

# **POLITECNICO DI TORINO**

Corso di laurea magistrale in Ingegneria Meccanica



Tesi di Laurea

## **Riprogettazione di un componente aerospaziale per AM tramite ottimizzazione topologica**

Candidato:

**Gioacchino Muratore**

Relatori:

**Prof.ssa Eleonora Atzeni**

**Prof. Alessandro Salmi**

A.A. 2017/2018

## Indice

|                                                                         |    |
|-------------------------------------------------------------------------|----|
| <b>Introduzione</b> .....                                               | 3  |
| <b>Capitolo 1: Cenni di teoria</b> .....                                | 5  |
| 1.1    Principi di funzionamento .....                                  | 6  |
| 1.2    Panoramica tecnologie.....                                       | 9  |
| 1.3)    Vantaggi AM.....                                                | 10 |
| <b>Capitolo 2: AM-Metallo</b> .....                                     | 14 |
| 2.1)    Introduzione.....                                               | 14 |
| 2.2)    Tecnologie AM Metal .....                                       | 17 |
| a)    PBF (Powder Bed Fusion).....                                      | 17 |
| b)    Direct energy deposition.....                                     | 20 |
| c)    Binder jetting .....                                              | 21 |
| d)    Sheet lamination .....                                            | 22 |
| 2.3)    Verso un vero e proprio processo industriale .....              | 22 |
| 2.4)    Punti deboli per i produttori di componenti metallici.....      | 23 |
| <b>Capitolo 3: Stato dell'arte</b> .....                                | 26 |
| 3.1)    Industrializzazione AM .....                                    | 26 |
| 3.2)    Campi di applicazione AM.....                                   | 29 |
| a)    Automotive .....                                                  | 30 |
| b)    Aerospace .....                                                   | 31 |
| c)    Medical and dental .....                                          | 31 |
| 3.3)    AM e l'Industry 4.0 .....                                       | 33 |
| 3.3.1)    Sistemi industriali per la produzione metallica additiva..... | 35 |
| <b>Capitolo 4: Design for AM</b> .....                                  | 37 |
| 4.1)    Volume di costruzione.....                                      | 39 |
| 4.2)    Polvere, parametri di processo e geometrici.....                | 40 |
| 4.3)    File STL.....                                                   | 40 |
| 4.4)    Orientamento e strutture di supporto .....                      | 41 |
| 4.5)    Requisiti per finitura parte.....                               | 42 |
| 4.6)    Metodologia definizione design .....                            | 42 |
| <b>Capitolo 5: Case study</b> .....                                     | 45 |
| 5.1)    Introduzione.....                                               | 45 |
| 5.2)    L'oggetto di studio .....                                       | 46 |

|                           |                                                       |           |
|---------------------------|-------------------------------------------------------|-----------|
| 5.2.1)                    | Impostazione modello ed analisi FEM.....              | 48        |
| 5.2.2)                    | Definizione Design Space .....                        | 53        |
| 5.2.3)                    | Ottimizzazione topologica .....                       | 55        |
| 5.2.3)                    | Redesign.....                                         | 59        |
| 5.3)                      | File STL e generazione supporti .....                 | 63        |
| 5.4)                      | Remodelling componente .....                          | 66        |
| 5.4.1)                    | Risultati analisi FEM modello con Design finale ..... | 71        |
| 5.5)                      | Superfici con sovrametallo.....                       | 75        |
| 6)                        | Conclusioni .....                                     | 79        |
| <b>Bibliografia .....</b> |                                                       | <b>82</b> |

## Introduzione

Durante questo lavoro di tesi si affronta la “Riprogettazione di un componente in ambito aerospace per AM tramite ottimizzazione topologica”.

Nella prima parte dell’elaborato si affronta il tema Additive Manufacturing in generale, presentando brevemente tutte le tecnologie, sottolineandone vantaggi e svantaggi.

In secondo luogo, l’argomento è stato incentrato su AM Metal arrivando a disquisire del ruolo che AM potrebbe avere con l’avvento di Industry 4.0.

Si è concluso il tutto con la presentazione del Case study in questione, sviluppando step by step quello che è il percorso di progettazione con le tecnologie additive.

La topologica è una tecnica di ottimizzazione per la ricerca della morfologia ottimale, se utilizzata nel modo corretto è in grado di fornire una forma che rappresenti il miglior compromesso tra peso e prestazioni con un unico inconveniente, risulta essere limitata dal metodo di produzione scelto.

Si parte dalla progettazione CAD del componente così come pensato dal progettista, si procede con analisi del pezzo originario, definendone vincoli e materiale. Successivamente si passa ad un’analisi FEM per capire come il componente reagisce ai carichi di lavoro. Il passaggio successivo è di individuare il Design Space in accordo con i vincoli di processo e geometrici. In seguito, si passa alla fase di ottimizzazione topologica. In questo modo si inizia ad avere un’idea della possibile configurazione del componente così progettato. Deciso il design grazie alla TO (ottimizzazione topologica) si rimodella il pezzo, lo si verifica nuovamente tramite FEM e si converte il file in formato STL. In questo modo si è in grado di caricarlo su un programma interfacciato con la macchina EOS M270 (MAGICS MATERIALISE). Durante questo ultimo passaggio si è deciso l’orientamento della parte in macchina e il volume di supporto. Sono stati fatti vari tentativi per individuare la soluzione migliore variando l’algoritmo di calcolo del programma scegliendo diversi parametri di ottimizzazione. Una volta scelto l’orientamento ritenuto più idoneo si effettua un’ulteriore modellazione andando a considerare anche il sovrametallo necessario per le successive lavorazioni convenzionali di cui il componente necessita.

Tutti i passaggi che riguardano il Case Study sono trattati in maniera approfondita e dettagliata.

Tramite questo lavoro si vuole trasmettere l'importanza assegnata da un progettista ad ognuna di queste fasi, individuando i vantaggi di un processo AM connesso all'ottimizzazione topologica.

## Capitolo 1: Cenni di teoria

La nuova rivoluzione industriale, identificata come Industry 4.0, ormai è cominciata. AM è individuata come uno dei principali protagonisti visto che si è dimostrata davvero pronta a coglierne le nuove opportunità.

Ad oggi quando si parla di Additive Manufacturing si includono anche materiali metallici, infatti acciaio, alluminio e titanio possono essere trasformati in parti completamente dense con elevate caratteristiche e proprietà meccaniche proprio grazie a questi nuovi processi.

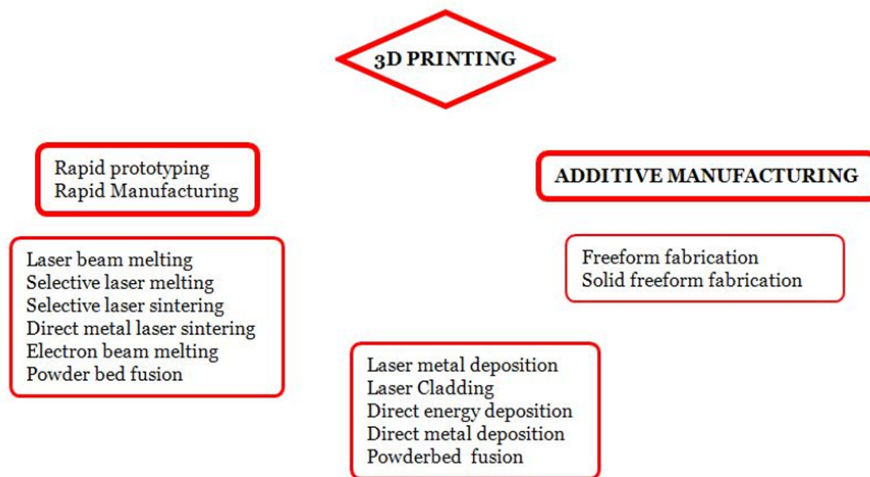
Si è raggiunta la possibilità di spingersi oltre nella formazione di nuovi materiali e leghe.

La fabbricazione additiva, più comunemente chiamata stampa 3D, ha come principio di funzionamento la realizzazione di oggetti strato dopo strato (layer-by-layer).

Grazie a questa sintetica ed estremamente semplificata spiegazione si può notare la netta differenza con le tecnologie di produzione tradizionali. La produzione è stata sempre affrontata in modo sottrattivo, si parte da un pieno e tramite diverse lavorazioni meccaniche si arriva al componente vero e proprio, con AM il modus operandi cambia, diventa duale, non ci troveremo più nella condizione di sottrarre materiale ma lo si andrà aggiungendo.

Diventa sempre più rilevante la comunicazione tra macchina e interfaccia progettista, la connessione tra i due è sempre più forte. Si hanno molti programmi tramite i quali la macchina riesce a comunicare con il computer e grazie a questa forte connessione si ottengono benefici come maggiore customizzazione del prodotto finale e formazione di geometrie sempre più complesse. Il tutto avviene abbinando all'AM processi di

ottimizzazione, per esempio quella topologica, grazie alla quale si ottiene il miglior compromesso tra peso/rigidezza/funzionalità del componente.



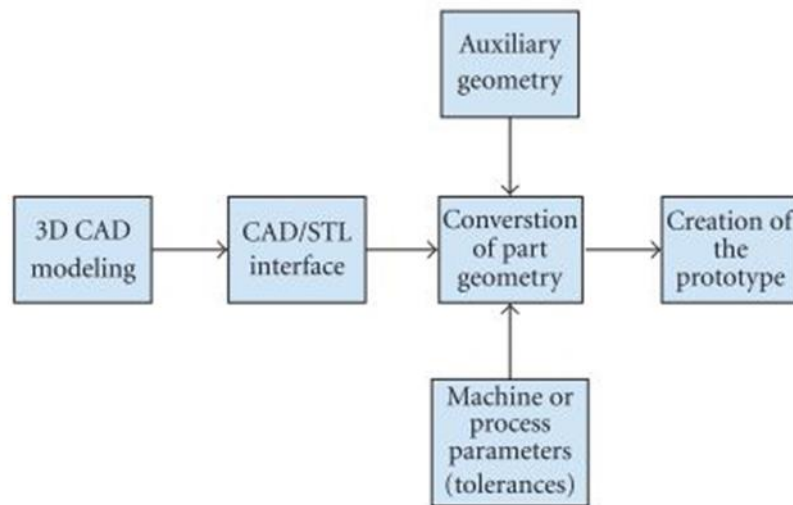
*Figure 1 Overview 3Dprinting*

## 1.1 Principi di funzionamento

In questo capitolo si fornisce un quadro generale delle tecnologie additive, oltre ad una breve descrizione dei passaggi necessari all'interno di un processo additive. Lo scopo è di presentare i possibili benefici che le rendono così promettenti in ambito industriale.

La classificazione seguita per la descrizione delle tecnologie additive è tratta da [1] e in accordo con la normativa F2792-12a [2].

Come sottolineato in precedenza i processi additivi anche se si differenziano per materiale utilizzato, precisione e timing, sono accomunati dalla logica di funzionamento.



*Figura 2 Data flow rapid prototyping*

Si inizia dalla modellazione CAD del pezzo nello spazio, utilizzando programmi come Autodesk e Solidworks, tramite cui vengono definite dimensioni e caratteristiche geometriche. In seguito il componente viene verificato tramite analisi FEM, una volta verificato il file viene trasformato in .STL, "Standard Triangulation Language", un formato di file nato per i software di stereolitografia. Per triangolazione s'intende che tramite un file di questo genere la superficie del solido viene visualizzata come composta da triangoli, aiutando a definirne completamente la geometria.[3] Una volta pronto questo file viene caricato all'interno del programma, nel nostro caso MAGICS Materialise, con all'interno i file di configurazione della macchina, così da poter mandare delle simulazioni e poter scegliere il corretto posizionamento ed orientamento del pezzo in macchina, dove per corretto si intende quello che vada ad ottimizzare uno dei parametri da noi scelto (volume dei supporti, altezza massima ecc..). Questo programma ha il compito di effettuare lo "slicing" del componente.

Il passaggio da formato CAD a STL è da non sottovalutare, una errata conversione può portare con sé diversi problemi, come il posizionamento di una normale nel modo non corretto, che se non presi per tempo portano alla rottura o alla formazione di difetti. [4]

Per ovviare a questa problematica oggi esistono diversi programmi che consentono di verificare il file .STL, identificandone e correggendone potenziali errori.

Si arriva allora al momento in cui il file così creato può essere inviato alla macchina. In questa fase è ancora possibile effettuare delle modifiche al modello (correzione dimensioni, rivederne orientamento e posizionamento). Una volta rivisto e confermato il tutto si passa alla fase di set-up della macchina, definendo i parametri di processo.

Una volta completato il processo di costruzione, il pezzo viene rimosso, pulito ed inviato alle eventuali fasi di post-processing.

In questo caso infatti il componente non risulta essere del tutto completato visto che necessità di ulteriori lavorazioni come: trattamenti termici specifici, rimozione del volume di supporto, ecc.....

La fase più rilevante e interessante, che riguarda nello stretto AM, è sicuramente la rimozione del volume di supporto.

Rispetto a tutte le altre fasi di post-processing questa è obbligatoria in tutti i processi additivi in cui i supporti sono presenti, si parla di supporti solubili e solidi.

Questo step non consente un miglioramento della superficie del pezzo anzi, molto spesso le parti interessate dalla presenza di supporti probabilmente dovranno essere ulteriormente lavorate. L'operazione di rimozione necessita la presenza di tecnici altamente specializzati che assicurino la corretta riuscita del pezzo. Essendo un'operazione manuale non consentirà una ripetibilità nel tempo.

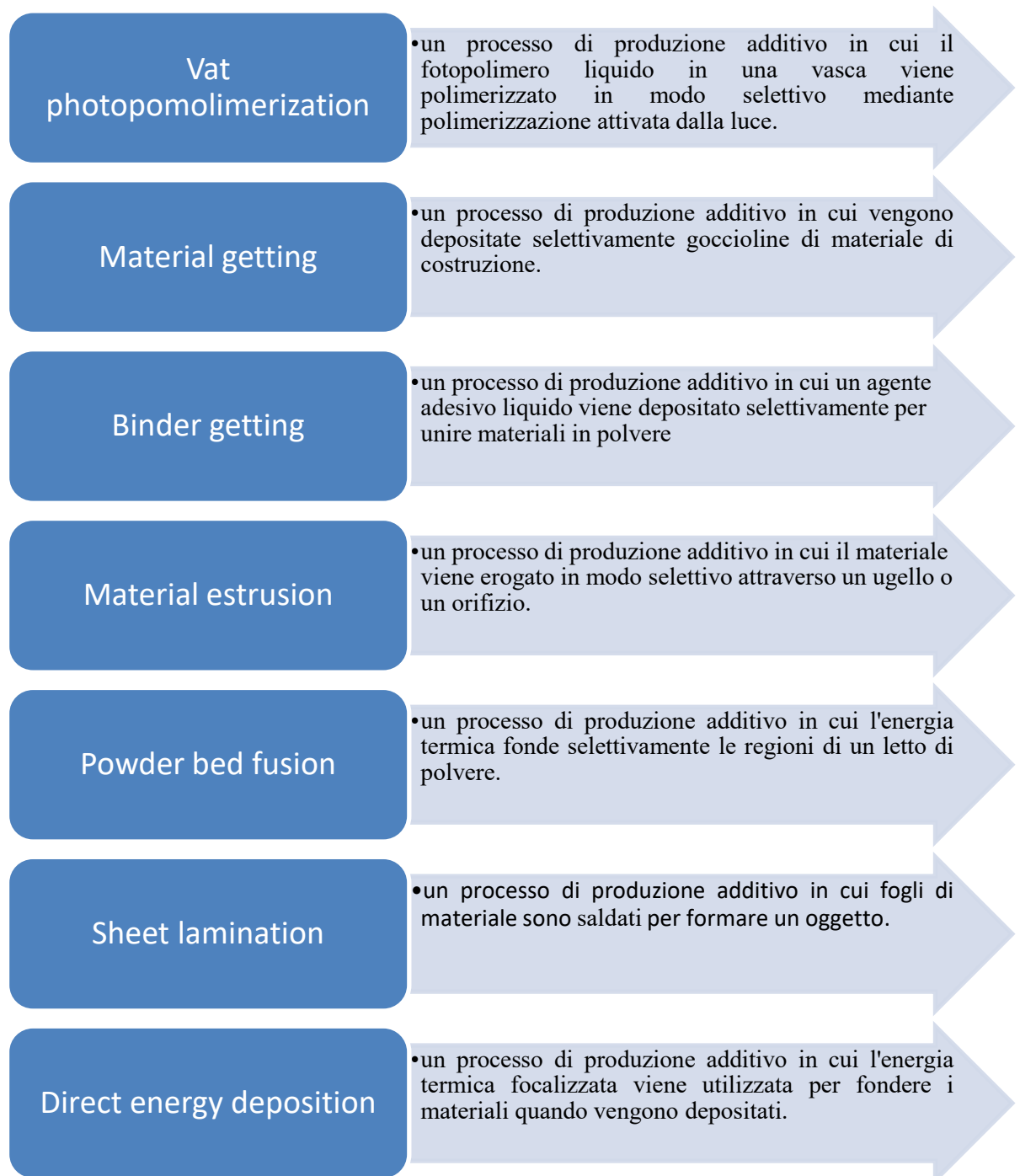
Il supporto può essere idealizzato come una continuazione del componente, oltre a supportarlo aiuta ad asportare il calore più velocemente nei processi di tipo termico. Non esistono delle formule empiriche per la loro generazione quindi ci si affida ad un mix tra, esperienza di chi progetta e del tecnico e a diversi algoritmi che consentono di definirne la generazione in base a dei parametri di ottimizzazione.

