta nel design finale che i vincoli particolari di questo progetto risultano essere una challenge anche per le tecnologie additive. Infatti, il componente così progettato avrebbe la necessità di molte e vaste strutture di supporto. Questo inciderebbe oltre che sulla velocità di stampa e sulla qualità superficiale anche sul prezzo.

Infatti, poiché i supporti sarebbero dello stesso materiale del pezzo, le attività di rimozione sarebbero lunghe e molto costose.

Dalle immagini anteprima delle zone di supporto mostrate nelle figure in Tabella 12 si evince quanto estese siano queste aree e quindi quante strutture di supporto servirebbero per stampare il pezzo. Una prima soluzione, quella più banale, è il posizionamento orizzontale del pezzo, parallelo al piano XY, così che la geometria cilindrica più grande sia quella più favorita.

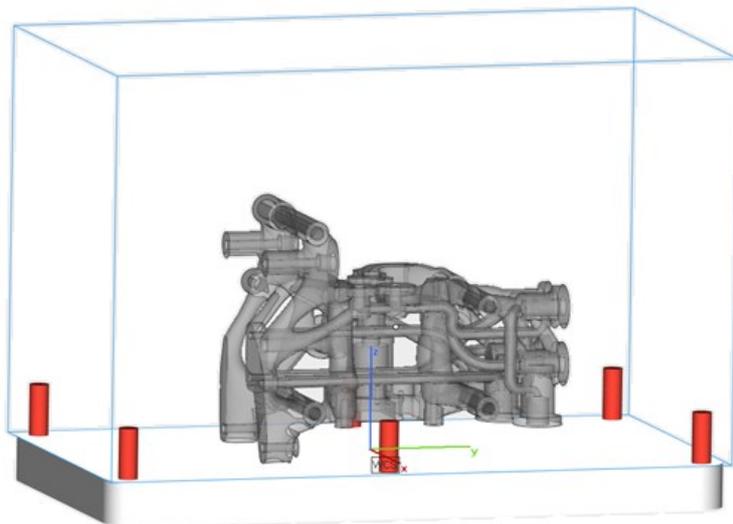
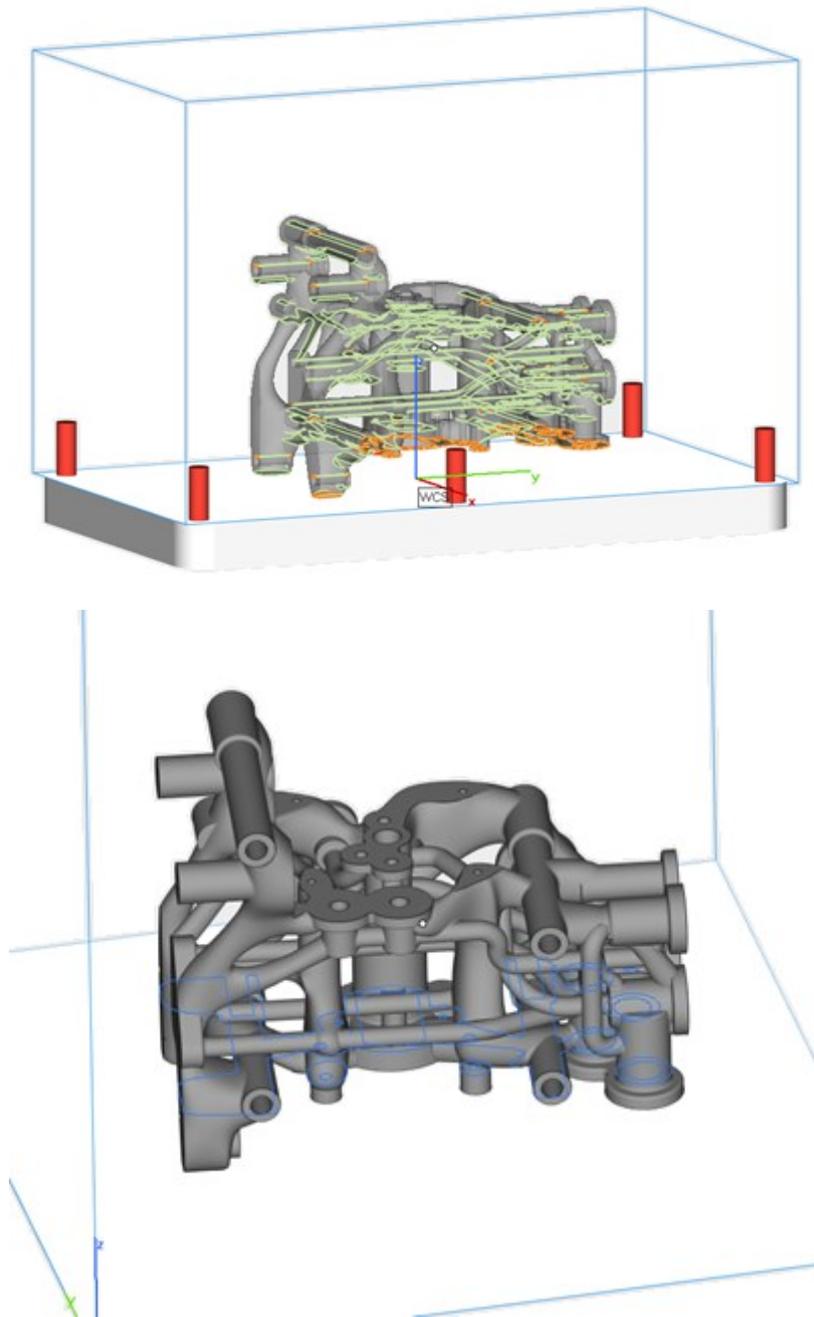


Tabella 13

Misurazioni	
Altezza Z	192,990
Proiezione XY	27783,467
Superficie supporto	42649,253
Sezione XY massima	9040,628

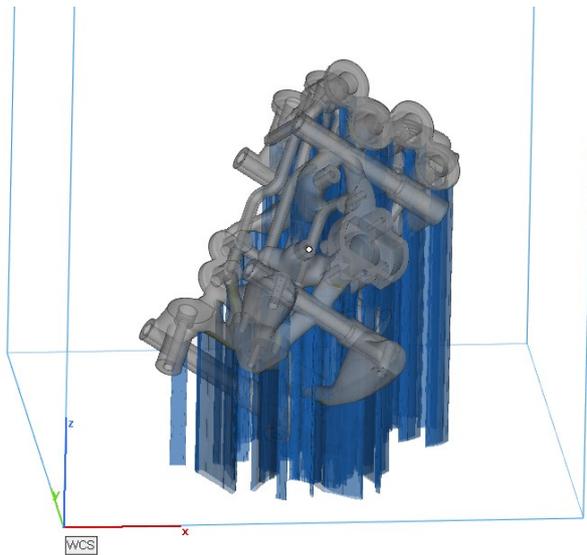


Nelle figure è possibile vedere e apprezzare qualitativamente le zone (in verde) che necessiterebbero di strutture di supporto, mentre in arancione sono segnate tutte le superfici rivolte verso il basso, ovvero tutte quelle che avrebbero una finitura superficiale peggiore.

Tuttavia, data appunto la complessità di tale struttura, e soprattutto la forma e la posizione di tutte le geometrie preservate, per facilitare la stampa e la generazione di supporti è necessario trovare dei compromessi di posizionamento.

Software come l'ormai noto Magics hanno la possibilità di valutare molte opzioni diverse di posizionamento andando ad ottimizzare alcuni parametri come la superficie massima XY, il numero e il volume di supporti etc. In questo modo è stato possibile confrontare diverse opzioni.

Tabella 14



Misurazioni	
Altezza Z	290,194 mm
Proiezione XY	34472,724 mm ²
Superficie supporto	7656,743 mm ²
Sezione XY massima	3637,276 mm ²

Figura 4.22

Nella figura 4.22 è mostrata una soluzione tra le migliori proposte dal software per ottimizzare sia la sezione XY massima che la superficie ed il numero di supporti.

Infatti, dalla comparazione delle due tabelle 12 e 13 è possibile notare la forte riduzione di questi valori rispetto ad un orientamento come quello in figura 4.21.

Questo confronto è stato mostrato con il proposito di dare l'idea di quali siano le complessità durante la generazione dei supporti, mostrare una valutazione dei migliori orientamenti e offrire una stima qualitativa del numero di supporti che una geometria di questo tipo necessita. Non di meno anche per dare un'idea dei costi relativi alla rimozione di supporti così numerosi e complessi.

Tuttavia, considerati tutti questi aspetti, ovvero i vincoli funzionali che sono stati citati nei paragrafi precedenti, l'analisi dei costi per l'eventuale rimozione dei supporti, si è cercata una soluzione alternativa che potesse soddisfare tutti i requisiti.

L'alternativa proposta e successivamente scelta insieme al reparto tecnico è stata quella di sostituire i supporti con struttura che riempisse tutto il volume. Si è deciso quindi ricorrere ad una struttura *lattice* che non avrebbe dovuto essere rimossa e che

avrebbe conferito il giusto sostegno al componente permettendo di ridurre al minimo altre strutture di supporto. Tuttavia, l'obiettivo è stato quello di garantire il minor peso al fine di evitare oltretutto l'incremento dei costi dell'intero componente.

La struttura che è stata scelta per fare l'infill del componente è stata una struttura cellulare (lattice) *gyroid*. Nel paragrafo dedicato al DfAM, si è fatto un cenno su queste strutture, le loro caratteristiche, proprietà e applicazioni.