Le funzioni delle strutture di supporto sono principalmente tre: [5]

- a) fissare la parte alla piattaforma di costruzione
- b) condurre il calore in eccesso lontano dalla parte
- c) impedire la deformazione e / o il collasso.

## 1.2 Panoramica tecnologie

In questo paragrafo si analizzano brevemente quali sono le tecnologie [1] riconosciute in ambito additive tramite la normativa ASTM F42, andandole a presentare sinteticamente. Sponderemo maggiormente la nostra attenzione invece su quelle adoperate in ambito Metal Additive Manufacturing.



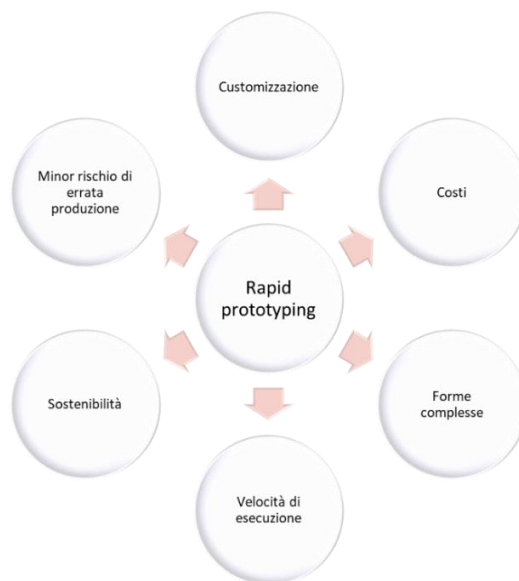
### 1.3) Vantaggi AM

Le potenzialità offerte dall'AM in ambito produttivo sono molteplici. Basti pensare alla possibilità di concepire prodotti la cui forma possa assolvere in modo puntuale allo scopo prefissato, evitando di sottostare alle regole più limitanti dei comuni processi produttivi. Certo, anche le tecnologie di additive manufacturing hanno le proprie regole e vincoli di cui la progettazione deve necessariamente tener conto, ma ragionevolmente inferiori ad uno stampaggio a iniezione o ad una fresatura. [6]

Uno dei principali vantaggi è la possibilità di ridurre il numero di componenti, sostituendo un assieme di molte parti con un componente geometricamente più complesso, non altrimenti realizzabile con tecniche di produzione tradizionali.

Non solo qualità e tempi di produzione segneranno un miglioramento, anche la scienza dei materiali che accompagna l'evoluzione delle tecnologie additive è destinata a crescere di pari passo. Ogni anno vengono resi disponibili nuovi materiali per svariate tecnologie ed è ragionevole aspettarsi sempre nuovi materiali per nuove applicazioni. Ceramiche, materiali compositi, polimeri, polveri metalliche e vetri sono destinati a diventare più numerosi e più specializzati.

I vantaggi di AM sono dunque numerosi, si va ad individuare quelli che risaltano subito all'occhio:



*Figura 3 Vantaggi AM*

AM apre nuove opportunità per l'innovazione eliminando le restrizioni della prototipazione convenzionale, che richiede la produzione di prototipi di utensili e componenti fisici a tolleranze rigorose. I progettisti in questo modo sono in grado di creare modelli che incorporano forme e superfici complesse, difficili o impossibili da riprodurre con la prototipazione convenzionale.

Poi si ha anche la velocità con cui questi prototipi possono essere prodotti. Infatti, come già anticipato, una volta creato il CAD il percorso è molto breve per arrivare alla produzione del pezzo. Il tempo di produzione non dipende più dalla geometria più o meno complessa ma risulta essere legato soprattutto alle dimensioni.

Per quanto riguarda il costo del processo si individuano tre voci di maggiore rilevanza, legate a macchinari, materie prime e manodopera.

Ovviamente quando si parla del costo della materia prima questo è strettamente legato alla tecnologia AM utilizzata (nylon per SLS 30 €/Kg, bobina FDM 25€/Kg, resina SLA 15€/l ecc... )

Il fatto di non dover far diversi passaggi per la produzione del componente riesce a contenere il costo di esercizio legato ai macchinari.

La manodopera invece dovrà essere sì di un certo livello, però bisogna tener conto che un macchinario additive necessita anche di un minor numero di ore dedicati durante la produzione da parte di operatori, dunque anche questa voce risulterà contenuta.

Se si dovesse fare una valutazione dei costi in base al volume di produzione l'AM è molto competitiva per quanto riguarda volumi bassi rispetto alla produzione con tecniche tradizionali. Motivo per cui la produzione altamente massiva non viene ancora avviata con macchinari di questo genere.

Il fatto di avere un tempo di produzione abbastanza ridotto consente al team di sviluppo di identificare più rapidamente gli errori di progettazione o problemi di funzionalità e apportare rapidamente delle modifiche.

La disponibilità fisica del prodotto aiuta a modificare e identificare i problemi prima della produzione di massa. In questo modo grazie a questo tipo di tecnologie, che consentono di

in tempi brevi il prodotto così pensato, processo iterativo, si va a ridurre il rischio di incorrere in problemi di produzione successivi e quindi investimenti errati in macchinari dedicati a soluzioni costruttive errate.

Per quanto riguarda la complessità del prodotto si è già sottolineato in più punti che grazie a questa tecnologia il progettista gode di una elevata libertà durante la fase di progettazione. Non dovrà più sottostare a requisiti di progetto come sottosquadri o accesso utensili, in poche parole i progettisti possono creare modelli che incorporano forme e superfici complesse che sarebbero difficili o impossibili da riprodurre con i metodi convenzionali.

Uno dei maggiori limiti in AM è la difficoltà che sta nell'individuare il corretto posizionamento e orientamento in macchina. Trovando la giusta soluzione si può ridurre al minimo l'utilizzo dei supporti e la probabilità che si vengano a creare errori sulla superficie del componente, causati da tensioni residue, gradiente termico e angoli di superfici a sbalzo troppo elevati.

La prototipazione rapida, essendo un processo iterativo, dona la possibilità di incorporare facilmente le esigenze dei singoli clienti e creare in questo modo prodotti fortemente customizzati. La customizzazione risulta essere dunque un forte vantaggio competitivo offrendo ai clienti ampia scelta e flessibilità. Lo si nota in campi come quello dental & medical, dove AM trova sempre più la strada spianata alla sua forte ascesa.

All'inizio di questo elaborato abbiamo sottolineato la grossa differenza di AM rispetto ai processi di produzione con tecniche sottrattive, che prevedono utilizzo massivo di materia prima. Per queste nuove tecnologie si andrà ad utilizzare lo stretto necessario, vi saranno quindi elevati gradi di sostenibilità.

Inoltre, i macchinari non hanno dimensioni eccessive e quindi risultano creare anche minori difficoltà da un punto di vista dei mezzi atti al loro trasporto.

Il basso impatto ambientale è uno dei tanti pregi che rende per molte imprese l'opportunità di spingersi verso AM sempre più accattivante. Le materie utilizzate possono essere anche riciclate e quindi riutilizzate, gli sprechi risultano davvero contenuti.

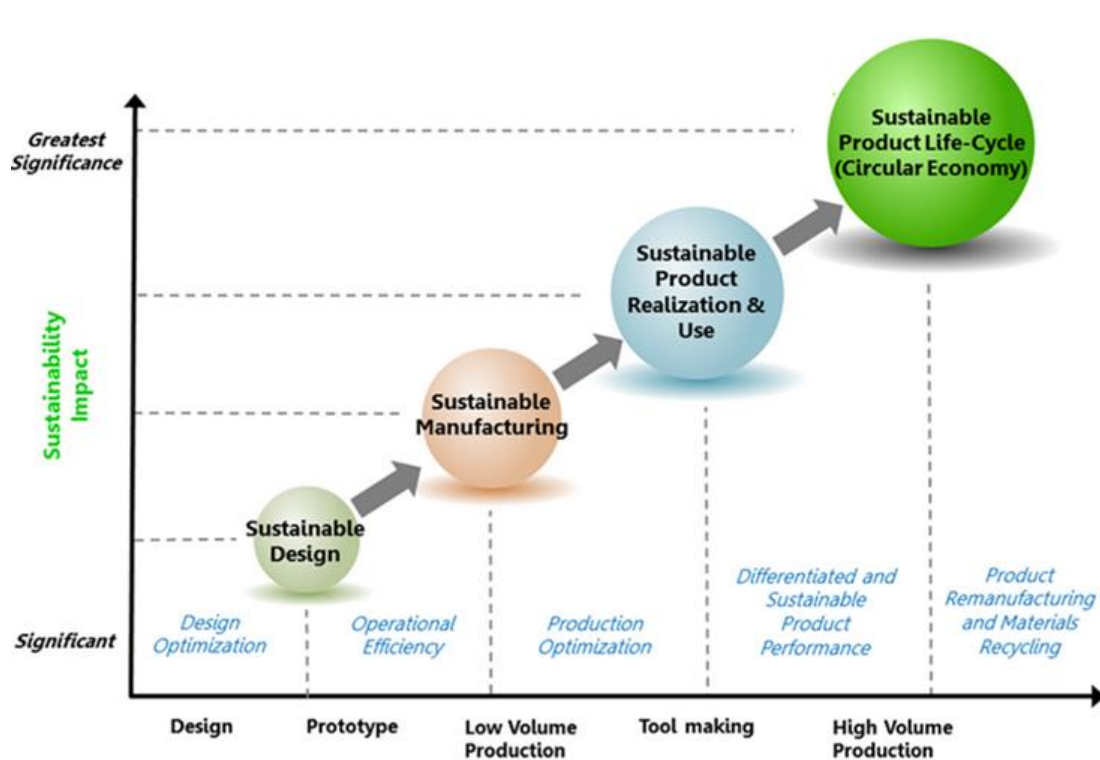


Figura 4 AM Sostenibilità

Con questo breve paragrafo si è voluto sottolineare come la diffusione di tale tecnica produttiva stia sempre più espandendosi, generando un elevato ritorno sia economico ma anche sociale. Con l'Industry 4.0 si prevede un sorpasso della tecnologia 3D nei confronti delle tecniche di produzione tradizionali, e quindi sempre più operatori e progettisti specializzati.

## Capitolo 2: AM-Metallo

### 2.1) Introduzione

Come indicato nei paragrafi precedenti negli ultimi anni c'è stato un passaggio fondamentale alla produzione additiva di componenti in metallo, sia prototipi che singole parti.

In ambiti come racing o aerospace le parti così realizzate, essendo produzioni di piccoli lotti, vanno a sfruttare la possibilità di ottenere un design complesso e leggero che sia altamente prestazionale. Vengono utilizzati materiali che sono stati sviluppati appositamente per AM.

Proprio con l'ingresso nell'era dell'Industry 4.0 è previsto un utilizzo coerente della tecnologia additiva per produrre componenti finali. Bisognerà certamente riuscire a soddisfare gli standard di qualità e ripetibilità che ad oggi risultano essere due dei più grossi limiti di AM. In questa direzione si sta muovendo la comunità scientifica, alla ricerca di un continuo ampliamento delle proprie conoscenze sui processi AM e soprattutto sulle possibili migliorie della qualità delle parti.



*Figure 5 Additive Manufacturing Metal*

Ogni processo AM metal ha le proprie caratteristiche specifiche in termini di:

- Materiali utilizzati
- Strategie di costruzione
- Applicazioni

Tramite le diverse tecnologie si otterranno anche risultati differenti, prestazionali oppure proprietà meccaniche e microstrutturali diverse.

Si distinguono tre processi di base per quanto riguarda i sistemi laser:

- Laser sintering (LS)
- Laser melting (LM)
- Laser metal deposition (LMD)

Si differenziano in base ai diversi meccanismi di interazione laser-polvere e ai vari processi metallurgici (come la fusione parziale o completa).

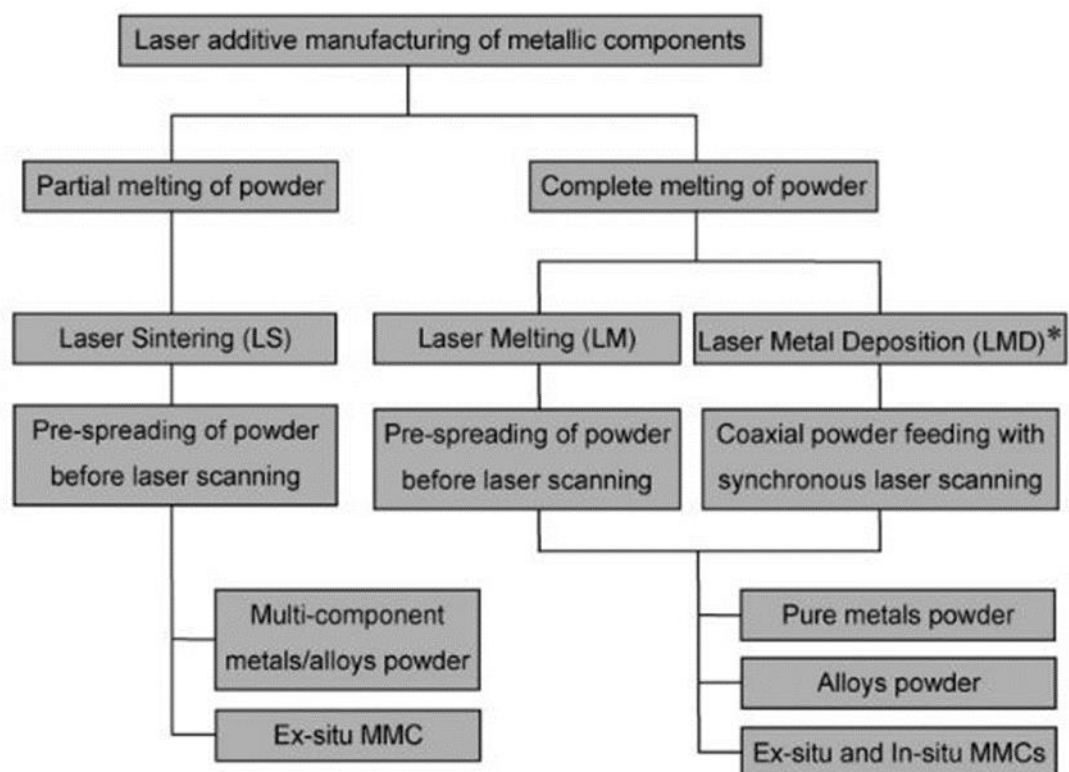


Figura 6 Classificazione dei processi

La loro modalità di deposizione, il tasso di deposizione, le condizioni di processo e le proprietà microstrutturali/meccaniche sono riassunte nella tabella:

| Process | Deposition mode | Layer thickness/<br>$\mu\text{m}$ | Deposition rate                                                                 | Dimensional accuracy/mm                     | Surface roughness/ $\mu\text{m}$ | Ref.   |
|---------|-----------------|-----------------------------------|---------------------------------------------------------------------------------|---------------------------------------------|----------------------------------|--------|
| DMLS    | Laser sintering | 20–100                            | Depend on laser spot size, scan speed and size, number, and complexity of parts | High, $\pm 0.05$                            | 14–16                            | 24, 47 |
| SLM     | Laser melting   | 20–100                            | Depend on laser spot size, scan speed and size, number, and complexity of parts | High, $\pm 0.04$                            | 9–10                             | 48, 49 |
| DMD     | Laser cladding  | 254                               | $0.1\text{--}4.1\text{ cm}^3\text{ min}^{-1}$                                   | ...                                         | $\sim 40$                        | 17, 29 |
| LENS    | Laser cladding  | 130–380                           | ...                                                                             | x-y plane $\pm 0.05$ ;<br>z axis $\pm 0.38$ | 61–91                            | 30, 50 |
| DLF     | Laser cladding  | 200                               | $10\text{ g min}^{-1}$ ( $1\text{ cm}^3\text{ min}^{-1}$ )                      | $\pm 0.13$                                  | $\sim 20$                        | 51, 52 |

\*AM, additive manufacturing; DMLS, direct metal laser sintering; SLM, selective laser melting; DMD, direct metal deposition; LENS, laser engineered net shaping; DLF, directed light fabrication.

*Figura 7 Tabella proprietà microstrutturali/meccaniche*

La transizione di AM dal prototyping e dalla produzione per piccoli lotti a volumi sempre più massivi sta portando con sé rilevanti cambiamenti sia in termini di macchinari sia nella best practice da adoperare nelle fabbriche. Si nota una crescente consapevolezza della necessità di gestire i rischi nei processi AM a polvere metallica. Questi rischi si manifestano principalmente sotto forma di esplosività / piroforicità e tossicità per inalazione di polveri metalliche molto fini. Tali rischi sono stati riconosciuti per molti decenni dalle più vaste industrie di lavorazione delle polveri metalliche, e ora c'è una crescente attenzione su di essi nel contesto della produzione di parti metalliche AM.

Si sottolinea come, per esempio, i maggiori produttori di macchine Powder Bed Fusion hanno cominciato a realizzare soluzioni automatizzate che permettono di migliorare la produttività lungo tutto la catena di processo, iniziando dalla creazione del file fino ad arrivare alla costruzione del componente, e terminare il tutto con i dovuti trattamenti termici e rimozione dei supporti.

## 2.2) Tecnologie AM Metal

Delle sette categorie standard F42, solo le seguenti quattro presenti nel grafico appartengono ad AM-Metal, le altre tre non sono tecnologie applicabili con materiali metallici. Ognuna di queste categoria ha i propri punti di forza e le proprie sfide da affrontare.

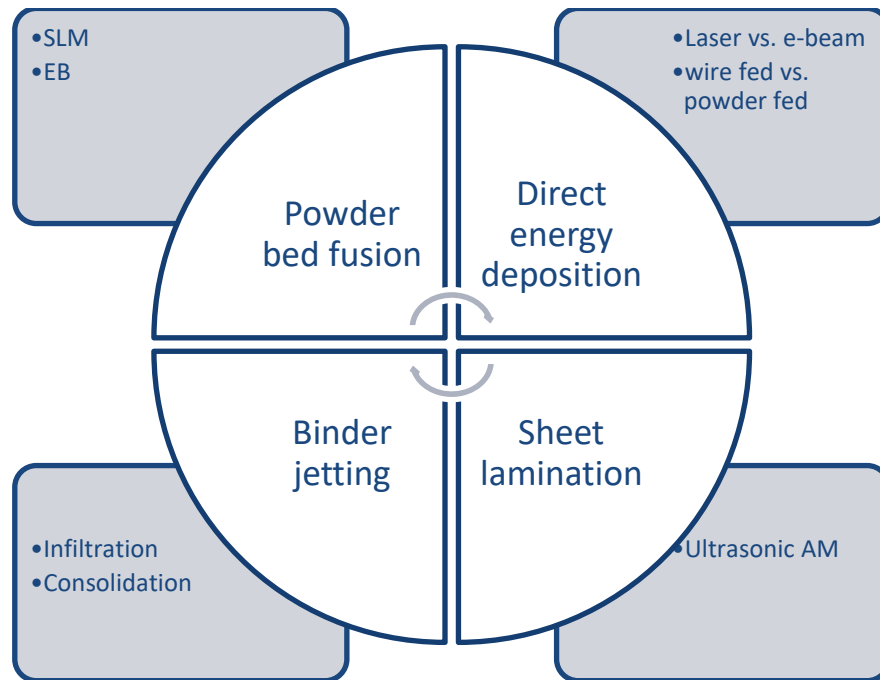


Figura 8 Panoramica AM Metal

La fusione laser selettiva (SLM) e la fusione con fascio di elettroni (EBM) sono tecnologie di produzione additiva che consentono la fabbricazione di componenti metallici o in lega complessi e multifunzionali. [7]

Il numero di materiali metallici a disposizione dei sistemi AM è piuttosto limitato. Il designer può scegliere all'interno di un range di materiali tra cui: acciaio per utensili, acciaio inox, titanio, leghe di titanio, leghe di alluminio, leghe a base di nickel, leghe di cobalto-cromo, leghe a base di rame, oro, argento, platino, palladio la lista continua ad espandersi ogni anno. Questo perché molti produttori eseguono o supportano la ricerca per lo sviluppo di nuovi materiali.

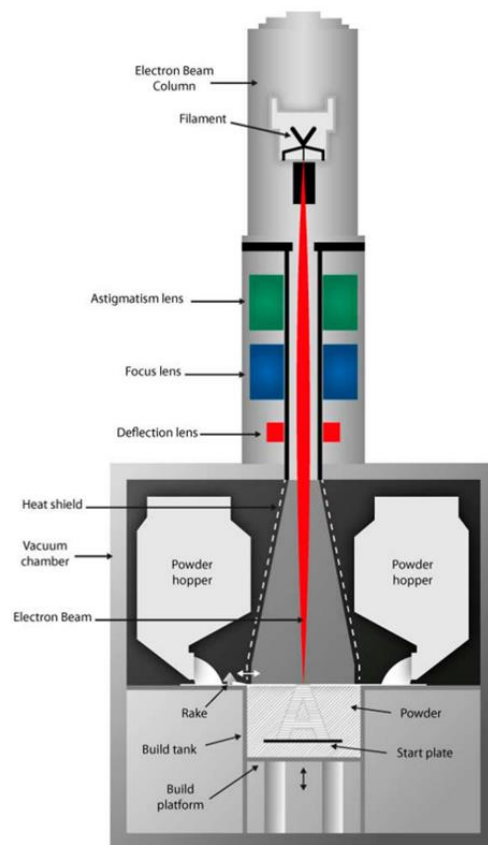
### a) PBF (Powder Bed Fusion)

Include tutti quei processi che utilizzano un metodo di focalizzazione dell'energia, che sia un fascio di elettroni o un fascio laser, per fondere selettivamente uno strato di un letto di polvere

Grazie alla rifusione di strati precedenti durante la fusione dello strato corrente si ha l'aderenza dello strato al resto della parte.

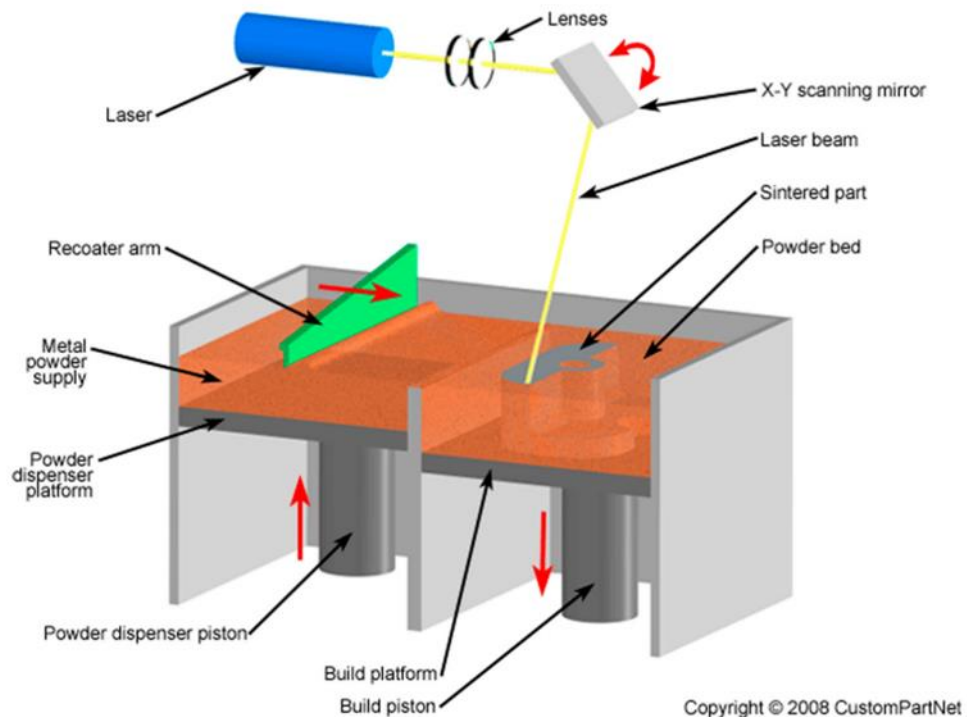
Per quanto riguarda le due sottogategorie SLM ed EBM sebbene entrambi i sistemi utilizzino lo stesso principio del letto di polvere per la fusione selettiva a livello di strati, vi sono differenze significative nella configurazione dell'hardware. Il sistema EBM è essenzialmente un fascio elettronico a scansione ad alta potenza, che richiede bobine magnetiche per collimare e deviare il fascio spazialmente, e un fascio di elettroni.

L'SLM ha in genere invece un sistema di controllo del percorso del laser e la sua focalizzazione, lenti e uno specchio o un galvanometro per la posizione del raggio. Anche la distribuzione delle polveri viene gestita diversamente.



*Figura 9 Schema EBM*

I sistemi SLM utilizzano in genere un sistema di alimentazione e lame di distribuzione che trascinano la polvere sulla superficie di costruzione (altri sistemi potrebbero utilizzare pistoni e rulli disperdenti), mentre i sistemi EBM utilizzano tramogge di polvere e un rastrello metallico. [8]



! SLM system schematic.<sup>252</sup> Image courtesy of CustomPartNet Inc.

*Figura 10 Schema SLM*

Entrambi i processi EBM e SLM richiedono alcuni passaggi: set-up della macchina, operazioni di recupero della polvere e rimozione del substrato.

Una macchina PBF richiede un substrato di costruzione, "piastra iniziale", per fornire supporto meccanico e termico al materiale di costruzione. SLM elabora e blocca il substrato mentre il processo EBM sinterizza la polvere che circonda la piastra per fornire maggiore stabilità (evita che la piastra si muova a causa della lama). Quando gli strati successivi della polvere vengono stesi, i layers già esistenti non devono muoversi; il substrato aiuta con funzione di supporto meccanico. Ha anche una funzione di scarico termico per la dissipazione del calore. Il funzionamento di una macchina PBF è strettamente regolato dai dettagli della strategia di scansione e dai parametri di processo. Dopo che il processo di

costruzione risulta essere completato si deve procedere con la rimozione della polvere in eccesso dalla camera di costruzione.

Per quanto riguarda le parti prodotte con EBM, questa polvere viene fatta passare attraverso un recovery-system per rimuovere e recuperare la polvere sinterizzata attorno alle parti.

Per i processi SLM, la polvere che circonda le parti non si sinterizza e può essere setacciata direttamente.

#### b) Direct energy deposition

Il DED comprende tutti i processi in cui l'energia focalizzata genera una pozza di fusione in cui si deposita la materia prima. La fonte di calore che qui viene utilizzata può essere un fascio laser. Il materiale di alimentazione utilizzato può essere in polvere o a filo.

Le origini di questa tecnologia possono essere ricondotte alla saldatura. Una delle tipologie di questo processo più utilizzate e commercializzate viene realizzata sfruttando una fonte di calore laser per fondere un flusso di materia prima in polvere.

Il set-up della macchina è relativamente semplice visto che il software della macchina controlla automaticamente quasi tutti i sensori all'interno del sistema. Come nel sistema PBF le tramogge di polvere devono essere riempite e bisogna posizionare un substrato di costruzione.

Nei sistemi che vengono alimentati a polvere la velocità di deposizione deve essere regolarmente controllata. La camera di costruzione è chiusa per garantire la sicurezza del laser ma non per forza all'interno è necessaria la presenza di un gas inerte. Infatti, per i metalli non reattivi si utilizza solo un gas di protezione diretto verso la pozza di fusione per garantire resistenza all'ossidazione. Per metalli reattivi invece, come il titanio, la camera viene riempita con un gas inerte (argon o azoto). La camera di costruzione di sistemi di questo tipo risulta essere molto più grande di una PBF. Come nei PBF, una parte completata è unita al substrato di costruzione. Le parti quindi così prodotte seguono un iter di post-processing sia termico che meccanico, al fine di ottenere le proprietà meccaniche e superficiali desiderate.

L'eccesso di polvere viene aspirato durante la pulizia della macchina e a seconda della procedura operativa applicata potrà essere recuperato o smaltito. Lo smaltimento è di solito un'opzione abbastanza costosa visto l'elevato costo di queste polveri.

Il DED può essere una tecnica davvero interessante se utilizzata per la riparazione di parti danneggiate.



*Figure 11 DMD utilizzata per riparare un componente*

#### c) Binder jetting

Questo sistema funziona in maniera molto semplice depositando il legante su una polvere metallica, indurendo il legante per tenere insieme la polvere, sinterizzando o consolidando la polvere legata e occasionalmente per infiltrazione con materiale bassofondente. In questo modo si riesce ad ottenere una lega con densità elevata e temperatura di fusione non eccessivamente elevata.

Questa tecnica essendo un processo di metallurgia delle polveri sarà accompagnata da un problema connesso alla porosità delle parti così ottenute.

Le stampanti Binder jetting depositano selettivamente legante liquido sopra una polvere metallica. Quando questo si asciuga, è possibile rimuovere dal sistema un mix molto fragile di legante-metallico, può essere trattato così da conferirgli resistenza meccanica, può richiedere 6-12 ore. Dopo la polimerizzazione, la parte viene poi trattata termicamente a  $\sim 1100^{\circ}\text{C}$  per 24-36 ore per sinterizzare la polvere sciolta e per bruciare il legante, lasciando una parte di metallo sinterizzato denso al 60%. L'infiltrazione si verifica quando il materiale parzialmente sinterizzato viene posto a contatto con una pool di fusione di un secondo

materiale con temperatura di fusione inferiore a quella del materiale sinterizzato. Ciò consente l'infiltrazione del metallo liquido nella struttura presinterizzata mediante azione capillare per formare una parte più densa. L'infiltrazione così può raggiungere una densità finale del 95%.

#### d) Sheet lamination

La laminazione dei fogli utilizza l'impilamento di fogli metallici tagliati di precisione in sezioni 2D partendo da un oggetto 3D. Dopo l'impilamento, questi fogli sono uniti o incollati metallurgicamente mediante: brasatura, saldatura per diffusione, saldatura laser, saldatura a resistenza o consolidamento ultrasonico. Una chiave di questo sistema è l'ordine in cui questi fogli vengono applicati e tagliati/lavorati. Possono essere tagliati o prima o dopo l'adesione. Alcuni dei vantaggi di questo processo sono bassa distorsione, facilità di realizzazione delle parti, superficie di buona finitura e bassi costi. Il problema è che le parti così ottenute non si troveranno bene a lavorare a taglio e trazione. Inoltre, l'accuratezza nella direzione Z non è facile da ottenere a causa del rigonfiamento. Risultano dunque essere davvero rilevanti le caratteristiche anisotropiche a causa del processo di costruzione.

### 2.3) Verso un vero e proprio processo industriale

La produzione additiva (AM) è sul punto di essere ampiamente adottata nella produzione industriale. Le migliori aziende del mondo hanno preso nota e stanno facendo mosse ambiziose per catturare il suo valore potenzialmente enorme. General Electric, ad esempio, ha acquisito due delle aziende leader specializzate nella tecnologia AM basata su metallo. BMW, GE, Google e Nikon sono tra gli investitori che stanno finanziando gli sforzi di una start-up della Silicon Valley per sviluppare una nuova tecnologia AM basata sui polimeri.

Tutto ciò sottolinea la necessità per gli attori di tutta la catena del valore - inclusi fornitori di materiali, fornitori di attrezzature e produttori finali - di determinare in che modo modellare l'ecosistema AM attivabile in azienda e rendere AM industrializzata una realtà.