Note anche come **equation-driven structures**, esse hanno infatti la caratteristica di essere molto leggere e capaci di adattarsi al meglio a questo genere di applicazione, riempiendo completamente il volume mancante del blocco e fungendo da ottimi supporti dello stesso. In figura 4.27 è proposto il render della struttura:

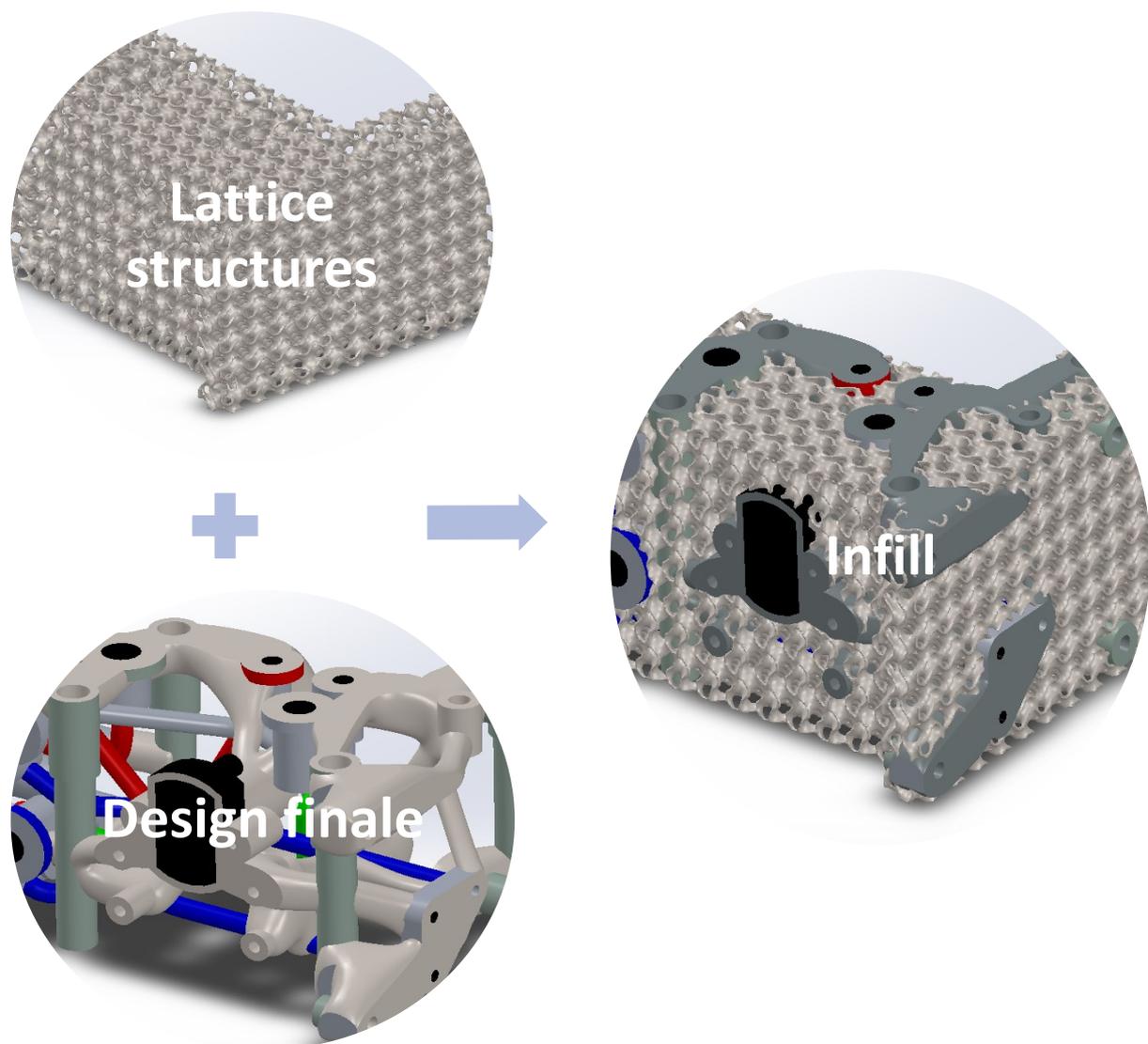


Figura 4.27

Tra questo tipo di strutture reticolari (TPMS Lattice) quelle a diamante e a giroide sono quelle maggiormente utilizzate grazie alla loro idoneità nella funzione di supporto oltre che consentire la riduzione di materiale e il tempo di costruzione pur soddisfacendo le esigenze strutturali richieste da una struttura metallica di supporto.

I risultati sperimentali ad oggi pervenuti e l'esperienza del reparto tecnico hanno confermato che è effettivamente possibile ottenere un potenziale risparmio di materiale se si utilizza una struttura di supporto di questo tipo con frazioni di volume piccole. Ad esempio, è stato possibile produrre strutture reticolari giroidali con volumi relativi anche di circa 8%. Ciò significa che il +90% delle polveri può essere facilmente rimosso e riciclato con conseguente elevatissimo risparmio di peso. La frazione a basso volume per le parti SLM consente anche un tempo di costruzione minimo e una potenza assorbita inferiore. Infine, le strutture di supporto di questo genere mostrano buone caratteristiche di fabbricazione; tuttavia, possono presentare dei problemi, come ad esempio:

- A causa della bassa % di frazione di volume, queste strutture possono risultare troppo fragili ed essere difficilmente prodotte con processo SLM.
- Per celle di grandi dimensioni, la distanza tra i punti di contatto adiacenti alla superficie di appoggio è troppo grande; quindi, c'è troppo materiale non supportato e la parte è distorta dalle sollecitazioni termiche.

Va notato che molti fattori devono essere considerati durante la progettazione e la produzione di strutture di supporto reticolare più efficienti. È necessario raggiungere un compromesso tra la migliore combinazione di *dimensione della cella* e *frazione di volume* che sia stampabile, veloce da costruire e con buone proprietà termiche e meccaniche per limitare la deformazione garantendo al contempo una costruzione affidabile della parte.

Una volta eseguita l'operazione di *infill* della struttura di supporto nel componente finale (Figa 4.25) anche il posizionamento in macchina risulta più semplice. Infatti, grazie a questa struttura è stato necessario solo la generazione di qualche struttura di supporto interna al componente ma tuttavia nelle zone da rilavorare. In questo modo tutti i canali interni sono stati lasciati liberi dai supporti.

Il componente è stato orientato con l'asse delle sedi delle viti M12 per fissare il pezzo a terra parallelo all'asse di crescita Z rivolto verso l'alto e ruotato di qualche grado rispetto all'asse y della lama, Figura 4.28 di seguito.

Come è possibile osservare in figura sono stati stampati insieme al pezzo anche delle colonne successivamente utilizzate come fissaggi per il pezzo nelle operazioni in CNC.



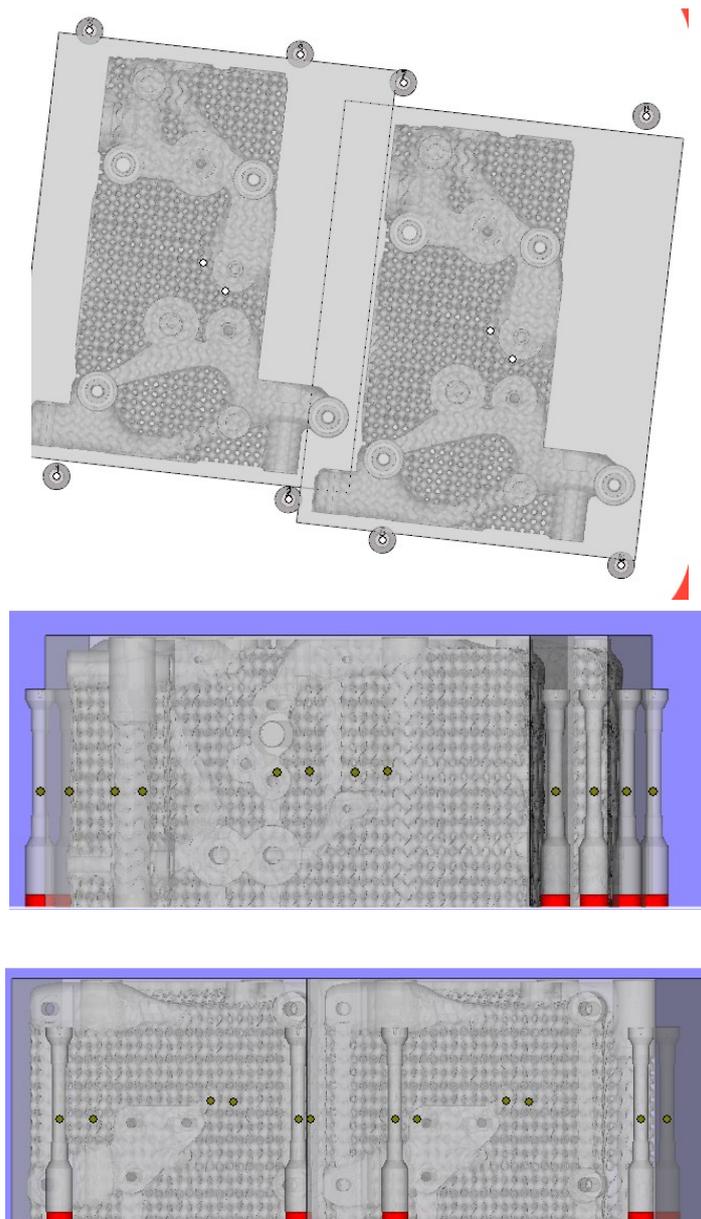


Figura 4.28 – Posizionamento del pezzo sulla piastra di costruzione

4.9 Processo di stampa

4.9.1 La macchina - MetalFAB1 Additive Industries

La macchina che ha stampato i componenti progettati è la MetalFAB1 dell'azienda additive Industries.