Come già accennato nella realtà industriale bisognerà affrontare problematiche relative a salute, sicurezza e legate all'impatto sulla qualità e sulla produttività dell'utilizzo di AM Metal.[9]

Uno degli obiettivi di maggiore rilevanza è la produzione automatizzata di pezzi attraverso un processo produttivo che sia snello. Per raggiungere questo scopo i produttori dovranno essere in grado di abbattere limiti e perplessità che ad oggi ancora aleggiano sopra il mondo dell'additive.

La prima sfida è la rimozione delle polveri. Joseph Kowen [10] in un suo articolo ha analizzato alcuni dei rischi significativi per i produttori AM in questa fase del processo e ha messo in evidenza alcune delle tecnologie sviluppate per affrontarle.

Metal AM è uno sforzo industriale relativamente nuovo ma i produttori di sistemi AM sono consapevoli dei rischi posti dalla polvere in generale e dalle polveri reattive in particolare, e i sistemi tengono conto di tali rischi. Il vero problema è ciò che accade esattamente dopo che il processo di costruzione è stato completato e le parti sono pronte per il post-processamento, non è stato affrontato sistematicamente. I produttori di questi sistemi non hanno, in generale, offerto attrezzature per gestire il problema. Gli utenti sono stati lasciati ai propri dispositivi per gestire i rischi e l'inconveniente della rimozione delle parti e della polvere nel modo che ritengono più opportuno. Il momento in cui la produzione è terminata e le parti sono pronte per essere trasferite fuori dalla macchina per un'ulteriore elaborazione, questo risulta essere l'anello debole nel flusso di lavoro. L'uscita della piastra di costruzione dalla macchina è un momento spartiacque nel processo, per il quale non esiste un chiaro *modus operandi* o standard. Se non gestita, la rimozione della polvere potrebbe rivelarsi un fattore di raffreddamento che ne limita la crescita e l'industrializzazione.

#### 2.4) Punti deboli per i produttori di componenti metallici

- Rischio di esplosione: di gran lunga il fattore più importante è la riduzione del rischio di esplosione. Ciò significa evitare che la polvere fine possa penetrare nell'ambiente di fabbrica e presentare un rischio di esplosione. Questo è fondamentale per i metalli reattivi come l'alluminio e il titanio.
- Salute professionale: anche se vi fosse un rischio minore di esplosione, come per i metalli non reattivi, l'ingerire polveri sottili di metallo è un fattore di salute occupazionale sottovalutato. La pulizia manuale delle parti, indipendentemente dalle precauzioni prese per evitare l'ingestione di polvere, è piena di rischi per la salute sul lavoro. È stato dimostrato che particelle di metallo su scala nanometrica penetrano

nella pelle ed è troppo presto per sapere cosa potrebbe significare per gli esseri umani a livello cellulare. La migliore risposta è ridurre la polvere alla fonte prima che l'uomo entri in scena.

- Costi di manodopera: anche se non vi fossero rischi professionali o sanitari associati alle polveri metalliche, i costi di manodopera per la rimozione delle polveri sarebbero sempre importanti. Il lavoro manuale è direttamente correlato alla complessità della parte e questa rappresenta uno dei fattori che offre la più grande giustificazione, anche se non l'unica, per rendere la parte in additive.

I produttori AM desiderano quindi sistemi in grado di elaborare parti complesse con il minimo sforzo, poiché ogni ora aggiuntiva impiegata per rimuovere la polvere da strutture reticolari complesse o canali interni riduce la possibilità di rendere quella parte di AM. In luoghi ad alto costo di manodopera, una riduzione del tempo necessario per una parte potrebbe essere il fattore critico nel valutare la fattibilità di rendere la parte di AM.

- Recupero delle polveri: il mancato recupero della polvere è una perdita economica, anche senza considerare gli altri rischi che sono già stati descritti. Con l'aumento del costo della polvere aumenta anche l'incentivo a recuperarne di più. Le leghe di titanio sono oggi tra le polveri metalliche più popolari, grazie alla loro applicabilità negli ambiti aerospaziali e medici. Il prezzo di un chilogrammo di lega di titanio per i sistemi AM supera i 200 €. In un ambiente di produzione, risparmiandone anche un modesto quantitativo come la percentuale di polvere dispersa nel tempo si trasforma in una quantità significativa di denaro. L'ultimo 5-10% di polvere è il più costoso da rimuovere.
- Qualità della pulizia: Il prezzo della polvere di alluminio è solo di circa 35€/kg, ma anche se il produttore dovesse concedere un più alto grado di scarti di polvere nell'interesse di un risparmio di tempo di lavorazione, le parti pulite in modo imperfetto sono altamente indesiderabili, specialmente quelle con geometrie complicate come canali interni. I residui di polvere all'interno della parte possono causare gravi mal di testa e complicanze a valle e, come vedremo, attirano l'attenzione dei regolatori e delle autorità di controllo.

- Ripetibilità del processo: poiché la produzione additiva si sposta nel mainstream, la necessità di aderire ai protocolli standardizzati diventa più importante e in alcuni casi potrebbe essere richiesta come parte di un processo di certificazione. Ciò è più rilevante in settori come la produzione di dispositivi aerospaziali e medicali. I risultati della pulizia manuale possono variare a seconda dell'ora del giorno in cui la parte viene pulita, o della laboriosità e abilità del particolare lavoratore assegnato per pulirlo. Questa non è una ricetta per la buona industrializzazione dei processi AM. Se una parte sarà meno che perfettamente pulita, allora almeno tutte le parti di una serie dovrebbero essere uguali nella loro imperfezione.

## Capitolo 3: Stato dell'arte

### 3.1) Industrializzazione AM

Dopo 30 anni di ricerca, sviluppo, e utilizzo, il settore industriale continua ad espandersi con l'introduzione di nuove tecnologie, metodi, materiali e applicazioni. Un sempre più crescente numero di settori industriali e regioni geografiche stanno accogliendo AM.

È risultata tremendamente utile a chi si è trovato a lavorare nel design nel passato, ma si prevede un impatto ancora più forte nel futuro.

Ad oggi AM è una realtà ampiamente affermata. Nascono sempre più nuove tecnologie, ognuna di esse applicabile in un differente ambito del manufacturing.

In questa prospettiva la manifattura additiva può portare vantaggi in termini di geometrie e funzionalità dei prodotti. Migliorie si stanno attuando anche su tipologia dei materiali utilizzati, consumi energetici e costi di produzione, organizzazione logistica e time-to-market. [11]

Tre industrie - aerospaziale, medica e dentistica ed infine automobilistica - rappresenteranno circa il 50% del mercato AM nel 2020. L'attrattività e l'adozione di AM variano significativamente tra le industrie. In termini di applicazione dei processi AM, l'industria aerospaziale, medica e dentistica sono le industrie più mature. Per i partecipanti alla catena del valore, le differenze indicano la necessità di un'analisi di livello industriale che chiarisca la rilevanza delle tecnologie AM e come creare un plusvalore applicandole.



Figure 12 Gartener's 2017 hype cycle for 3D printing technologies

L'AM ha un enorme potenziale per soddisfare le esigenze non coperte dalla produzione industriale tradizionale e porta con sé un cambiamento di paradigma in termini di progettazione, organizzazione del processo produttivo e di business model. Queste tecnologie non si sostituiscono ai processi di fabbricazione tradizionali, ma li integrano.

Nell'industria aeronautica, ad esempio, il fattore principale alla base della spinta verso AM è la fattibilità di parti di aeromobili leggere e con forme complesse, sempre più funzionali e sempre meno costose, fasi di assemblaggio e relativi costi verranno saltati.[12]

Nella produzione di elettronica, il mercato di prodotti di tendenza a un più alto tasso di innovazione, hanno portato a una richiesta sempre crescente di tecniche di produzione in serie veloci, flessibili e facili da usare. La produzione additiva riprende la tendenza del prodotto customizzato e consente future produzioni personalizzate in serie. Una delle sfide più impegnative per quanto riguarda la produzione additiva negli oggetti elettronici e meccatronici è la necessità di una composizione multimateriale.

AM come già anticipato ha aperto nuove opportunità di business nell'industria biomedica. La principale tendenza alla guida nel mercato della tecnologia medica è la personalizzazione,

è possibile creare delle parti che si adattino perfettamente alle esigenze del cliente. Nell'ampio quadro delle applicazioni consolidate, quali gusci in-ear su misura per apparecchi acustici e la tecnologia rivoluzionaria per la biostampa 3D di tessuti e organi vascolari, sta rapidamente guadagnando una notevole importanza nei campi di protesi dentarie, protesi ortopediche degli arti superiori, nonché nella pianificazione preoperatoria in cardiologia.

Infine, troviamo l'industria automobilistica che utilizza la tecnologia AM come strumento importante nella progettazione e nello sviluppo di componenti automobilistici perché in grado di abbreviare il ciclo di sviluppo e ridurre costi di produzione e prodotto. [13]

Categorizziamo i casi d'uso AM esistenti in tre fasi di maturità:[14]

- R&D and Experimental: fase iniziale dell'adozione di AM, i produttori effettuano test che consentono loro di acquisire familiarità con le tecnologie AM ed esplorare i limiti.
- Prototyping and Making Spare Parts and Small Series: i produttori avanzano verso l'utilizzo di AM per produrre parti singole o parti in piccoli volumi. In generale, usano design convenzionali esistenti per queste parti piuttosto che riprogettandoli per catturare i benefici di AM.
- Industrial Series Production: nella fase più avanzata, si producono fino a 100.000 parti all'anno. Per trarre il massimo vantaggio da AM, riprogettano radicalmente le parti o producono parti personalizzate in grandi volumi. Inoltre, visto che producono grandi volumi di ciascuna applicazione, questi utenti avranno più macchine AM, creando “fabbriche AM dedicate”. I produttori migliorano la produzione applicando nuovi principi di progettazione, implementando tecnologie digitali e integrando i processi lungo la catena del valore.

L'adozione dipende da una complessa interazione dei vantaggi che AM offre a ciascun settore, dai pro e dai contro dell'uso delle sue tecnologie per qualsiasi applicazione specifica. Insomma, per decidere il passaggio ad AM, ogni azienda dovrà essere in grado di sviluppare un business-plan che risulti adeguato e che permetta di trarre il massimo da un investimento in questa direzione.

### 3.2) Campi di applicazione AM

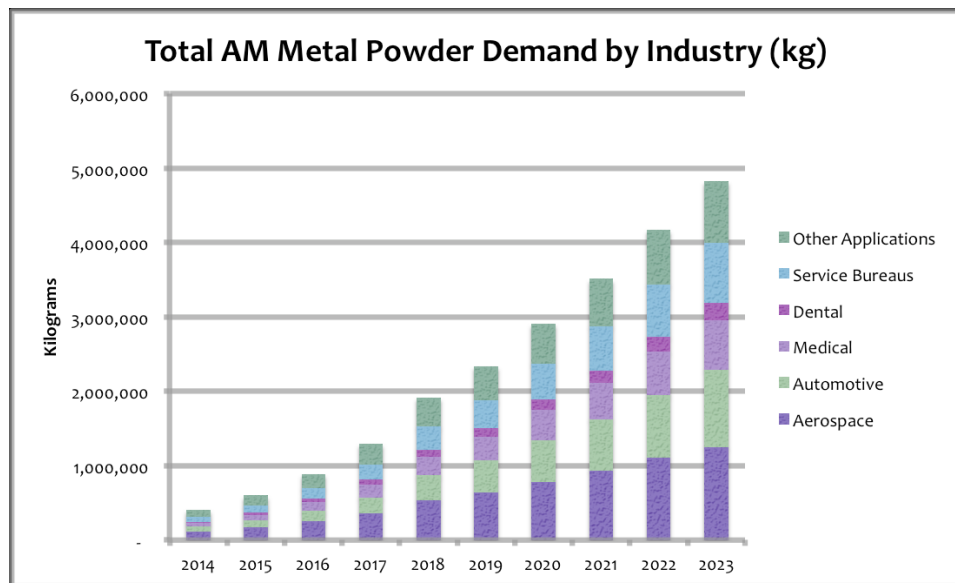
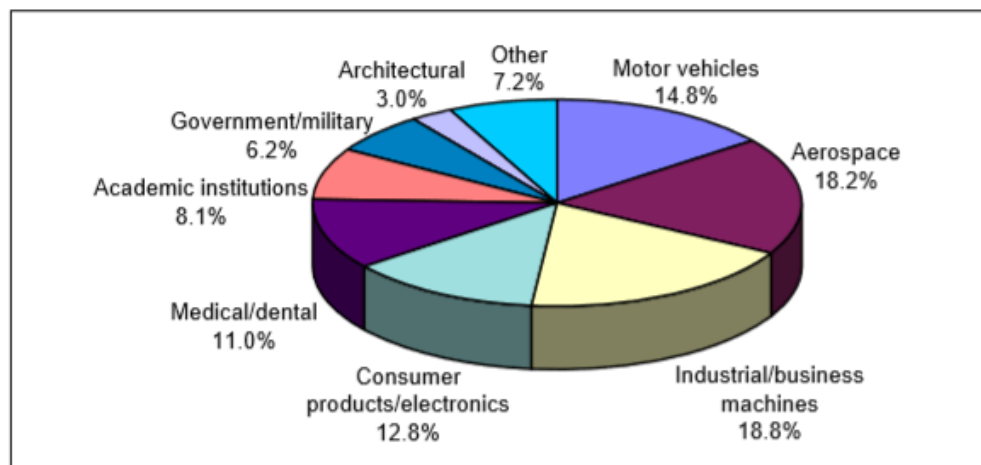


Figure 13 Total AM Powder demand by industry <https://www.smartechpublishing.com/news/metal-powder-shipments-am/>

Queste risultano essere le previsioni fino al 2023 fatte grazie a delle analisi come quelle presenti in Wohlers 2017 [15], è prevista una costante crescita. Nel grafico in figura 14 invece si vede come il mercato dell'additive è distribuito tra le varie industrie, per il quarto anno consecutivo la fetta più grande spetta ad industrial/business machines.



Source: Wohlers Associates, Inc.

Figura 14 Distribuzione mercato additive

#### a) Automotive

I produttori automobilistici hanno iniziato ad utilizzare AM per produrre utensili e componenti.

Ad esempio, per costruire il RollsRoyce Phantom, BMW ha utilizzato AM nella produzione in serie per produrre più di 10.000 parti, come supporti in plastica per pulsanti di blocco centrale e freni di stazionamento elettronici e prese. Il principale vantaggio è la riduzione dei tempi e dei costi associati allo sviluppo del prodotto.

Utilizzando AM, i produttori possono sia abilitare la personalizzazione sia ridurre i costi derivanti dal numero crescente e dalla complessità delle varianti di prodotto. Inoltre, AM consente ai produttori di ridurre il numero di gruppi di assiemi, integrare più funzioni in una singola parte e produrre progetti leggeri. Utilizzando AM per la produzione di pezzi di ricambio e strumenti per le varianti di prodotto fuori produzione, i produttori possono ridurre la necessità di mantenere gli inventari di articoli richiesti di rado.

Questi benefits sono particolarmente vantaggiosi per la produzione di componenti interni (per i quali vengono utilizzati prevalentemente polimeri), componenti strutturali ed esterni del corpo del veicolo (per i quali i metalli sono prevalentemente utilizzati) e sistemi per il controllo del clima e il raffreddamento del motore. L'AM in queste aree di veicoli è, quindi, la più matura.

Tuttavia, poiché la produzione automobilistica in genere comporta grandi volumi, ci si aspetta che la prototipazione rimanga l'uso predominante nel breve termine. L'AM sarà applicato in produzione in serie con volumi relativamente piccoli, come ad esempio auto e pezzi di ricambio ad alte prestazioni.

Ci si aspetta che AM sia maggiormente utilizzato nella produzione di componenti di motori ad alte prestazioni (come turbocompressori), parti strutturali in metallo, parti del telaio (come i tiranti dello sterzo) ed elementi decorativi composti da polimeri (come gli emblemi). I produttori automobilistici tedeschi, in particolare, sembrano muoversi decisamente verso AM, creando team di ingegneri e investendo nelle tecnologie.

In un articolo l'autore Cooper [16] sottolinea come DMLS è stata testata in base alle condizioni riscontrate in un'applicazione esigente come quella degli sport motoristici, dimostrando le solide capacità e la consistenza dei componenti prodotti da questa.