L'Additive Industries è una produttrice di stampanti 3D metallo di alta qualità. Offre dei sistemi rivolti specificatamente a mercati industriali di fascia alta ed esigenti, con

soluzioni che soddisfano i volumi di costruzione, robustezza e produttività ai vertici della categoria.

Con sede nei Paesi Bassi, Additive Industries dispone di centri dimostrativi e di assistenza negli Stati Uniti, nel Regno Unito e a Singapore ed è un attore chiave a livello mondiale nei sistemi di stampa di metalli di grandi dimensioni.

Fondata nel 2012 nel "Brainport Ecostructure" intorno a Eindhoven nei Paesi Bassi, Additive Industries è il primo produttore di apparecchiature dedicato al mondo dei sistemi di produzione additiva di metalli. Basandosi sui sistemi high-tech e sul patrimonio elettronico di questa regione, i fondatori Jonas Wintermans e Daan Kersten hanno creato un'azienda di professionisti di talento impegnati nell'industrializzazione della stampa 3D utilizzando i principi di "innovazione aperta" per sfruttare questa tecnologia. Additive Industries ha clienti rinomati come il Team di Formula Uno Alfa Romeo Racing ORLEN, ArcelorMittal, K3D, il Gruppo Volkswagen e molti altri. [37]

Additive Industries ha diverse offerte di macchine con opportunità flessibili. La macchina su cui è stato stampato il componente oggetto di questo lavoro è la più grande, la MetalFAB1. La MetalFAB1 è una stampante 3D industriale che utilizza un sistema a fusione a letto di polvere con più laser. Infatti, questa stampante 3D in metallo è dotata di quattro laser a pieno campo e offre un ampio volume di costruzione.

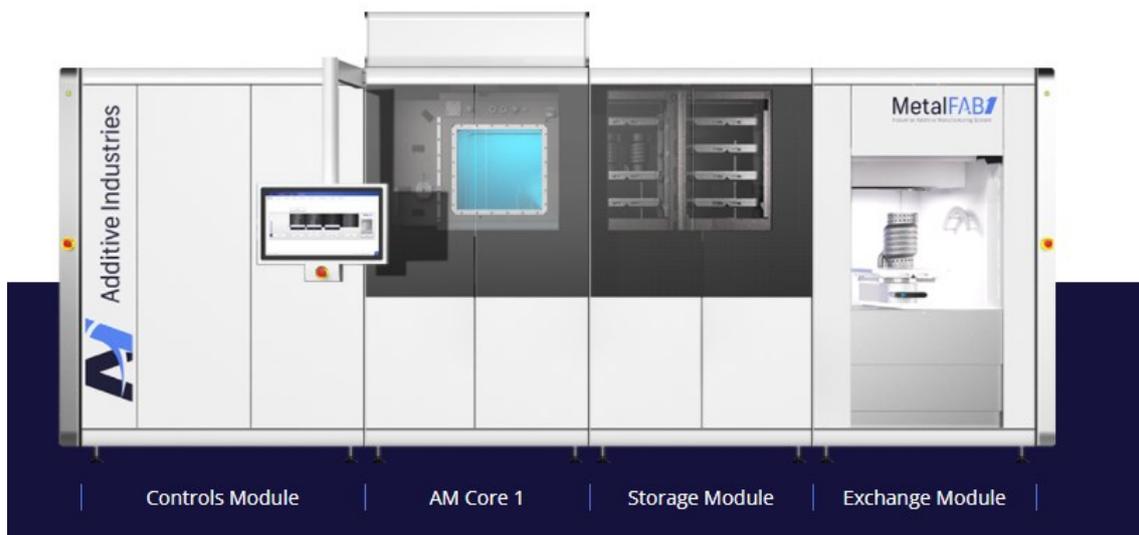


Figura 4.29 - Configurazioni a moduli MetalFab1. [38]

Il MetalFABI ha un'architettura modulare. Ciò consente all'utente di iniziare con una configurazione di base della macchina con l'opzione di ampliare la produttività del processo. Inoltre, è possibile aggiungere moduli (vedi Figura 4.29) per consentire l'utilizzo di più materiali in un'unica macchina senza dover pulire il sistema polvere e correre il rischio di contaminazione incrociata.

Più fasi del processo sono combinate in un'unica macchina utilizzando la gestione automatizzata per ridurre il lavoro manuale, migliorare la conformità e la qualità del prodotto e aumentare la sicurezza dell'operatore. L'architettura modulare MetalFABI garantisce la massima flessibilità e consente all'utente di definire configurazioni personalizzate da 3 a 11 moduli e aggiungere ulteriori laser e ottiche in base alle future esigenze di produttività.

Infatti, l'architettura modulare di MetalFABI rende il sistema aggiornabile per migliorare la produttività in un secondo momento con laser aggiuntivi, più tipi di materiali (moduli AM Core aggiuntivi) e moduli funzionali aggiuntivi per l'automazione dei processi e polvere ridotta esposizione (modulo di scambio, modulo di stoccaggio) e post-elaborazione (trattamento termico).

4.9.1.1 Soluzione modulare - I moduli

Come da specifiche la macchina si compone di vari moduli che vengono di seguito brevemente riassunti e si possono vedere in figura 4.30

Modulo Control

Il Modulo Control ospita una serie di componenti principali per un funzionamento sicuro:

- Quadro elettrico e collegamento alla rete;
- Hardware di controllo del sistema;
- Fornitura e condizionamento gas di processo;
- Fornitura e condizionamento del gas di trasporto;
- Refrigeratore dell'acqua di raffreddamento (scambiatore di calore acqua-acqua);
- Filtro a lunga durata basato sulla tecnologia di rivestimento in gesso per neutralizzare particelle di polvere reattive;
- Alloggi laser (1-4).

Caratteristiche principali:

- Basso consumo di gas inerte (Argon o Azoto);
- < 100 ppm O₂ per la sicurezza e la qualità del processo.



Modulo AM Core

Il modulo AM Core è il cuore del sistema MetalFAB1 e insieme al modulo Exposure, l'AM Core produce parti utilizzando la fabbricazione additiva per fusione a letto di polvere laser con un massimo di quattro laser da 500 [W] (1 [kW] sottosviluppo).

È il modulo di produzione principale del sistema MetalFAB1 e si compone dei seguenti sotto moduli:

- Camera di costruzione con piattaforma riscaldata;
- Lama (recoater), bidirezionale per l'aggiunta di polvere in ogni direzione;
- Sistema di movimentazione della polvere per il caricamento della polvere;
- l'estrazione della polvere (pulizia della polvere dai prodotti) e il riciclaggio completo della polvere.

Caratteristiche principali

- Volume netto di costruzione netto: 420 x 420 x 400 [mm] (x-y-z)
- Riscaldamento della piastra di costruzione per temperature di produzione elevate fino a 175 [°C] per il preriscaldamento della polvere;
- Livellamento automatico della piastra di costruzione;
- Sistema di estrazione e riciclaggio delle polveri completamente automatizzato;
- Atmosfera inerte costantemente monitorata per la polvere durante il funzionamento e conservazione;

Modulo Exposure

Il modulo Exposure funziona insieme all'AM Core per fornire l'energia termica necessaria per fondere la polvere di metallo ed è il cuore ottico del sistema ed è costituito dai seguenti sotto moduli:

- Laser;
- Sistema/i di deflessione del raggio e messa a fuoco (lenti galvanometriche);
- Copertura completa dell'area della piattaforma per tutti i laser;
- Sistema di calibrazione;

Caratteristiche principali

- 500 [W] (1 [kW] in fase di sviluppo), 1070 [nm] fibra di Yb;
- Capacità di scansione vettoriale a pieno campo quadrato 420 [mm];
- Messa a fuoco regolabile;
- Auto calibrazione automatica;



Modulo Storage

Le piastre di costruzione con e senza parti stampate su di esse sono alloggiare nel modulo di *storage* in attesa di ulteriori elaborazioni o scarico dal sistema. Questo modulo consente al sistema di operare in modo più autonomo con pochi o assenti interventi dell'operatore. Più job possono essere eseguiti autonomamente per periodi estesi fino a un minimo di 112 [ore]. Caratteristiche principali:

- Capacità di immagazzinamento 8 piastre di costruzione vuote e altrettante prodotti e piastre di costruzione entro il volume massimo disponibile nel modulo;
- Design adatto a diverse altezze del prodotto (fino a 400 [mm]);
- Il modulo di immagazzinamento supporta facilmente le operazioni a turno.

Modulo Exchange Module & Handling Robot (scambio e robot di movimentazione)

Il Modulo Exchange fornisce l'interfaccia tra il sistema e l'operatore. Il modulo fornisce una piattaforma di carico/scarico per caricare piastre di costruzione vuote o scaricare lavori di costruzione finiti.

È possibile accedere facilmente e in sicurezza al modulo di scambio dall'esterno con lo strumento di manipolazione delle piastre di costruzione di Additive Industries, un carrello elevatore o una gru di movimentazione. Un' aspirapolvere è integrato nel modulo di scambio per la rimozione facile e sicura di eventuali residui di polvere nelle strutture di supporto o polvere intrappolata nei canali.