In un contesto di sport motoristici, con piccoli lotti di produzione di componenti che subiscono ripetute riprogettazioni nella ricerca di ulteriori vantaggi prestazionali, DMLS ha la capacità di fornire componenti geometricamente e meccanicamente capaci, che, combinati con la capacità di introdurre la complessità geometrica, offre significative opportunità per gli utenti finali di migliorare le prestazioni dei componenti.

#### b) Aerospace

I produttori aerospaziali utilizzano i processi AM per ottimizzare la forma dei pezzi e creare strutture leggere per ridurre i costi del carburante. Questi obiettivi sono di gran lunga i driver più importanti dell'adozione di AM nell'industria aerospaziale.

Inoltre, i produttori possono personalizzare i progetti di interni per le singole compagnie aeree e completare rapidamente gli aggiornamenti e le ristrutturazioni. AM consente ai produttori di rendere i pezzi di ricambio facilmente disponibili in tutto il mondo, in modo rapido, efficiente e conveniente.

I vantaggi che le tecnologie AM portano alla produzione aerospaziale sono particolarmente rilevanti per la realizzazione di componenti di sistemi di propulsione e motori a reazione, interni di cabina, sistemi di aria condizionata, idraulici e pneumatici, droni, satelliti.

La tecnologia sta avanzando rapidamente e presto emergeranno molti altri usi aerospaziali di successo. Si prevede che entro il 2030, AM sarà utilizzato per produrre circa il 20% delle parti critiche del motore prodotte oggi convenzionalmente. Ci si aspetta che AM venga ampiamente adottato anche nella produzione di interni di cabine di aerei.

#### c) Medical and dental

Siamo all'interno del ramo in cui la customizzazione la fa da padrone, si è in grado di creare impianti medici (per esempio protesi acetabolo [17]) e dentali.

La procedura è molto semplice, partendo dalle informazioni ricavate tramite TAC o raggi X si vanno a realizzare componenti con strutture trabecolari, le più adatte a garantire la migliore

osteointegrazione possibile. [18] Inoltre, i produttori possono creare superfici di impianti porose per una crescita ossea superiore e integrare più funzioni. I pazienti beneficiano di un minor numero di effetti collaterali e di costi chirurgici inferiori.

I vantaggi di AM sono particolarmente rilevanti in apparecchi acustici, ortopedia e protesi e guide e modelli chirurgici. Già circa il 90% degli apparecchi acustici venduti negli Stati Uniti dispone di gusci personalizzati AM.

Entro la fine del 2025 AM sarà probabilmente ampiamente utilizzato nella produzione di impianti ortopedici, applicazioni dentali, guide chirurgiche e strumenti medici.

### 3.3) AM e l'Industry 4.0

La rivoluzione industriale, ovvero Industria 4.0, è il recente movimento riguardante la tecnologia di automazione intelligente. In questa nuova era, l'utilizzo delle moderne tecnologie di produzione, nel contesto dell'integrazione di nuove tecnologie dell'informazione, svolge un ruolo importante sulla competitività economica. Industry 4.0 offre sistemi informatici e cibernetici per cooperare proficuamente, mirando a costruire fabbriche intelligenti ridefinendo il ruolo degli umani. [19]

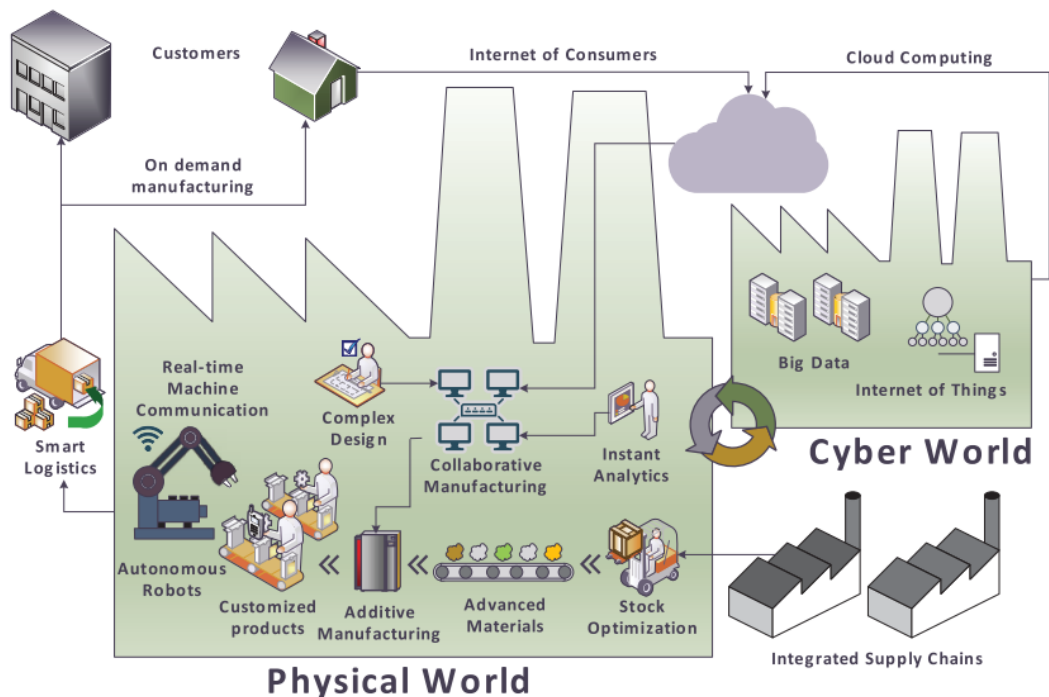


Figure 15 Schematic of smart factories with general properties required in Industry 4.0 [16]

Con l'avvento di questa nuova rivoluzione industriale, identificata nel termine "Industry 4.0" lo stato italiano punta a rilanciarsi, AM risulta essere uno dei protagonisti di questa nuova fase storica.

Le aziende che non vorranno diventare obsolete dovranno cercare di adattarsi a questo nuovo mondo per restare competitive.

Si va verso lo sviluppo di un nuovo mondo industriale flessibile, dinamico e veloce, sempre più produttivo, sostenibile (minori scarti) e che veda come obiettivo principale la funzionalità dei componenti realizzati.

Si prevede che la tecnologia AM sarà utilizzata in modo coerente per produrre prodotti finali per diverse applicazioni e industrie. Tuttavia, questo passo avanti richiede che i processi e le parti AM soddisfino gli standard di qualità e ripetibilità che attualmente non esistono. Pertanto, la comunità scientifica sta compiendo elevati sforzi per aumentare le conoscenze sui processi AM e sulla qualità delle parti.

AM di pezzi in metallo ha rintracciato da qualche anno la sua via in alcuni settori industriali, e la scena si sta rapidamente evolvendo: da una condizione in cui si guardava a questa maniera di creare come a un interesse di nicchia, si è arrivati ad una concretezza in cui le imprese realizzano parti completamente industrializzate e in lotti di numero anche notevoli nell'ordine di decine di migliaia. Questo, grazie al progresso degli impianti da una parte, e all'assorbimento da parte degli utilizzatori di principi di progettazione che raccolgono i benefici nascosti della produzione additiva dall'altro, sfrutta un tesoro velato.

Ad oggi la stima prevalente nel mercato della produzione additiva è la ricerca dell'alta produttività, che consenta d'ingrandire il trionfo delle applicazioni disponibili a nuovi settori e mercati. Per di più, i pezzi prodotti per fusione laser richiedono, come gli altri, di verifiche e certificazioni che diventano parte necessaria del ciclo produttivo.

"AM è un'enorme opportunità, ma richiede agli ingegneri di sviluppare una serie di competenze per supportarlo; i processi sono richiesti prima e dopo, questo è il più grande ostacolo per l'adozione di AM " [20]

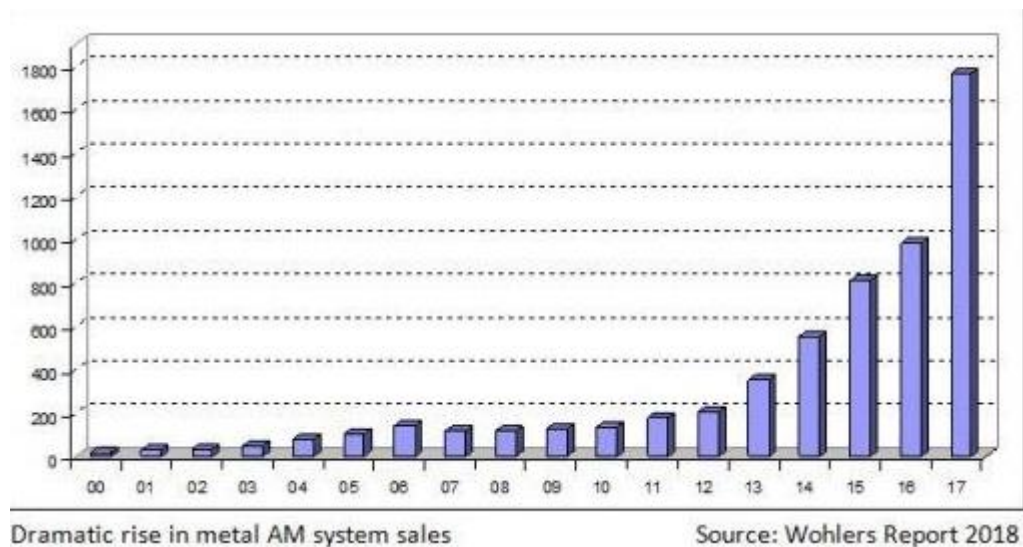


Figure 16 Wohlers 2018

Il rapporto Wohlers 2018 mostra un netto aumento nella vendita di sistemi di produzione di additivi metallici nel 2017. Secondo il nuovo rapporto, nel 2017 sono stati distribuiti circa 1800 sistemi AM metallici, rispetto al migliaio del 2016, con un incremento di quasi l'ottanta per cento. Questo accrescimento di sistemi AM in metallo segue il miglioramento del monitoraggio dei processi e delle misure di garanzia della qualità dei componenti in metallo.

### 3.3.1) Sistemi industriali per la produzione metallica additiva

L'obiettivo quindi è di ridurre i tempi per la produzione additiva industriale di componenti metallici di alta qualità tramite un sistema che sia completo, che contenga tutte le fasi del processo produttivo al suo interno.

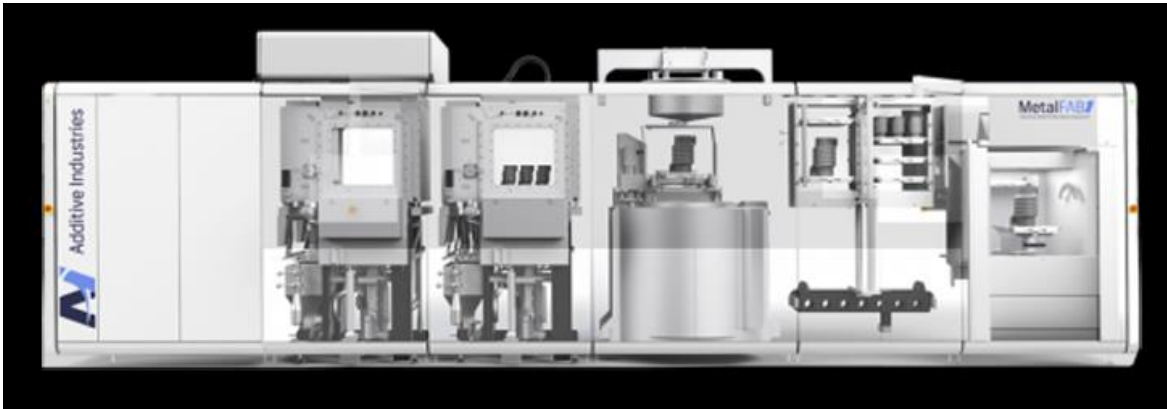
Si segue questa strada per ottenere riproducibilità, produttività e flessibilità nel campo della produzione additiva seriale.

A questo scopo alcune case produttrici hanno cominciato a realizzare sistemi integrati per AM metal per applicazioni industriali di alto livello in mercati esigenti come aerospace, medicale e automotive.

In questa direzione viene da sottolineare il lavoro compiuto da Additive Industries, azienda olandese fondata nel 2012 e ad oggi primo produttore al mondo per produzione metallica additiva. Da loro è stato sviluppato il sistema MetalFab1, sistema che tiene conto dell'architettura, dei moduli, di interfacce e sistemi di controllo che rispondono alle richieste

dei mercati. La tecnologia additiva qui utilizzata è il sistema di fusione a letto di polveri metalliche.

Si tratta di un sistema completamente automatizzato e integrato per la produzione additiva con la possibilità di lavorare diversi materiali, con funzioni di post-processing come i trattamenti termici di distensione delle tensioni, la rimozione dei particolari e sistemi di stoccaggio.



*Figura 11 MetalFab1 di Additive Industries [21]*

All'interno possiamo notare il modulo di controllo, una doppia camera di deposizione per massimizzare la produttività, il modulo atto ai trattamenti termici, il modulo rimozione pezzi e quello di stoccaggio.

## Capitolo 4: Design for AM

Il design for manufacturing (DFM) è la pratica di progettare prodotti per ridurre o minimizzare difficoltà e costi di produzione, concentrandosi a livello di componenti, ottimizzando la parte per il processo di elaborazione. Questo, per la produzione additiva (DfAM), si avvantaggia di tutte le possibilità di progettazione e ottimizza i componenti in base alle funzioni e requisiti del processo AM selezionato per la produzione, quindi ripensare, ridisegnare e rifinire il prodotto/componente esistente, utilizzando le caratteristiche di AM per migliorarne la funzionalità. [22]

Le linee guida su DfAM hanno in genere incoraggiato i progettisti a personalizzare i loro progetti per utilizzare i vantaggi dell'AM nel consentire geometrie complesse e ridurre il peso, pur essendo consapevoli dei limiti del processo AM, per garantire la producibilità o la "stampabilità" del componente o del prodotto. [23]

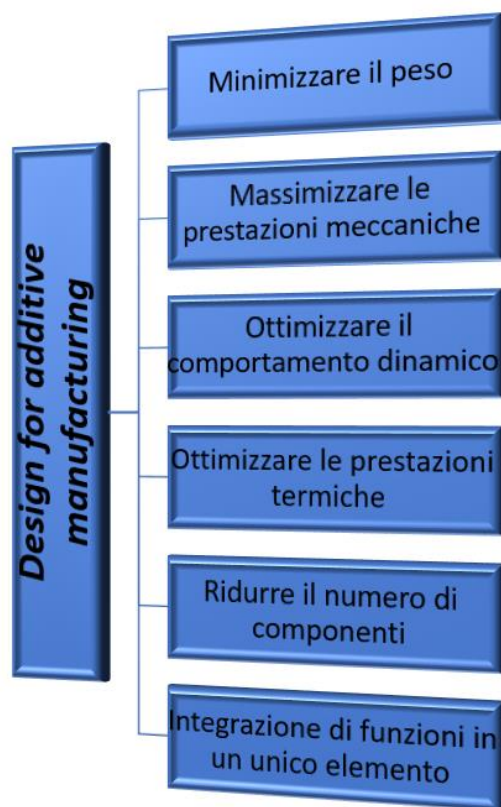


Figure 18 Potenzialità di un corretto DfAM

L'ottimizzazione topologica è un metodo di ottimizzazione strutturale che calcola la distribuzione ottimale del materiale all'interno di un dominio di progettazione (Design Space) per un determinato problema fisico. [24] I processi di produzione convenzionali spesso hanno difficoltà o addirittura non riescono a realizzare i progetti che risultano dall'uso di TO, a causa delle sue geometrie e forme complesse. D'altra parte, SLM, per la sua libertà di geometrie e di mancanza di vincoli di fabbricazione, è un processo di produzione particolarmente adatto per la progettazione TO. Ci sono diversi autori di vari articoli scientifici che combinano l'uso di TO con SLM con l'obiettivo di sfruttare al massimo entrambe le tecnologie.

Per comprendere il processo di ottimizzazione topologica in modo più immediato facciamo una breve parentesi sulla capacità di auto adattamento del nostro sistema osseo. È impossibile trovare linee rette. Le sezioni trasversali dell'osso sono arbitrarie e cambiano lungo la lunghezza. Anche la struttura interna delle ossa non è solida. Tuttavia, le parti tradizionali progettate dagli ingegneri sono dritte e omogenee, perché altrimenti la loro produzione sarebbe troppo lenta e costosa. Se si confronta un osso umano e una parte corrispondente prodotta da ingegneri con metodi tradizionali, quest'ultima perderà sia in termini di costi sia in termini di massa e massa/resistenza.