Il modulo Exchange memorizza anche le due piastre di calibrazione per la calibrazione automatica tra due lavori. In combinazione con il robot di movimentazione, il modulo di scambio organizza il trasporto completamente automatizzato delle piastre di costruzione vuote o dei prodotti finiti tra i singoli moduli come AM Core, trattamento termico e stoccaggio. In figura 4.26 è mostrata una vista in sezione della macchina con tutti i moduli appena descritti. (caratteristiche tecniche in tabella 15).

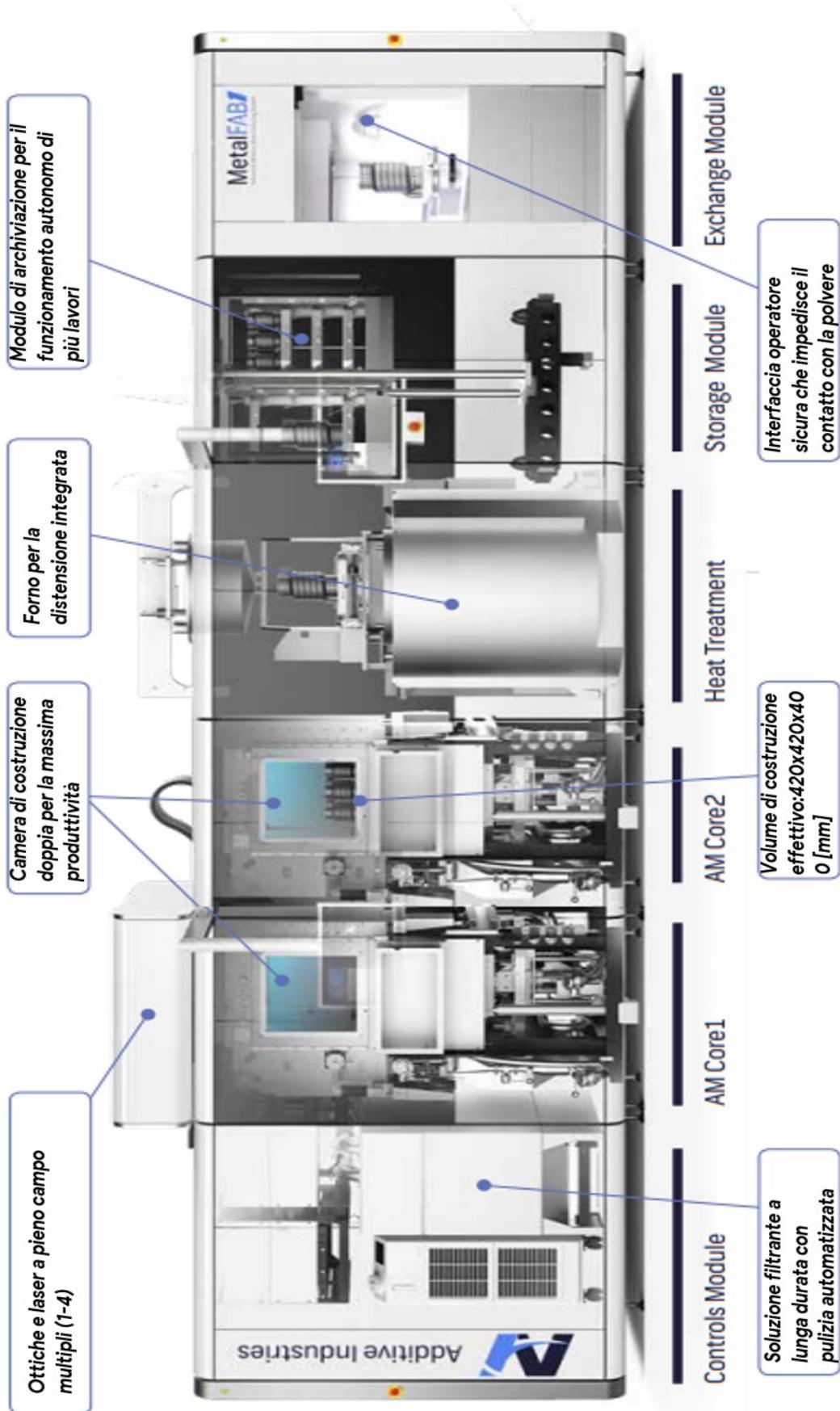


Figura 4.30 Descrizione Moduli e identificazione.

Tabella 15 – Specifiche tecniche dalla brochure del produttore. [37]

MetalFAB1 specifiche tecniche	
Tipo di processo	Laser Beam Powder Bed Fusion
Volume di costruzione netta	420 x 420 x 400 [mm]
Laser	Yb, Laser a fibra 500W
Numero di Laser	Da 1 a 4, prevenendo le regioni di sovrapposizione del laser
Configurazioni	Configura da 3 a 11 moduli per una maggiore produttività o automazione della post-elaborazione
Piano di costruzione	Livellamento e posizionamento automatizzati
Gestione polvere	Estrazione, setacciatura e riciclaggio automatizzati durante il ciclo di costruzione
Operazioni in autonomia	112 [ore], massimo 8 lavori di costruzione
Produttività	Fino a 1.000 dm ³ /anno (con 4 laser, a seconda del materiale)
Accuratezza	< 0.050 + 0.002 x lunghezza partel [mm]
Riproducibilità	< 0.050 [mm]
Spessore strato	20-100 μm
Calibrazione ottica	In linea, automatizzato, laser-2-laser e messa a fuoco
Sicurezza	Nessuna esposizione diretta alla polvere durante le normali operazioni
Posizione storage	8 piatti di costruzione vuote
Preparazione dei job	Configurazione fuori linea, assegnazione laser dinamica
Accesso remoto & monitoraggio	Sì, tramite Additive World Platform
Controllo qualità	Monitoraggio del processo PrintRite 3D di SigmaLabs
Materiali	Titanium (Ti6Al4V), Aluminium (AlSi10Mg), ScalmAlloy®, Stainless Steel (316L), Inconel (IN718), Tool Steel (1.2709)
Preriscaldamento	175 °C

4.9.2 Controllo qualità – PrintRite3D

Come la maggior parte dei sistemi industriali, questa macchina è dotata di un modulo di controllo della qualità del processo di stampa.

Questi sistemi hanno come scopo il controllo qualità in tempo reale, il conferimento di un'elevata fiducia nel processo di produzione e la ripetibilità del processo.

Anche se ciascuno di questi presenta delle caratteristiche diverse, tuttavia, tutti si basano fondamentalmente sullo stesso principio (come è stato indicato nei capitoli precedenti).

Il Controllo qualità di cui è dotata la MetalFab1 e chiamato PrintRite3D ed è una tecnologia IPQA che™ monitora la qualità e l'affidabilità dei pezzi prodotti in additive, garantendo un controllo di qualità costante durante il processo di produzione. I principali problemi e le correlate soluzioni sono brevemente riportati nella tabella 16 di seguito:



Tabella 16 – Tabella problemi vs soluzioni IPQA PrintRite3D. [38]

Problemi nei processi AM	Soluzione possibili con PrintRite3D
<ul style="list-style-type: none"> 7-9 iterazioni sul disegno per ottenere risultati desiderati 	<ul style="list-style-type: none"> Visualizzazione locale delle non conformità termiche, classificazione delle anomalie, aggiustamento specifici parametri, miglioramento delle conoscenze per la progettazione.
<ul style="list-style-type: none"> Crash della lama 	<ul style="list-style-type: none"> Identificazione distorsioni termiche
<ul style="list-style-type: none"> Distribuzione irregolare della polvere 	<ul style="list-style-type: none"> TED (densità emissione termica) mappatura termica
<ul style="list-style-type: none"> Flusso del gas non uniforme 	<ul style="list-style-type: none"> TED (densità emissione termica) mappatura termica
<ul style="list-style-type: none"> Variazioni da macchina a macchina 	<ul style="list-style-type: none"> TED metrico per quantificare il profilo termico del melt pool tra le macchine
<ul style="list-style-type: none"> Degradazione del Laser 	<ul style="list-style-type: none"> SPC (controllo statistico del processo) del TED metrico

Un sistema di processo in Real time è tipicamente composto dai componenti in figura 4.31.

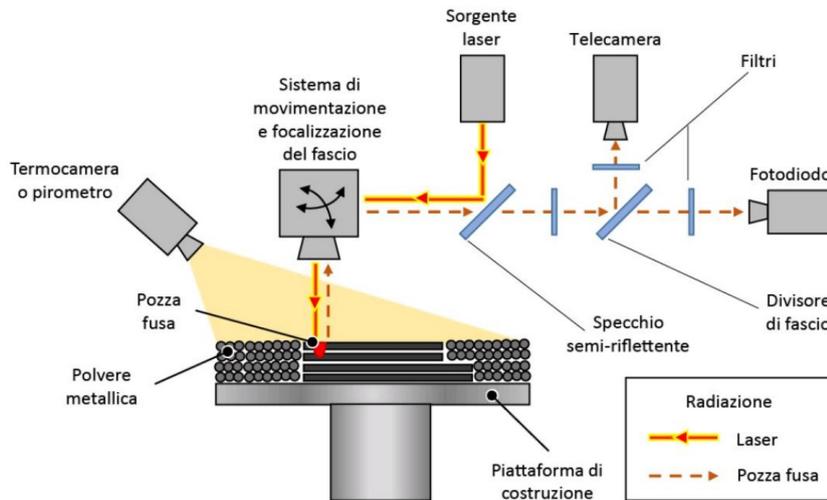


Figura 4.31 – Schema qualitativo del processo di controllo qualità in process. [39]

Questi controlli in tempo reale grazie al sistema di termocamere e sensori permettono di catturare e monitorare il pool di fusione e il flusso di calore globale di tutti i layer di stampa.

Grazie all'analisi dei dati è possibile estrarre le principali metriche termiche e dimensionali.

Alcuni sistemi di controllo permettono anche delle funzioni di controllo del processo, queste forniscono dei feedback in sistemi ad anello chiuso per regolare i parametri di

processo in base alle differenze tra le misure in tempo reale e il set point definito dall'utente.

I trattamenti termici in forno o HIP possono essere utilizzati per ridurre le sollecitazioni termiche, omogeneizzare le microstrutture o modificare le proprietà meccaniche. Inoltre, per ottenere il pezzo definitivo potrebbe essere necessaria la lavorazione CNC per il raggiungimento delle tolleranze e la realizzazione di tutte le features.

4.10 Ispezione e lavorazioni alle macchine utensili

Le operazioni da svolgere una volta stampato il pezzo sono molteplici. L'entità e le dimensioni delle operazioni di post processo dipendono fortemente dal tipo di tecnica usata e da quali tolleranze rispettare. Se le tolleranze da soddisfare sono strette l'entità delle lavorazioni a cui un componente dovrà essere sottoposto possono essere molto elevate. Le tipiche operazioni di post processo includono (non sempre in questo ordine preciso):

- Rimozione della polvere;
- Trattamento termico;
- Rimozione del pezzo dalla piastra di base;
- Rimozione dei supporti se esistenti;
- Finitura;
- Pulizia;
- Controllo qualità come:
 - Ispezione a raggi X per controllare elementi interni
 - Scansione ottica per controllare accuratezza dimensionale
 - Ed altri.

Il componente in questione ha seguito ognuna di queste fasi. Vista la necessità di operazioni di post processo quali la creazione di tutte le filettature per le viti e attacchi Gas, il processo di controllo dimensionale è avvenuto sia prima delle lavorazioni che dopo.

Per la rimozione della polvere, come trattamento superficiale è stata eseguita sulla parte una semplice operazione di sabbiatura, questa permette anche la pulizia del pezzo.

Successivamente, il trattamento di post processo a cui è stato sottoposto è stato un trattamento termico di invecchiamento a 720°C per 2 ore. Tale trattamento tipicamente si esegue dopo la costruzione del pezzo poiché non altera in modo



significativo le dimensioni dello stesso. Questo permette la formazione di precipitati estremamente fini portando ad un indurimento della lega.

Infatti, con le tecniche di AM quali L-PBF si hanno velocità di solidificazione così elevate che si formano dei precipitati nanometrici. Anche se non è sempre accade, solitamente i processi di questo tipo permettono di evitare di fare trattamenti di solubilizzazione e poi di invecchiamento poiché la microstruttura è già costituita da precipitati fini. Perciò a volte è possibile passare direttamente ad un trattamento di invecchiamento (termico) risparmiando tempi e costi.

Una volta pulito e rimosso dalla piastra di base il pezzo è stato sottoposto ad un'analisi dimensionale tramite scansione 3D. A questo scopo è stato utilizzato il GOM ATOS Compact Scan 12M, un sistema ottico a luce strutturata. In figura 4.32 è possibile osservare il pezzo sotto la tipica luce blu dello scanner 3D ancora con i supporti prima delle lavorazioni successive. Queste potranno iniziare solo una volta che verrà eseguito il controllo dimensionale.

Infatti, grazie alle funzionalità dei software si può facilmente mettere a confronto i pezzi stampati con le relative matematiche CAD nominali, verificando tolleranze geometriche ed eseguendo automaticamente il controllo di ogni tipologia di componente.

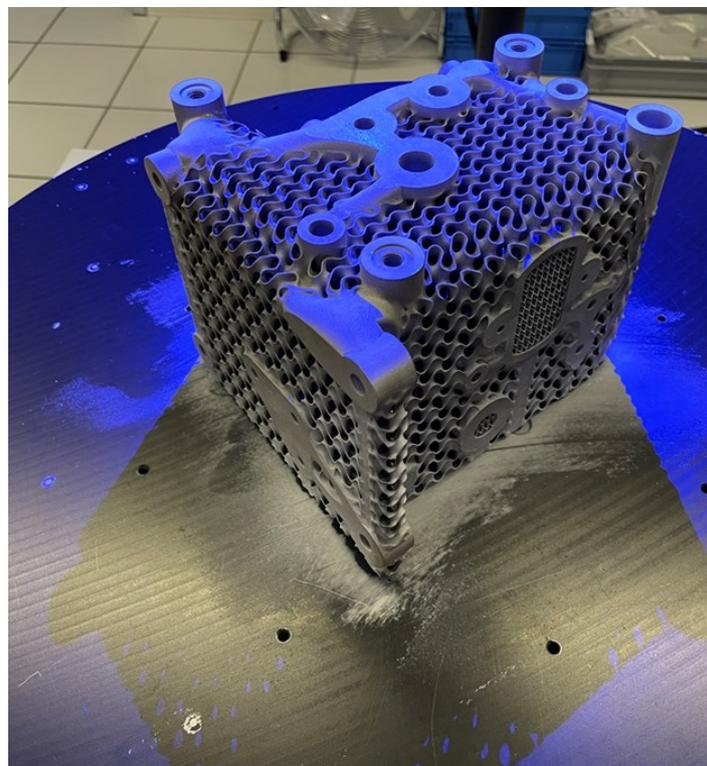


Figura 4.32 – Blocco idraulico durante il controllo dimensionale.

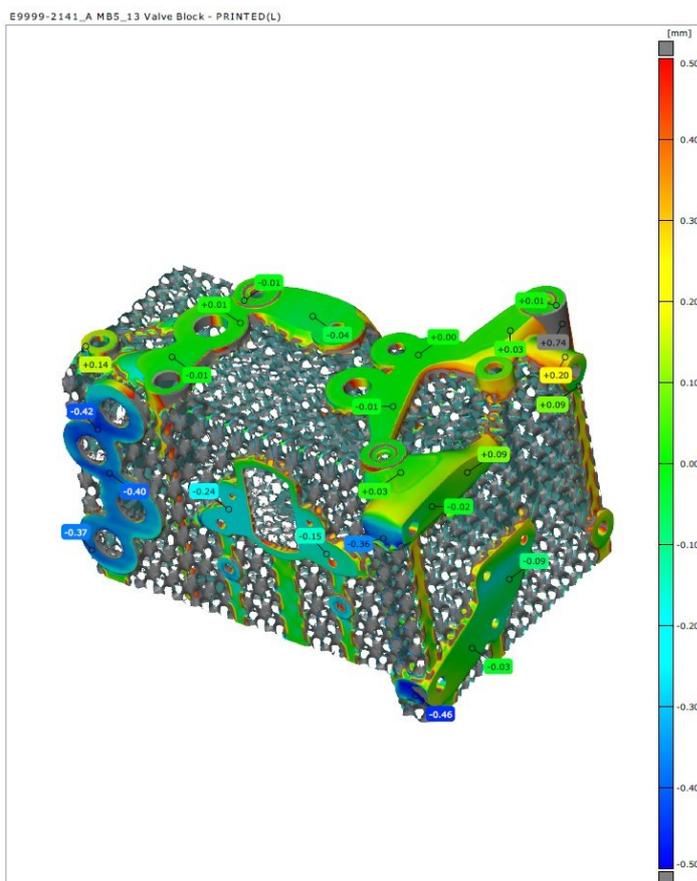
Grazie a questa analisi dimensionale è stato possibile ottenere il report della stampa, del primo blocco 1.

Questo ha indicato una forte contrazione termica nella stampa del primo Kit del blocco 2 maggiori di 1 mm in alcune zone. Tale dato ci ha permesso sia di modificare il pezzo (aumentare il sovrametallo) per il secondo Kit da produrre, sia di trovare un compromesso per il raggiungimento delle tolleranze geometriche e dimensionali del pezzo.

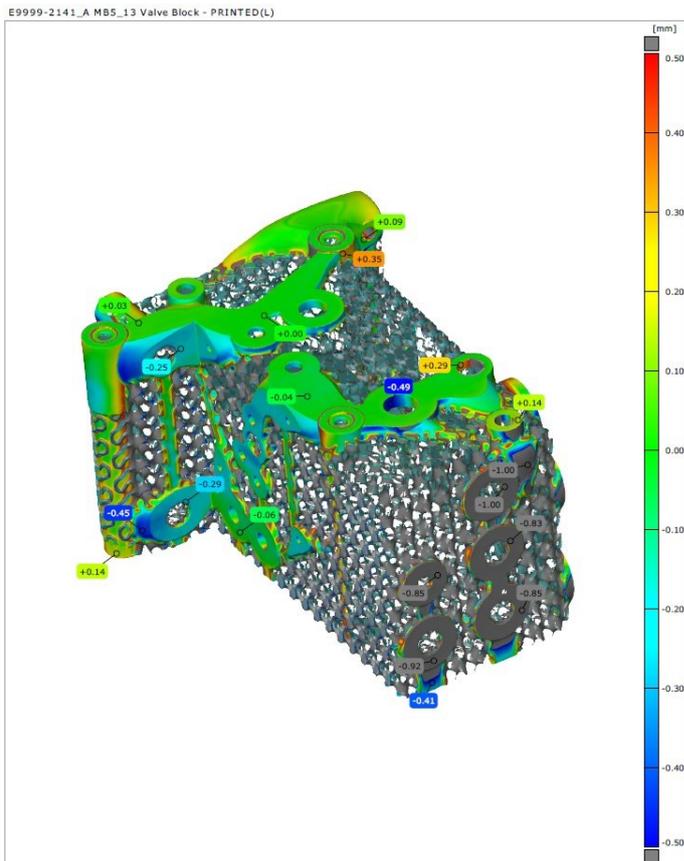
Nella tabella 17 sottostante sono mostrati i risultati della scansione 3D del Blocco 1 trattato fino ad ora, in cui è possibile osservare i valori massimi e minimi delle oscillazioni rispetto ad i valori del CAD nominale. Questi si aggirano intorno ad un massimo di ± 0.5 mm.