Guardandosi attorno è facile notare ciò che ha coinvolto la progettazione ingegneristica. Spesso hanno angoli di 90 gradi, principalmente causati dall'uso di strumenti di lavorazione. Anche le applicazioni di progettazione (programmi CAD) incoraggiano gli ingegneri a utilizzare linee rette e angoli di 90 gradi perché sono più facili da realizzare e misurare. Quando si usa AM, il progettista non ha bisogno di pensare a strumenti di produzione. Anche se è molto facile produrre parti in formato libero da AM, ci sono ancora alcune limitazioni. Il progettista deve tenere bene a mente:

1. Le dimensioni e la forma della parte stampata
2. La struttura a strati
3. Orientamento di stampa

I fattori che influenzano principalmente la progettazione e il successo della costruzione di una parte con il processo L-PBF sono descritti nelle sezioni seguenti.

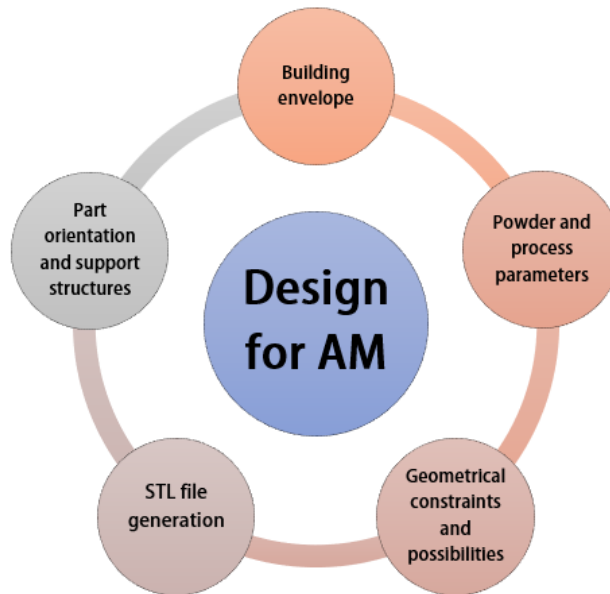


Figure 19 DFAM

Si può dire che:

- le regole di progettazione si basano sull'efficienza del processo;
- il design deve tenere conto della costruzione degli strati durante il processo, in particolare quelle fasi in cui la parte risulterà debole;
- l'orientamento della parte è fondamentale, in relazione alla riduzione al minimo dei supporti;
- la creatività la fa da padrona. Il progettista deve saper lavorare attorno a questi limiti usando i punti di forza del processo, costruire strati sovrapposti che ignorano la geometria di produzione dei processi convenzionali.

#### 4.1) Volume di costruzione

Una limitazione alle capacità dei sistemi L-PBF è la dimensione della parte. Ogni macchina ha il proprio volume di costruzione massimo in cui può avvenire una produzione parziale. Lo sviluppo di nuove tecnologie è molto rapido e le dimensioni delle camere di costruzione si stanno allargando. EOS M270, quella considerata per il nostro case study, ha un effettivo volume di costruzione di 250mm x 250mm x 215 mm. Questa informazione è essenziale per aiutare un progettista a capire le possibilità di produzione. Il componente progettato deve inserirsi nel massimo volume di costruzione della macchina. Se una parte risulta esserne più

grande, la parte deve essere divisa e le singole parti prodotte separatamente e poi riunite insieme. L'assemblaggio di una parte e il rimontaggio possono essere difficili, dispendiosi in termini di tempo e quindi costosi.

#### 4.2) Polvere, parametri di processo e geometrici

Le caratteristiche della polvere, insieme con i parametri di processo e la strategia di scansione, hanno influenza sull'accuratezza, la porosità e le proprietà meccaniche [25],[26], tolleranze dimensionali e sulla rugosità superficiale [27], [28], [29].

Il processo L-PBF coinvolge tipicamente spessori di strato tra 20 e 100  $\mu\text{m}$ , utilizzando polveri con dimensioni delle particelle comprese tra 20 e 45  $\mu\text{m}$ . Lo spessore minimo dello strato, che dipende dalla distribuzione delle dimensioni delle particelle della polvere usata, ha un impatto sulle dimensioni minime delle pareti, sulla precisione lungo l'asse z (impilamento dei livelli) e sulla finitura superficiale. Negli ultimi anni alcuni ricercatori [30] hanno sviluppato algoritmi, con uno spessore variabile dello strato governato dalla geometria della parte. Sfortunatamente, lo slicing adattivo non è ancora disponibile in tutte le tecnologie L-PBF e sebbene possa essere efficace quando si costruisce una singola parte, diventa complessa da gestire quando ci sono più parti sulla piattaforma di costruzione con geometria diversa. Nel piano xy, la dimensione minima delle caratteristiche strutturali, ad esempio la parete sottile, è limitata dalla dimensione della pozza di fusione, che è determinata dalla dimensione del punto laser e dai parametri di processo (potenza laser, velocità di scansione, distanza di tratteggio, offset del fascio, ecc.). Generalmente, lo spessore minimo della parete è il doppio del diametro della pozza di fusione, circa 200  $\mu\text{m}$ , per i modelli strutturali. L'accuratezza nel piano xy è determinata per L-PBF da errori di posizionamento statici e dinamici degli specchi di scansione e tensioni residue associate al passaggio dalla polvere al metallo denso. Per questo motivo, vincoli geometrici e possibilità sono correlati al materiale utilizzato, alle strategie di processo adottate [28],[25], e alla macchina L-PBF utilizzata [5]

#### 4.3) File STL

Il linguaggio di STL è ancora considerato lo standard per il trasferimento di informazioni tra software CAD e apparecchiature AM., nonostante la creazione di un nuovo file 3D, utilizzato per archiviare e descrivere gli oggetti da elaborare attraverso le tecnologie AM (ISO /

ASTM52915-16 2016). Questo formato descrive la geometria della superficie di un modello tridimensionale usando triangoli. Il software commerciale converte un file CAD in un file STL basato su valore soglia definito dall'utente per convertire in modo uniforme l'intero corpo pezzo in faccette triangolari. Più triangoli compongono un modello, più grande è la dimensione del file e più dettagliato l'oggetto. Pertanto, la scelta dei valori dei parametri del file STL può influenzare la precisione e la superficie delle parti.

#### 4.4) Orientamento e strutture di supporto

In AM, l'orientamento della parte all'interno del volume di costruzione viene selezionato in base a considerazioni diverse.

Si decide posizione ed orientamento della parte che possa minimizzare uno o più di questi parametri:

- i. Superficie di supporto
- ii. Proiezione sul piano XY
- iii. Altezza Z
- iv. Sezione massima su XY

Se non aiutati da un programma che lavori tramite algoritmi di ottimizzazione, per l'orientamento della parte si dovrà fare completo affidamento, oltre che alle regole base, all'esperienza dell'operatore che compie la scelta.

In primo luogo, la forma e le dimensioni complessive della parte possono limitare i possibili orientamenti, poiché devono adattarsi al volume di costruzione della macchina. In secondo luogo, grazie alla strategia di costruzione strato per strato, la qualità di ogni superficie dipende in gran parte dal suo orientamento rispetto alla piattaforma dell'edificio. La struttura stratificata dei processi AM produce un effetto scala della superficie. In generale, l'impatto di questo effetto dipende fortemente dall'angolo di costruzione di una superficie, mentre la rugosità della superficie complessiva è causata dalla risoluzione del processo AM specifico.

Come si può immaginare la generazione di strutture di supporto aumenta i tempi di processo, inoltre causa un deterioramento della finitura superficiale della parte, per questo motivo si cerca di individuare l'orientamento che assicuri il minimo volume di supporto. Generalmente le superfici rivolte verso il basso possono essere costruite senza supporto

sopra i 45°. La qualità di queste superfici aumenta all'aumentare dell'angolo di orientamento.

Un'ultima informazione che vale la pena sottolineare è che la strategia layer-by-layer genera una direzionalità nella microstruttura che causerà l'anisotropia sulle proprietà meccaniche risultanti, come resistenza a trazione, duttilità o vita a fatica della parte. [31]

#### 4.5) Requisiti per finitura parte

Le linee guida di progettazione descritte nel paragrafo precedente si concentrano essenzialmente sull'ottimizzazione del prodotto per funzionalità e producibilità. Comunque, le parti AM possono richiedere ulteriori post-processi, operazioni di lavorazione per finitura di superfici di accoppiamento o per produzione di fori precisi e rotondi, che il processo AM non riesce a realizzare. Queste aggiuntive operazioni devono essere considerate nel processo di progettazione al fine di evitare difficoltà nella fase di lavorazione.

È necessario aggiungere delle quote per la lavorazione sulle superfici da rifinire e rimuovere piccoli fori dal disegno della parte.

Per di più, una parte AM è tipicamente caratterizzata da una geometria complessa, è necessario un fissaggio elaborato per tenerla in una macchina utensile. Questi aspetti sono spesso trascurati nella fase di progettazione e le operazioni di post-processo sono considerate una preoccupazione minore. Al contrario, è importante che siano aggiunte alla progettazione della parte per fornire un riferimento nella configurazione della lavorazione. Inoltre, altre caratteristiche aggiuntive, integrate nel design, possono essere richieste per aumentare la rigidità della parte, al fine di evitare deflessioni o vibrazioni durante la lavorazione, o per tenere il pezzo nella macchina. La considerazione dei requisiti di finitura nel processo di progettazione può influenzare notevolmente la forma della parte finale prodotta in AM.

#### 4.6) Metodologia definizione design

Si presenta un approccio progettuale per AM in cui sono state integrate le tecniche di ottimizzazione topologica, re-design per AM, analisi FEM e considerazioni sui requisiti di finitura, con lo scopo di ottenere un design funzionale che sfrutti al massimo tutti i benefici che AM può fornire.

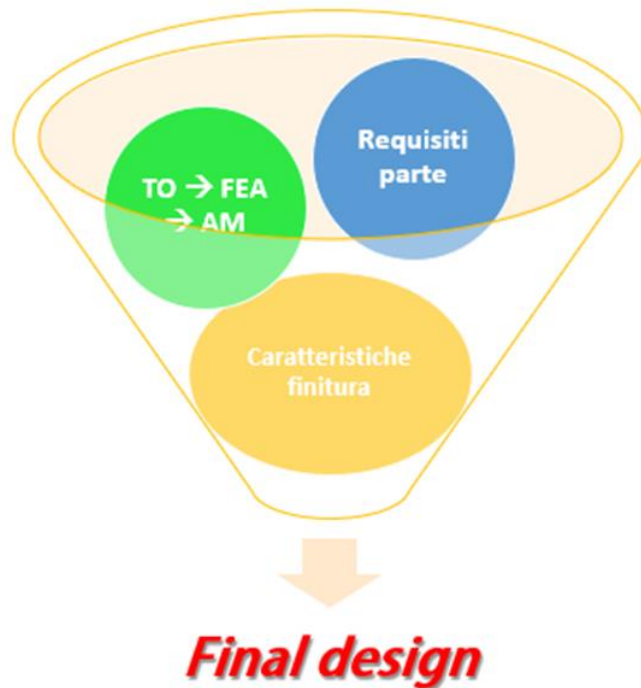


Figura 20

Il pieno potenziale della libertà progettuale può essere ottenuto facendo un uso efficace dell'ottimizzazione della topologia (TO), un approccio matematico che può essere utilizzato per ottimizzare il layout del materiale all'interno di uno spazio di progettazione fornito (design space). L'obiettivo è raggiungere gli obiettivi prestazionali-funzionali e per raggiungere questo obiettivo è necessario fornire carichi e vincoli [32].

Questo metodo funziona in maniera immediata, si definisce una variabile di progettazione, solitamente la densità, che viene utilizzata per determinare la migliore distribuzione del materiale all'interno design space definito dal progettista, in base ai vincoli progettuali e ingombri. Il risultato di questo metodo è una mappa di densità, con valori compresi tra 0 e 1, rispettivamente elementi vuoti e pieni.

TO aiuta a ridurre il peso delle strutture, mantenendo le stesse prestazioni o addirittura migliorandole. Poiché i risultati forniti dalle simulazioni di ottimizzazione della topologia sono in genere forme complesse, è possibile che in determinate circostanze solo i processi AM consentano di produrre una parte ottimizzata. Dopo la fase TO, sono necessarie ulteriori operazioni sul modello ottimizzato, dovrà essere generato un modello con densità uniforme,

poiché è l'unico formato attualmente accettato dai sistemi AM al fine di ottenere un componente che sia effettivamente fabbricabile e utilizzabile.

Successivamente quando TO viene utilizzata per definire una forma ottimale per la produzione AM, non vengono applicati vincoli di produzione nella procedura. Infatti, gli algoritmi di vincoli sono disponibili solo per i processi convenzionali. Di conseguenza, le parti possono essere disconnesse. Pertanto, dai risultati della topologia bisogna interpretare una forma che sia regolare ed è necessario cercare di mantenere questa forma il più vicino possibile alla forma effettiva ottimizzata, nel rispetto degli obiettivi raggiunti attraverso il processo di ottimizzazione. Quest'ultima è un'attività che richiede tempo che deve essere condotta manualmente e in modo iterativo, ma è essenziale per ottenere una soluzione ottimale. Inoltre, la progettazione dovrebbe essere rivista prendendo in considerazione le regole di progettazione per la tecnologia AM utilizzata, in modo da garantire un processo efficiente.

Un ulteriore passaggio è necessario per convalidare la geometria ottimizzata in base all'insieme di carichi e vincoli che definiscono i requisiti della parte, si deve effettuare una nuova analisi, mediante strumenti software FE, sulla parte riprogettata.

Infine, un'ultima ottimizzazione TO può essere applicata al progetto modificato per valutare se sia possibile ottenere ulteriori miglioramenti nella geometria, per aumentare il rapporto resistenza/peso o per rendere la distribuzione dello stress più omogenea. Il risultato è un design ottimale.

## Capitolo 5: Case study

### 5.1) Introduzione

Durante questo lavoro di tesi si affronta la “Riprogettazione di un componente in ambito aerospace per AM tramite ottimizzazione topologica”.

Si utilizza questa tecnica di ottimizzazione per la ricerca della morfologia ottimale. Questa se utilizzata nel modo corretto è in grado di fornire una forma che rappresenti il miglior compromesso tra peso e prestazioni con un unico inconveniente, che risulta essere limitata dal metodo di produzione scelto.

Si parte dall'analisi del pezzo originario, definendone vincoli e materiale, successivamente si passa ad un'analisi FEM per capire come il componente reagisce ai carichi di lavoro. Il passaggio successivo è di individuare il design space in accordo con i vincoli di processo e geometrici. In seguito, si passa alla fase di ottimizzazione topologica. In questo modo si inizia ad avere un'idea della possibile configurazione del componente così progettato. Deciso il design grazie alla TO si rimodella il pezzo, lo si verifica nuovamente tramite FEM e si converte il file in formato STL. In questo modo si è in grado di caricarlo su un programma interfacciato con la macchina che verrà utilizzata per la produzione. (EOS M270) (MAGICS MATERIALISE).

Durante questo ultimo passaggio si decide l'orientamento della parte in macchina e il volume di supporto.

Si fanno tentativi per individuare la soluzione migliore variando il parametro di ottimizzazione e mantenendo un algoritmo di calcolo preciso. Una volta scelto l'orientamento ritenuto più idoneo si effettua un'ulteriore rimodellizzazione andando a considerare eventuali correzioni necessarie per la creazione di un volume di supporto inferiore e il sovrametallo necessario per le successive lavorazioni.

Tutti i passaggi sono trattati in maniera approfondita e dettagliata.

Così facendo si comprende l'importanza assegnata da un progettista ad ognuna di queste fasi, individuando i vantaggi di un processo AM, in particolare L-PBF, connesso all'ottimizzazione topologica.

## 5.2) L'oggetto di studio

L'oggetto fisico da ottimizzare topologicamente, analizzare staticamente e produrre tramite AM è la forcina di un'antenna utilizzata in ambito aerospace.

Questo lavoro propone come obiettivo principale quello di aumentare la rigidità del componente nell'ottica di un'ottimizzazione della topologia e se possibile anche una riduzione del peso del componente, cercando di migliorare le prestazioni della forcina sottoposta a vari casi di carico.