Grazie a questi dati si può preparare il pezzo per la fase successiva, ovvero le lavorazioni in CNC per il raggiungimento di tutte le tolleranze geometriche e dimensionali specificate nei file del disegno 2D.

Tabella 17 – Report dimensionale scansione 3D.



Vista: 1
Metodologia: Scanner 3D
Macchina: GOM ATOS Compact
Scan 12M

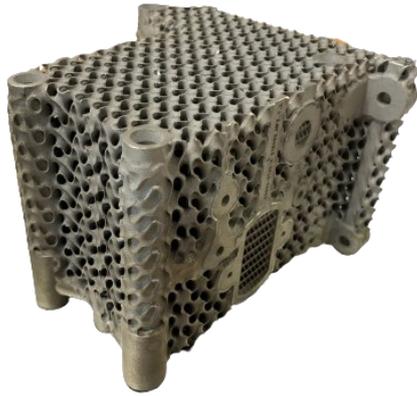


Vista: 2
Metodologia: Scanner 3D
Macchina: GOM ATOS Compact
 Scan 12M

Il rivelamento degli scostamenti dalle quote nominali del file 3D permette in questa fase di definire correttamente il percorso utensile per tutte le operazioni finali.

Grazie alle quote di sovra metallo che sono state aggiunte al pezzo questi valori di scostamento registrati dalla scansione 3D sono facilmente recuperabili in macchina e il pezzo potrà essere portato in tolleranza. In figura 4.33 il pezzo è mostrato prima e dopo le lavorazioni alle macchine utensili.

Infatti, valori registrati più alti avrebbero portato a delle criticità, poiché a causa dell'elevato numero di quote da soddisfare su alcune facce, il sovrametallo progettato avrebbe potuto essere insufficiente. Questo avrebbe comportato delle difficoltà nel raggiungimento delle tolleranze, costringendo a dei compromessi di priorità su alcune tolleranze rispetto che ad altre.



As-Printed (built) Design



Final Design – Post Machined

Figura 4.33 La parte stampate a sinistra e dopo le lavorazioni finali a destra. La foto di sinistra mostra il sovrametallo che sarà poi rimosso nelle fasi di post processo.

4.11 Report dimensionale e collaudo

Una volta che il pezzo è stato rilavorato e sono state ottenute tutte le feature in accordo con le specifiche di disegno, questo è passato al controllo qualità.

In questa fase si sono svolte tutte le operazioni di controllo dimensionale da parte di un operatore esperto attraverso un'adeguata strumentazione (tamponi e calabri ecc), al fine di valutare tutte le quote geometriche e dimensionali.

In tabella 18 è mostrato il report dimensionale, con tutti i valori delle misurazioni e gli scostamenti di questi dalle quote nominali del 2D, in particolare è riportata anche un particolare della tavola 2D, in cui sono riportati i numeri di riferimento associate alle quote.

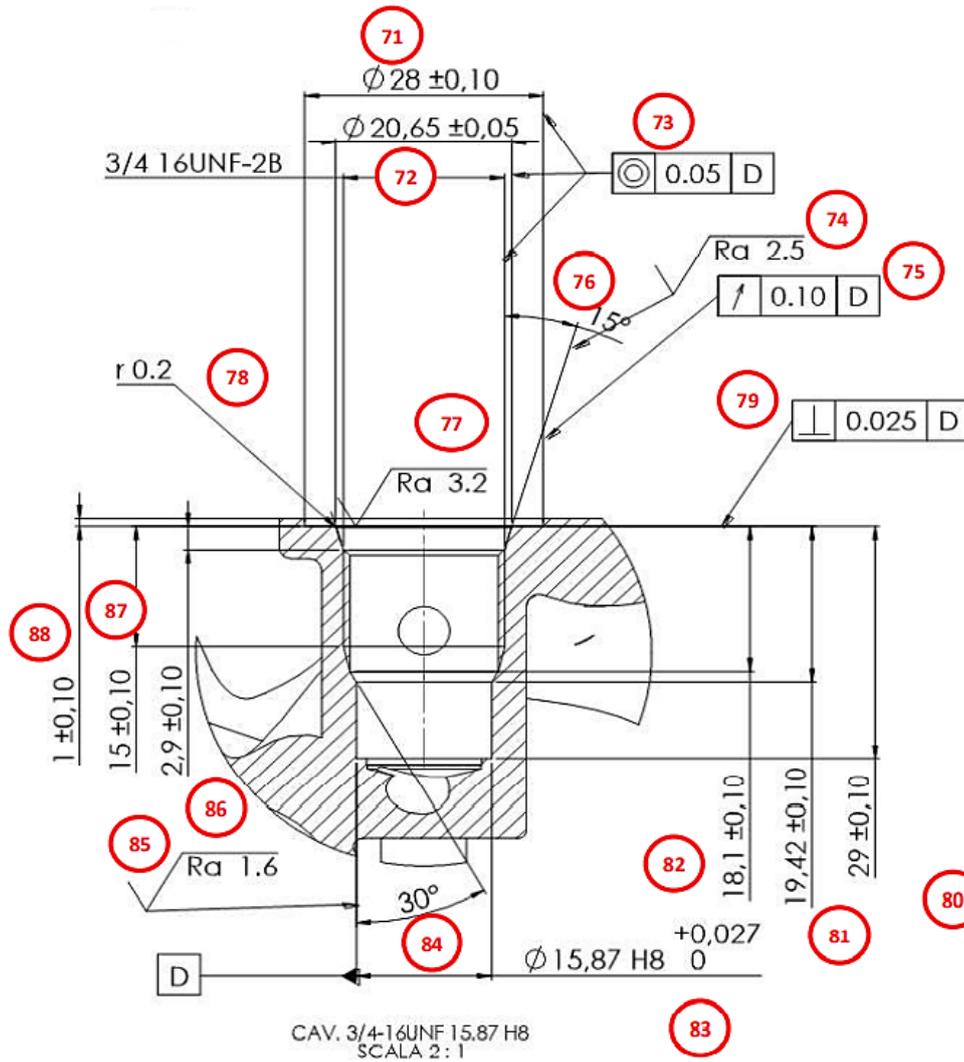


Figura 4.34 – particolare del disegno 2D

Tabella 18 – Report dimensionale.

N°	Location	Feature	Nominal / Tol	Measurement	+ 2D Tol	- 2D Tol	2D Compliance	Out of tolerance Client
2	D1	Perpendicularity	0.05					- / -
3	D2	Roughness	1.6					- / -
5	D2	Linear	106	105.993	0.1	0.1	OK	- / -
6	D2	Linear	85	85	0.1	0.1	OK	- / -
7	D2	Linear	64	63.992	0.1	0.1	OK	- / -
8	D2	Linear	62.5	62.488	0.1	0.1	OK	- / -
9	D3	Linear	32.5	32.482	0.1	0.1	OK	- / -
10	D3	Linear	81	80.983	0.1	0.1	OK	- / -
11	D3	Linear	70	70.01	0.1	0.1	OK	- / -
12	D4	Linear	106	106.016	0.1	0.1	OK	- / -
13	D4	Linear	131	130.99	0.1	0.1	OK	- / -
14	D4	Linear	142	142.005	0.1	0.1	OK	- / -
15	C4	Linear	242	242.075	0.1	0.1	OK	- / -
16	D3	Diameter	12	12.037	0.27	0	OK	- / -
17	D2	Diameter	17	17.042	0.27	0	OK	- / -
18	E1	Linear	40	40.046	0.1	0.1	OK	- / -
28	I5	Diameter	16	16.037	0.018	0	NOOK	0,02 / -
41	G6	Linear	20	20.011	0.1	0.1	OK	- / -
56	D8	Linear	85	84.996	0.1	0.1	OK	- / -
57	D8	Linear	45	45.012	0.1	0.1	OK	- / -
58	D8	Linear	125	125.013	0.1	0.1	OK	- / -
59	C1	Linear	66	66.041	0.1	0.1	OK	- / -
83	H1	Diameter	15.87	15.909	0.027	0	NOOK	0,01 / -
88	G9	Linear	1	1.068	0.1	0.1	OK	- / -

Come si può notare dal report, si è evidenziata una criticità relativa a una delle quote dimensionali della filettatura GAS CAV $\frac{3}{4}$ 16UNF (vedi figura 4.34).

Questa, infatti, risultava una delle feature più complesse da realizzare, in quanto presentava molte strette tolleranze dimensionali e geometriche da rispettare.

Il motivo principale di questa fuori tolleranza è da ricondursi ad un problema riscontrato durante le lavorazioni. Infatti, il pezzo sotto l'azione dell'apposito utensile entrava in flessione e ciò non ha permesso di garantire il raggiungimento delle tolleranze, con uno scostamento dalla quota nominale di 0.02 mm. Ciò nonostante, dopo un confronto, il cliente ha accettato tale scostamento. Il pezzo finito in figura 4.36

Successivamente, il componente è stato consegnato al committente e ad oggi è operativo e correttamente funzionante nella loro sede. Vedi Figura 4.35 e 4.36.

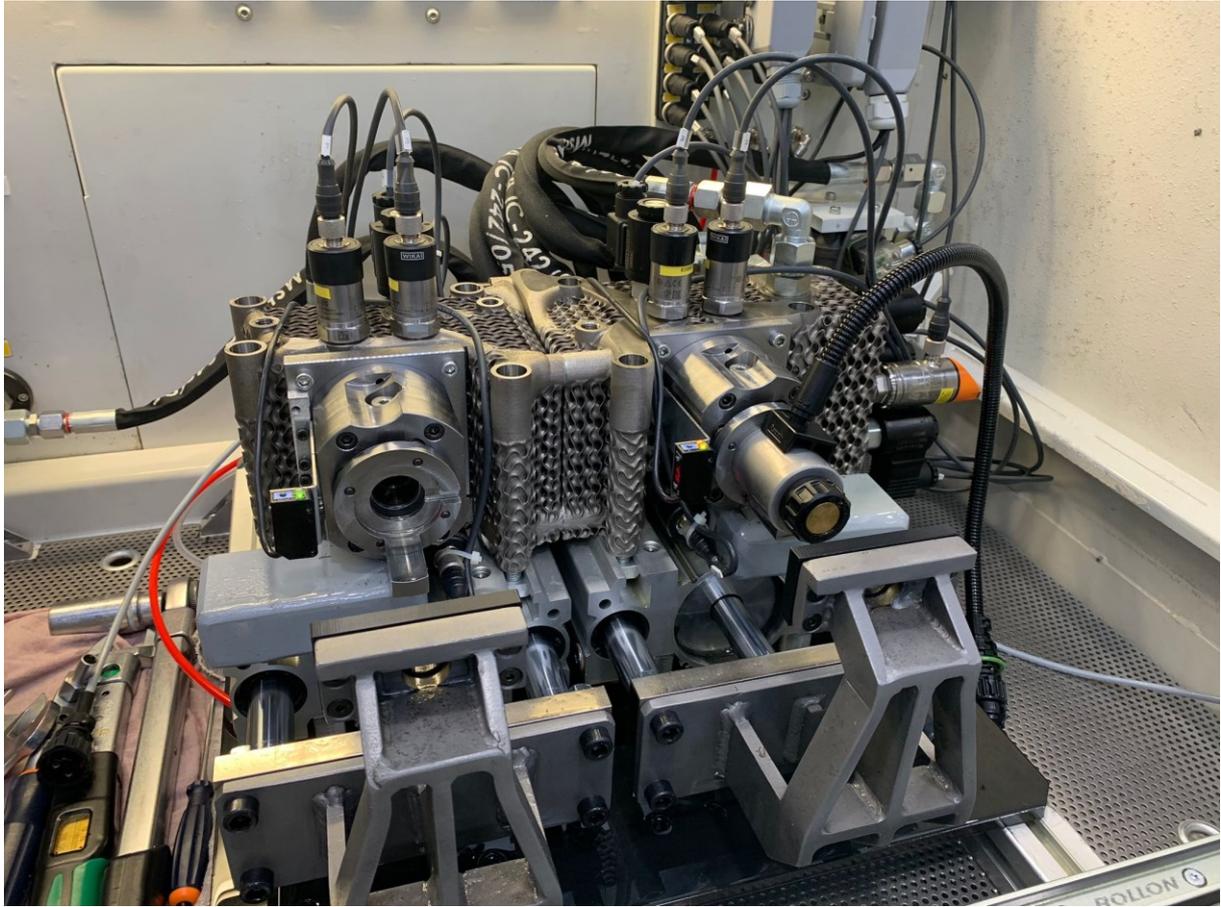


Figura 4.35

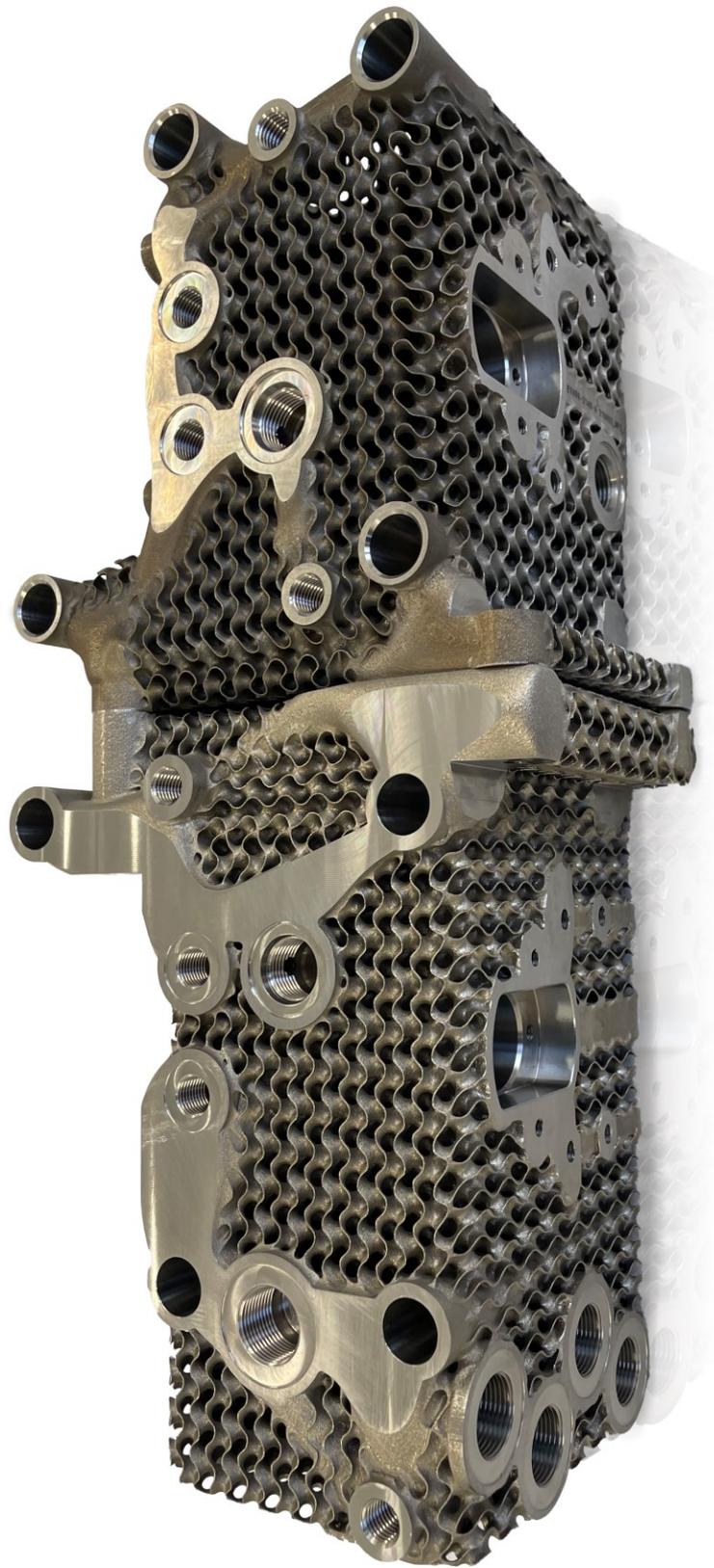


Figura 4.36 Blocco 1 e 2 prima del montaggio in azienda.

5 Conclusioni

Attraverso l'utilizzo appropriato, la comprensione e la conoscenza delle tecniche per la progettazione di parti AM (DfAM) è possibile produrre parti finali ottimizzate. Infatti, è possibile ridurre al minimo il materiale necessario, ridurre al minimo la presenza di supporti, post-elaborazione, trattamento termico e migliorare la funzionalità del prodotto.

In questo lavoro sono stati illustrati passo dopo passo i generici step che caratterizzano la progettazione di qualsiasi componente per qualsiasi processo AM, attraverso un caso di studio reale per l'applicazione di un componente idraulico. Grazie alle sue caratteristiche uniche, la fabbricazione additiva offre un grande potenziale per la progettazione di componenti di questo tipo.

Tuttavia, come è stato mostrato, queste potenzialità nella progettazione, nella ottimizzazione funzionale e nella produzione non sono facilmente realizzabili.

Nel presente lavoro si è proposto un metodo di riprogettazione e ottimizzazione con lo scopo di sottolineare la complessità e moltitudine delle fasi che fanno parte di questo processo. Questo è stato svolto attraverso una spiegazione dettagliata di tali fasi, dalla presa in carico del progetto alla sua realizzazione.

In conclusione, è possibile dire che la tecnica SLM per applicazioni idrauliche, come i blocchi idraulici, è una valida alternativa ai metodi di produzione tradizionali come la lavorazione sottrattiva e la fusione in quanto adattare la geometria del componente all'AM, consente un livello molto più elevato di libertà di progettazione per ridurre il peso, migliorare la forma dei canali interni e ottenere degli schemi molto più complessi all'interno dello stesso volume.

Il processo seguito in questo lavoro ha incluso le fasi di rimozione di tutto il materiale che non svolge una specifica funzione ingegneristica, l'esplorazione degli effetti dei diversi orientamenti di stampa e la soluzione alternativa ai problemi legati al costo della rimozione di questi. Tutto ciò, ha permesso di ridurre il peso del nuovo collettore idraulico di oltre il 75% rispetto a quello tradizionale, mantenendo le stesse dimensioni.

Dopo i test di ingresso "Passa - Non Passa" ed a seguito del collaudo da parte dell'azienda che ha commissionato il lavoro i blocchi sono stati montati e attualmente sono in servizio e funzionano correttamente.