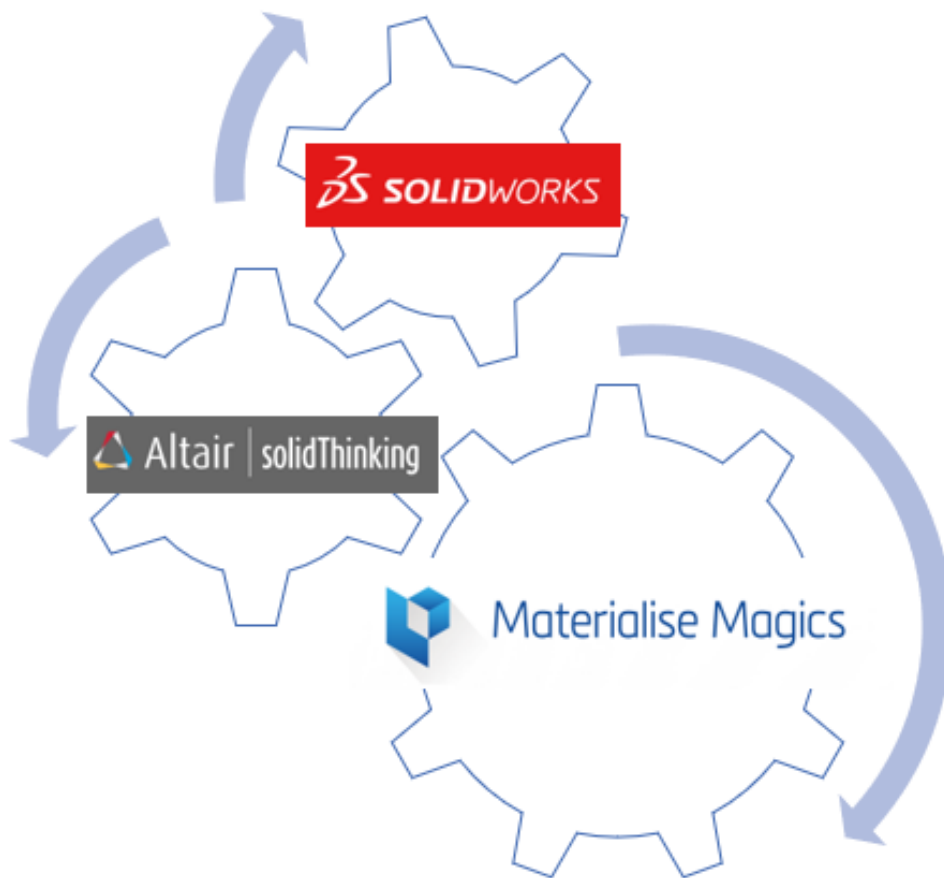
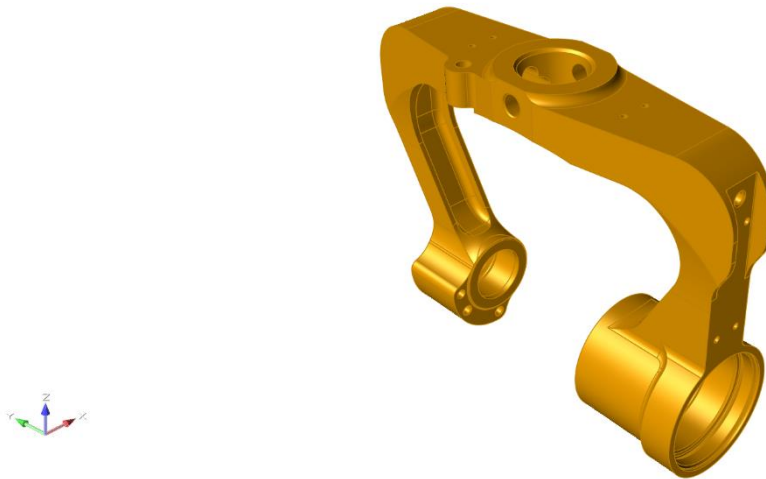


Figura 21 Panoramica programmi utilizzati

Necessaria risulta l'interpretazione e reingegnerizzazione della geometria estratta, il componente deve essere interpretato e riprogettato in modo da consentirne una facile fabbricazione. [33]

Una parte importante del post-processing è quella di comprendere le implicazioni di tutte le parti del progetto

La topologia finale del componente, risultante dalla post-elaborazione, è realizzata per la produzione del componente per un processo di fusione a letto di polvere con il macchinario EOS M270.



*Figura 22 Componente originale*

Quello che vediamo in fig.22 è il componente originale, così come pensato dall'azienda per AM. Da questo si tirano fuori vincoli geometrici e misure di ingombro necessarie alla definizione del Design Space su cui andare ad attuare l'ottimizzazione topologica.

Per quanto riguarda i casi di carico sono stati forniti dall'azienda e sono quelli su cui è stato richiesto di effettuare la verifica utilizzando come vincolo progettuale spostamenti inferiori a 0.3 mm in corrispondenza dell'area in cui sono installati i cuscinetti. La richiesta è di allineamento dei cuscinetti, ponendosi nella situazione più critica di cuscinetti a sfere radiali che non sono in grado di compensare eventuali disassamenti. Questo valore è determinato dall'entità del gioco radiale interno; un gioco maggiore consentirebbe di sopportare carichi assiali ancora più elevati.

### 5.2.1) Impostazione modello ed analisi FEM.

In questa sezione viene brevemente spiegato come è stata avviata l'analisi FEM per la valutazione della tensione di Von Mises e degli spostamenti, sui quali il vincolo imposto è di mantenersi al di sotto di 0.3mm.

Per vedere come si comporta il componente così pensato ai vari casi di carico il primo passo da effettuare è importare il parasolid, contenente la geometria della parte, sul programma solidThinking Inspire 2018.1. utilizzato per la costruzione del modello fisico.

Una volta all'interno del software è possibile inserire dapprima il materiale utilizzato, AlSi10Mg con le dovute caratteristiche:

| <b>Materiale</b> | <b>E (Mpa)</b> | <b>Nu</b> | <b>Densità<br/>(kg/m<sup>3</sup>)</b> | <b>Carico di<br/>snervamento (MPa)</b> | <b>Coeff. Di esp.<br/>Termica (°C<sup>-1</sup>)</b> |
|------------------|----------------|-----------|---------------------------------------|----------------------------------------|-----------------------------------------------------|
| <b>AlSi10Mg</b>  | 75000          | 0.33      | 2670                                  | 240                                    | 20.000E-06                                          |

AlSi10Mg è una lega di alluminio che combina buona resistenza meccanica, buone proprietà termiche, un peso contenuto e una grande flessibilità di opzioni nel post-processing. Per questi motivi è un materiale utilizzato frequentemente nei settori automobilistico, aerospaziale e dell'automazione. Le applicazioni comprendono telai, condutture, componenti per motori, strumenti e stampi di produzione, da utilizzarsi sia per la prototipazione sia per la produzione.

Per ulteriori dettagli riguardo a questa polvere metallica rimandiamo alla scheda di sicurezza qui citata [34].

Si va quindi ad impostare un modello di analisi FEM con solidthinking:

- Massa concentrata rappresentativa delle varie masse parassita a cui è sottoposto il componente. Valore: 0,522 kg. Coordinate:

| <b>X (mm)</b> | <b>Y (mm)</b> | <b>Z (mm)</b> |
|---------------|---------------|---------------|
| 0.406         | 0.454         | -95.304       |

in tal maniera il software calcola i momenti di inerzia del componente

| Mass Moment of Inertia          |                                     |
|---------------------------------|-------------------------------------|
| Autocalculate Moment of Inertia | <input checked="" type="checkbox"/> |
| lxx                             | 130.23 kg*mm <sup>2</sup>           |
| lyy                             | 130.23 kg*mm <sup>2</sup>           |
| lzz                             | 130.23 kg*mm <sup>2</sup>           |
| lxy                             | 0 kg*mm <sup>2</sup>                |
| lxz                             | 0 kg*mm <sup>2</sup>                |
| lyz                             | 0 kg*mm <sup>2</sup>                |

Figura 23 Momenti di inerzia

- Creazione connettore rigido centro di massa-componente e inserimento supporto necessario per l'applicazione di determinati casi di carico:

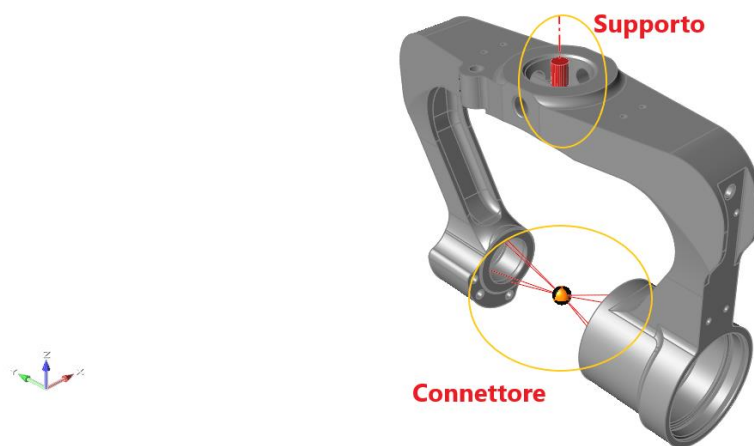
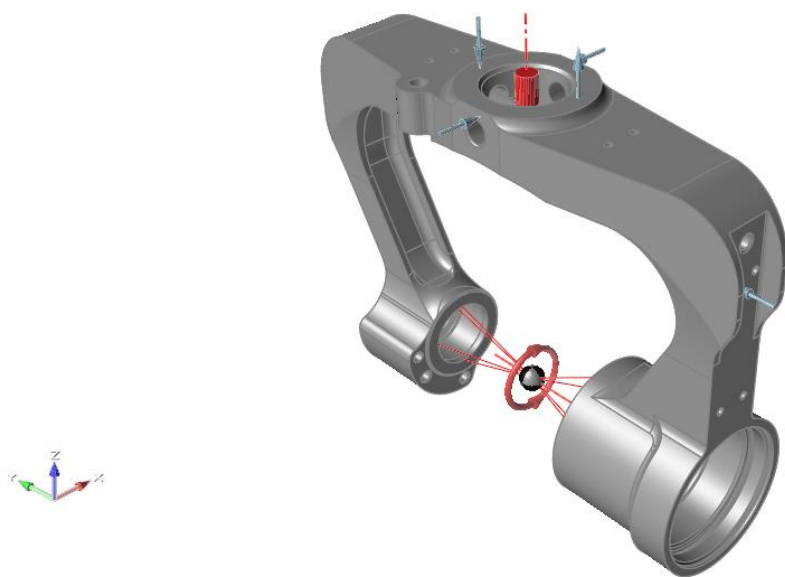


Figura 24 Configurazione connettore e supporto (rigidi)

- Impostazione load case, nel nostro sistema sono 12:

| Name     | X <sub>+</sub> C <sub>+</sub> | Y <sub>+</sub> C <sub>+</sub> | X <sub>+</sub> C <sub>-</sub> | Y <sub>-</sub> C <sub>+</sub> | Z <sub>+</sub> C <sub>+</sub> | Z <sub>-</sub> C <sub>+</sub> | X <sub>+</sub> C <sub>-</sub> | X <sub>-</sub> C <sub>-</sub> | Y <sub>+</sub> C <sub>-</sub> | Y <sub>-</sub> C <sub>-</sub> | Z <sub>+</sub> C <sub>-</sub> | Z <sub>-</sub> C <sub>-</sub> |
|----------|-------------------------------|-------------------------------|-------------------------------|-------------------------------|-------------------------------|-------------------------------|-------------------------------|-------------------------------|-------------------------------|-------------------------------|-------------------------------|-------------------------------|
| g Load 6 |                               |                               |                               |                               |                               | ✓                             |                               |                               |                               |                               |                               | ✓                             |
| g Load 5 |                               |                               |                               |                               | ✓                             |                               |                               |                               |                               |                               | ✓                             |                               |
| g Load 4 |                               |                               |                               | ✓                             |                               |                               |                               |                               |                               | ✓                             |                               |                               |
| g Load 3 |                               | ✓                             |                               |                               |                               |                               |                               |                               | ✓                             |                               |                               |                               |
| g Load 2 | ✓                             |                               |                               |                               |                               |                               |                               | ✓                             |                               |                               |                               |                               |
| g Load 1 |                               |                               | ✓                             |                               |                               |                               | ✓                             |                               |                               |                               |                               |                               |
| Supporto | ✓                             | ✓                             | ✓                             | ✓                             | ✓                             | ✓                             | ✓                             | ✓                             | ✓                             | ✓                             | ✓                             | ✓                             |
| C-       |                               |                               |                               |                               |                               |                               | ✓                             | ✓                             | ✓                             | ✓                             | ✓                             | ✓                             |
| C+       | ✓                             | ✓                             | ✓                             | ✓                             | ✓                             | ✓                             |                               |                               |                               |                               |                               |                               |

Figura 25 Casi di carico



*Figura 26 Componente originale (visualizzazione forze e coppie applicate)*

In fig 26 si ha una visualizzazione di tutti i casi di carico. I valori di accelerazione ed elevation torque sono:

|                      |             |
|----------------------|-------------|
| <b><i>g load</i></b> | 36g         |
| <b><i>Coppia</i></b> | 0.056665 Nm |

È possibile adesso lanciare l'analisi. La tabella (fig.27) mostra i risultati ottenuti.

Si possono quindi facilmente visualizzare le condizioni di carico maggiormente critiche in termini spostamenti massimi e tensioni di Von Mises massime:

| Load Case ▼ | Max Displacement ▼                                                                              | Max von Mises Stress ▼                                                                             |
|-------------|-------------------------------------------------------------------------------------------------|----------------------------------------------------------------------------------------------------|
| X+_C-       | 4.759e-001 mm  | 7.849e+001 MPa  |
| X-_C+       | 4.759e-001 mm  | 7.849e+001 MPa  |
| X+_C+       | 4.726e-001 mm  | 7.810e+001 MPa  |
| X-_C-       | 4.726e-001 mm  | 7.810e+001 MPa  |
| Y+_C-       | 1.993e-001 mm  | 7.450e+001 MPa  |
| Y-_C+       | 1.993e-001 mm  | 7.450e+001 MPa  |
| Y+_C+       | 1.993e-001 mm  | 7.449e+001 MPa  |
| Y-_C-       | 1.993e-001 mm  | 7.449e+001 MPa  |
| Z+_C-       | 2.481e-002 mm  | 1.751e+001 MPa  |
| Z-_C+       | 2.481e-002 mm  | 1.751e+001 MPa  |
| Z+_C+       | 2.443e-002 mm  | 1.782e+001 MPa  |
| Z-_C-       | 2.443e-002 mm  | 1.782e+001 MPa  |

Figura 27 Tabella contenente i valori degli spostamenti massimi e delle tensioni di Von Mises massime per ogni caso di carico

L'analisi ci mostra come il componente così realizzato non risulta rientrare nelle specifiche richieste, si trovano valori nell'intorno di 0.4 mm per ben quattro casi di carico. Si riesce ad individuare quali sono le situazioni che causano gli spostamenti più elevati e dunque si cominciano ad immaginare delle possibili soluzioni.

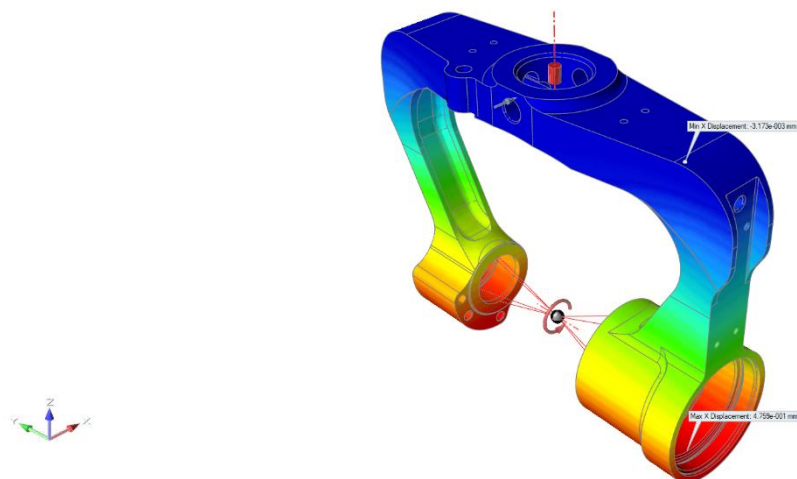


Figura 28 Mappa degli spostamenti X+\_C-

Nella fig.27 qui sopra, la mappa degli spostamenti, riprende il caso di carico  $X+$   $C-$  la zona che subisce gli spostamenti più elevati è in basso, proprio dove saranno presenti i cuscinetti.