Ad oggi, si può concludere che la riprogettazione di questi blocchi si può ritenere nel complesso soddisfacente nonostante siano stati identificati maggiori costi diretti di

produzione, e non sia stato possibile sfruttare al massimo le potenzialità delle tecniche di fabbricazione additiva, per i motivi spiegati all'interno di questo lavoro. Questo progetto ha certamente rappresentato sia per l'azienda affidataria del progetto, sia per il committente un'occasione per conoscere e apprendere le potenzialità di questa tecnologia ancora innovativa. Dando la possibilità di comprendere l'ampio ventaglio di applicazioni attuali e future per una maggiore collaborazione e sperimentazione, così da permettere in futuro di sbloccare appieno i vantaggi di questa tecnologia.



6 Bibliografia

- [1] ASTM, «ISO / ASTM52900-15, Standard Terminology for Additive Manufacturing – General Principles – Terminology, ASTM International, West Conshohocken, PA, 2015, www.astm.org,» [Online]. Available: <https://www.astm.org/Standards/ISOASTM52900.htm>.
- [2] L. Onniboni, «objectsmag,» [Online]. Available: <https://www.objectsmag.it/storia-completa-della-stampa-3d/>.
- [3] L. Iuliano, Intraduzione all'AM per il corso Politecnico, Torino, 2019.
- [4] 3dsystems, «3dsystems,» 3dsystems, [Online]. Available: <https://it.3dsystems.com/direct-metal-printing-design-guide-0>.
- [5] K. & B. M. & G. T. & F. W. & L. R. & D. J. Kellens, « Mapping Application Domains and Their Environmental Implications: Environmental Dimensions,» Environmental Dimensions of Additive Manufacturing:, 2017.
- [6] H. a. Protolabs, «Additive manufacturing trend report 2021,» 2021. [Online]. Available: https://f.hubspotusercontent10.net/hubfs/4075618/Additive%20manufacturing%20trend%20report%202021.pdf?utm_campaign=Gated%20Content%20Downloads&utm_medium=email&_hsmi=82605589&_hsenc=p2ANqtz-8pVVH1TWB5lhXxIFFDFsuKkXC6nj7FtiZbBWqhdmddevavYK8SBfKoMk5cy3L1VLE.
- [7] hubs, «hubs,» [Online]. Available: <https://www.hubs.com/guides/3d-printing/>.
- [8] I. Wohlers Associates, Wohlers Report 2021.
- [9] Siemens, «Siemens Energy,» [Online]. Available: <https://www.siemens-energy.com/>.
- [10] eos, «eos.info,» [Online]. Available: <https://www.eos.info/en/3d-printing-examples-applications/production-and-industry/turbomachinery-turbines>.
- [11] S. Analysis, «Smartech,» 2019. [Online]. Available: <https://www.smartechanalysis.com/reports/additive-manufacturing-automotive-part-production-2019/>.
- [12] porsche, «Porsche,» [Online]. Available: <https://media.porsche.com/mediakit/porsche-innovationen/it>.
- [13] zaha-hadid, «zaha hadid,» zaha-hadid, [Online]. Available: <https://www.zaha-hadid.com/design/thallus-installation/>.
- [14] E. Commission, «Product Watch Report - European Commission,» [Online]. Available: <https://ati.ec.europa.eu/sites/default/files/2020-06/Product%20Watch%20Report%203DP%20Hybrid%20Components.pdf>.



- [15] N. S. C. B. M. E. M. E. P. Bastien Vayssette, Surface roughness of Ti-6Al-4V parts obtained by SLM and EBM: Effect on the High Cycle Fatigue life. *Procedia Engineering*, Elsevier, 2018, 2018.
- [16] M. J. H. a. S. Suryakumar, Temperature Distribution during Single Pass Multi-Layer Welding in Additive Manufacturing, 2018.
- [17] Zohuri e Bahman, «Lasers,» *Directed Energy Weapons: Physics of High Energy Lasers*, pp. 201-378, 2016.
- [18] Renishaw, «renishaw,» Renishaw, [Online]. Available: <https://www.renishaw.com/en/additive-manufacturing-feature-articles--41148>.
- [19] F. Calignano, «Design optimization of supports for overhanging structures in aluminum and titanium alloys by selective laser melting,» *Materials & Design*, vol. Materials Science, 2014.
- [20] K. Zeng, «library.louisville.ed,» 2015. [Online]. Available: <https://ir.library.louisville.edu/cgi/viewcontent.cgi?article=3250&context=etd>.
- [21] metal-am, «metal-am,» [Online]. Available: <https://www.metal-am.com/articles/how-residual-stress-can-cause-major-build-failures-in-3d-printing/>.
- [22] crucible design, «crucible design,» [Online]. Available: <https://www.crucible design.co.uk/images/uploaded/guides/bs7000-part-2-a-management-guide-download-original.pdf>.
- [23] 3. System, «3D System,» [Online]. Available: <https://it.3dsystems.com/3d-printers>.
- [24] M. Leary, T. Maconachie, A. Sarker, O. Faruque e M. Brandt, «Mechanical and thermal characterisation of AlSi10Mg SLM block support structures,» *Materials & Design*, vol. 183, n. <https://doi.org/10.1016/j.matdes.2019.108138>, 2019.
- [25] M. Benedetti, A. d. Plessis, R. Ritchie, M. Dallago, S. Razavi e F. Berto, «Architected cellular materials: A review on their mechanical properties towards fatigue-tolerant design and fabrication,» *Materials Science and Engineering: R: Reports*, vol. 144, 2021.
- [26] M. Afshar, A. Anaraki, H. Montazerian, J. Kadkhodapour e J. M. Behav., 2016. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1016/j.jmbbm.2016.05.027>.
- [27] A. Aramian, S. M. J. Razavi, Z. Sadeghian e F. Berto, «A review of additive manufacturing of cermets,» *Additive Manufacturing*, vol. 33, n. <https://doi.org/10.1016/j.addma.2020.101130>, 2020.
- [28] B. Rexroth, «boschrexroth,» boschrexroth, [Online]. Available: <https://m.boschrexroth.com/en/us/products/product-groups/industrial-hydraulics/manifolds-and-plates/index-2>.
- [29] Zhang, J.-h. a. Liu, G. a. Ding, R. a. Zhang, K. a. Pan, M. a. Liu e Shihao, «3D Printing for Energy-Saving: Evidence from Hydraulic Manifolds Design,» *Energies*, vol. 12, n. 13, 2019.
- [30] altair, «altair,» [Online]. Available: https://community.altair.com/community?id=community_question&sys_id=f4668cf61b2bd09



08017dc61ec4bcb82.

- [31] B. Dutta e F. H. Froes, Additive Manufacturing of Titanium Alloys - State of the Art, Challenges, and Opportunities, Elsevier, 2016.
- [32] P. I. C. Saccani, P. I. A. Bianchini, P. Ing. Marco Pellegrini e I. A. Guzzini, Department of Industrial Engineering, [Online]. Available: [http://www.diem.ing.unibo.it/personale/saccani/index_files/Impianti%20Meccanici%20T%20\(dal%202014-2015\)/Impianti%20Meccanici_modulo%200.1_Valvole%20ed%20Attuatori.pdf](http://www.diem.ing.unibo.it/personale/saccani/index_files/Impianti%20Meccanici%20T%20(dal%202014-2015)/Impianti%20Meccanici_modulo%200.1_Valvole%20ed%20Attuatori.pdf).
- [33] C. Loyola, N. A. & Pereira, A. & Menezes e Ivan., «OBUST TOPOLOGY OPTIMIZATION UNDER UNCERTAIN LOADS: A SPECTRAL STOCHASTIC APPROACH,» 2015.
- [34] M. Leary, L. Merli, F. Torti, M. Mazur e M. Brandt, «Optimal topology for additive manufacture: A method for enabling additive manufacture of support-free optimal structures,» Materials & Design, vol. Volume 63, n. 1, pp. 678-690, 2014.
- [35] «ptc,» [Online]. Available: <https://www.ptc.com/it/technologies/cad/generative-design>.
- [36] «sae,» sae, 2018. [Online]. Available: <https://www.sae.org/news/2018/03/generative-design-software-and-ai>.
- [37] additiveindustries, «additiveindustries,» additiveindustries, [Online]. Available: <https://www.additiveindustries.com/systems/metalfab1>.
- [38] a. industries, «additiveindustries,» [Online]. Available: <https://www.additiveindustries.com/systems/metalfab1>.
- [39] F. Calignano, CONTROLLO DI QUALITÀ, 2019.



Ringraziamenti

Ringrazio il mio relatore Luca Iuliano, per avermi accompagnato alla fine di questo percorso.

Un sentito grazie al Dott. Abdollah Saboori, correlatore di tesi, per il supporto durante la realizzazione della tesi.

Un ringraziamento particolare va ai miei Tutor Riccardo Nicastro e Leonardo Politi dell'azienda NIRI SRL per avermi dato la possibilità di svolgere il mio lavoro di tesi su un argomento interessante e dinamico, che mi ha permesso di mettermi in gioco e fare un'esperienza che sarà preziosa per il mio futuro.

Ringrazio i miei genitori che mi sono sempre stati accanto e senza i quali non avrei mai potuto intraprendere questo percorso di studi e i miei nonni per il loro amore ed appoggio incondizionato.

Ringrazio la mia fidanzata Anna per avermi sempre sostenuto, incoraggiato ed essermi sempre stata vicino.

Ringrazio, per ultimi ma non per meno importanza, i miei amici per essere stati presenti durante tutto questo lungo percorso.