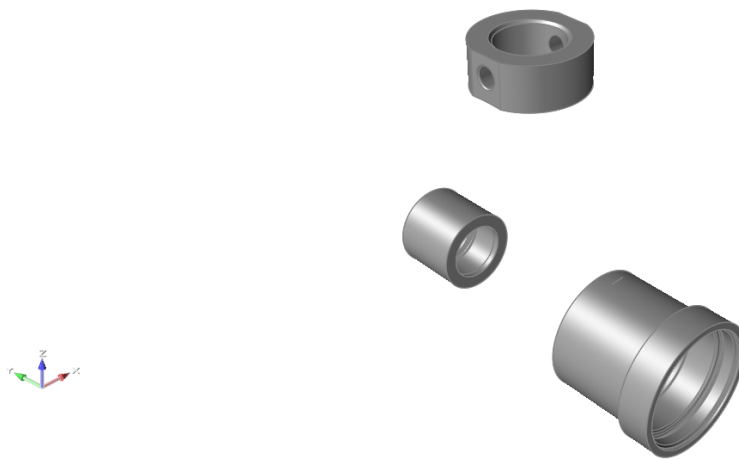
Nel paragrafo successivo si spiegherà come conferire maggiore rigidità al componente, eseguendone una riprogettazione che miri anche ad un'ottimizzazione morfologica e non solo funzionale.

### 5.2.2) Definizione Design Space

Si deve definire un Design Space ingrandito, attraverso il quale riuscire a recuperare la rigidezza necessaria per il componente essere funzionale alla sua applicazione.

Individuate quali sono le parti che si possono modificare, quelle su cui il progettista non deve rispettare alcun vincolo, si comincia con dividere il componente.

Tramite l'utilizzo di Solidworks il componente viene quindi suddiviso in cinque parti, di cui tre invariabili:

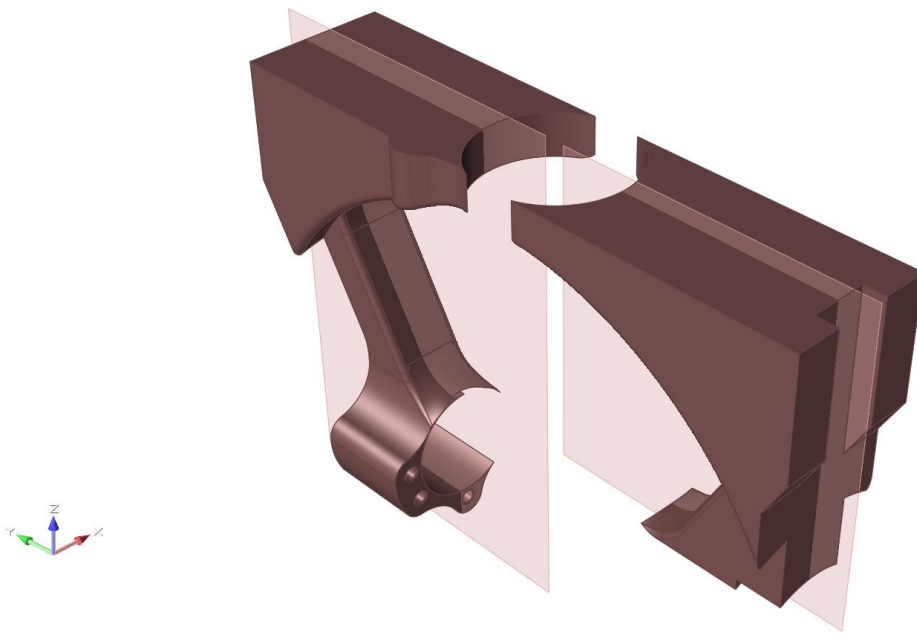


*Figura 29 Parti invariabili componente*

Una volta suddivisa così la geometria si va a modellare il Design-space tramite solidwors, creato il file parasolid, e quindi la nuova geometria, si caricano le parti così suddivise su Inspire Solidthinking e si inseriscono nuovamente casi di carico e tutto.

La geometria del DS (DesignSpace) è realizzata in base ai limiti di ingombro conosciuti e ai vincoli da rispettare, in questo caso bisogna considerare il posizionamento della scatola elettrica in un lato delle due parti del componente.

In figura viene mostrato il risultato ottenuto. La parte così creata, può essere sottoposta ad ottimizzazione topologica.



*Figura 30 Design Space*

Si assegna la funzione di Design Space alla parte desiderata, in questo modo quando lanceremo l'ottimizzazione il software sarà in grado di riconoscere le parti ottimizzabili.

Si impone anche un vincolo di shape controls, garantendo la simmetria rispetto al piano YZ delle nuove geometrie che si andranno a generare, così da avere un aiuto nella fase seguente di rimodellazione.

Prima di avviare la fase di ottimizzazione topologica si imposta il sistema fisico al DS e si effettua l'analisi FEM.

Dai valori in tabella si vede che il DS così pensato risulta essere largamente più resistente rispetto al componente originale, sia in termini resistenza che di rigidità, corrispondendo esattamente a ciò che ci si aspettava.

| Load Case ▼ | Max Displacement ▼↑                                                                             | Max von Mises Stress ▼                                                                             |
|-------------|-------------------------------------------------------------------------------------------------|----------------------------------------------------------------------------------------------------|
| X+_C-       | 7.907e-002 mm  | 2.045e+001 MPa  |
| X-_C+       | 7.907e-002 mm  | 2.045e+001 MPa  |
| X+_C+       | 7.836e-002 mm  | 2.037e+001 MPa  |
| X-_C-       | 7.836e-002 mm  | 2.037e+001 MPa  |
| Y+_C-       | 5.021e-002 mm  | 2.224e+001 MPa  |
| Y-_C+       | 5.021e-002 mm  | 2.224e+001 MPa  |
| Y+_C+       | 5.021e-002 mm  | 2.225e+001 MPa  |
| Y-_C-       | 5.021e-002 mm  | 2.225e+001 MPa  |
| Z+_C-       | 1.085e-002 mm  | 9.385e+000 MPa  |
| Z-_C+       | 1.085e-002 mm  | 9.385e+000 MPa  |
| Z+_C+       | 1.079e-002 mm  | 9.489e+000 MPa  |
| Z-_C-       | 1.079e-002 mm  | 9.489e+000 MPa  |

Figura 31 Risultati analisi Max VM & Max spostamento

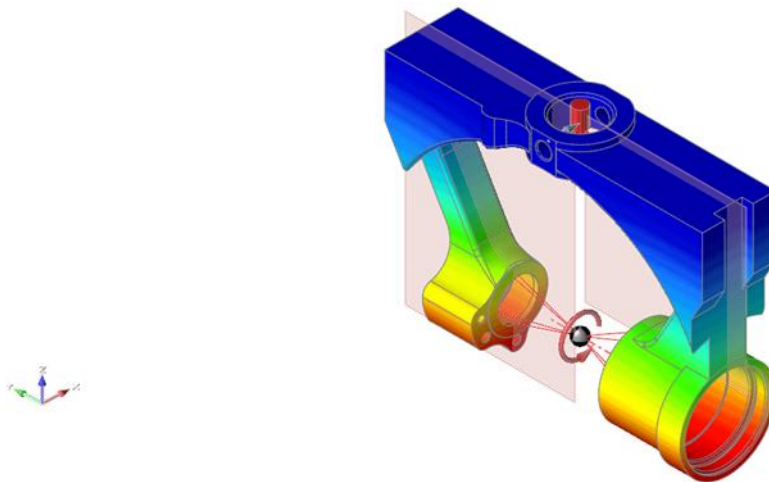


Figura 32 Spostamenti caso X+\_C-

### 5.2.3) Ottimizzazione topologica

Si può quindi passare alla fase di TO, qui sotto si vedono i parametri impostati nell'ottimizzazione. È stata lanciata con l'obiettivo di massimizzare la rigidezza, riducendo il volume totale del DS del 50%. Lo spessore entro il quale verranno creati delle parti vuote qui è quello preimpostato dal software (5.9367mm).

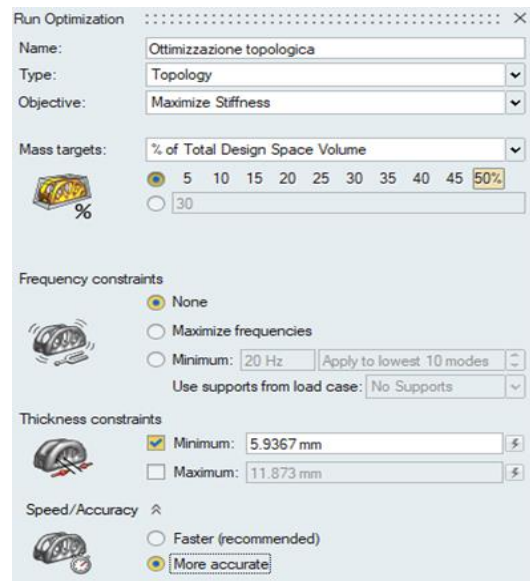
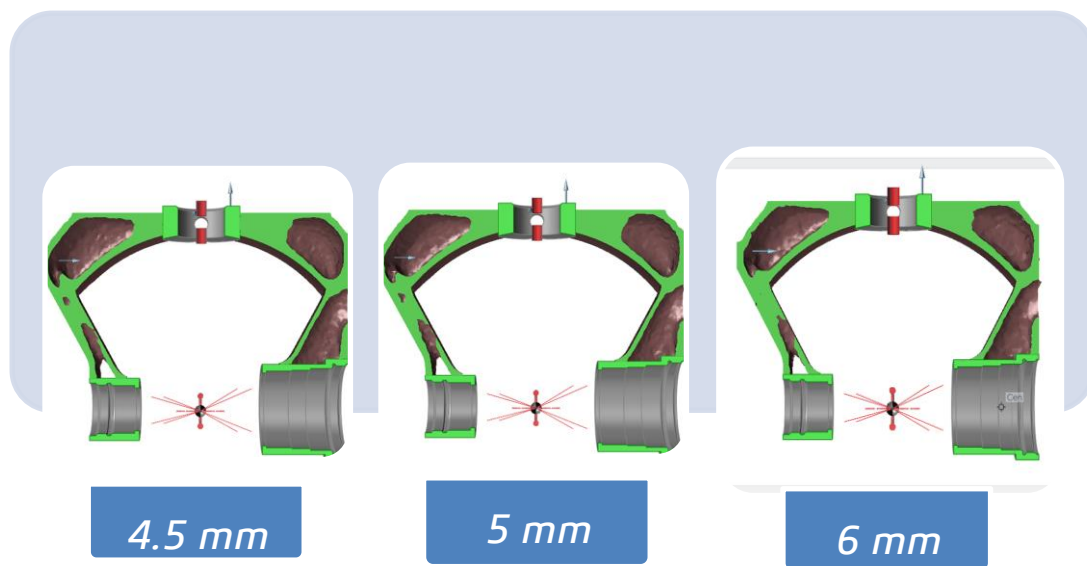
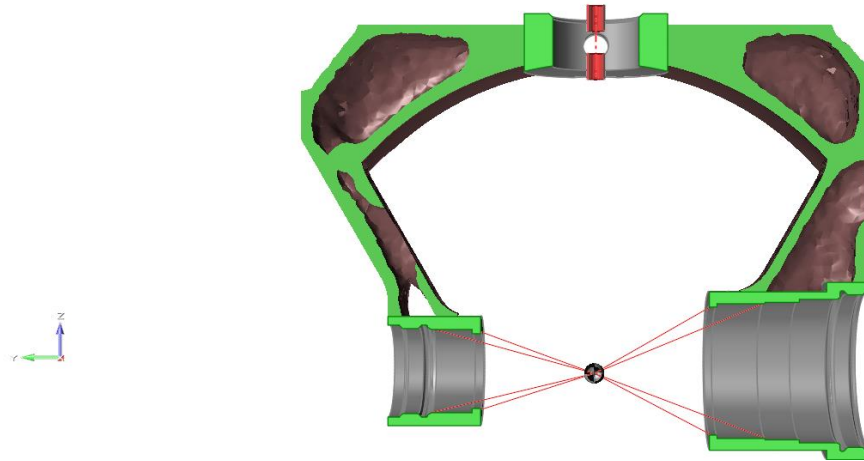


Figura 33 Parametri Ottimizzazione Topologica



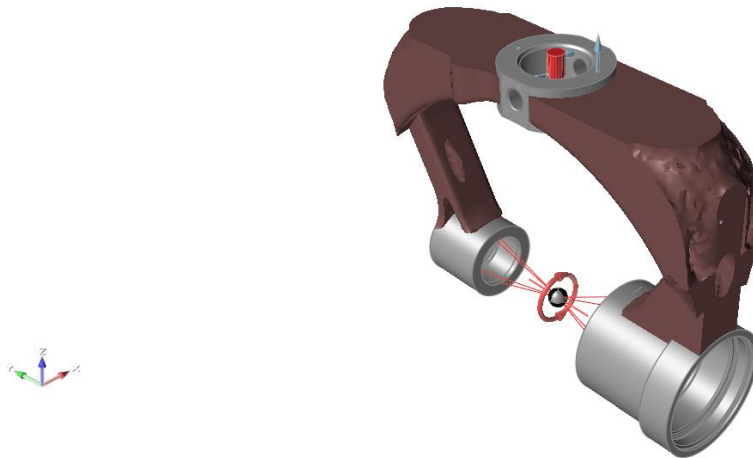
In realtà come si vede in figura ne sono state effettuate più di una variando proprio il valore dello spessore minimo a 4.5 mm, 5mm e 6 mm; si è notato che i risultati sono molto simili tra di loro. L'algoritmo che si sceglie di utilizzare è sempre quello accurato.

Si mostrano i risultati che si ottengono e dai quali si è partito per creare le nuove geometrie nella seguente fase di rimodellazione del componente.



*Figura 34 Vista in sezione risultata TO thickness (5.9367mm)*

Con la vista in sezione si riesce a fare vedere le parti del componente che possono essere generate andando a creare dei vuoti, consentendo così un alleggerimento.



*Figura 35 Vista ISO risultata TO*

Dalla vista ISO vengono messi in risalto le forme in cui si possono modellare le superfici poste negli angoli superiore. Inoltre, si nota come dal lato sia sinistro che destro del componente si possano andare a creare delle strutture cave che arrivino fino alla superficie.

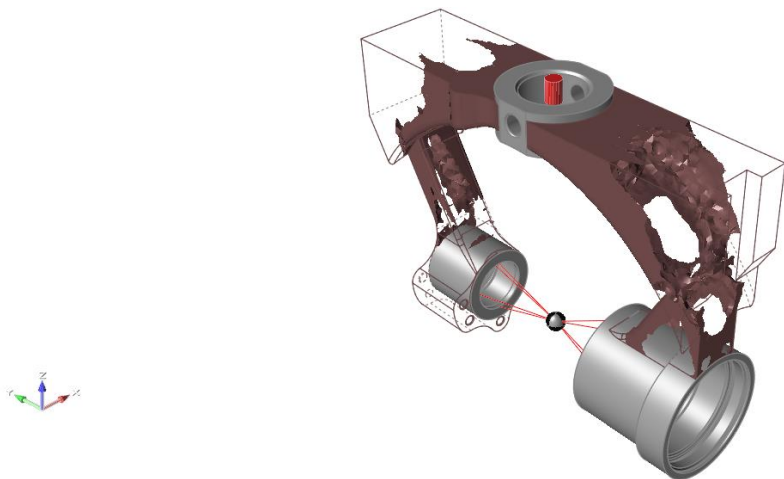


Figura 36 Risultato TO con Shape Explorer max

Con quest'ultima e particolare vista si è agito sul comando shape explorer. Così facendo si vede quali sono le parti del componente in cui è possibile andare a rimuovere ulteriore materiale, sempre nel rispetto di vincoli e casi di carico. Ovviamente questo lavoro di modellazione viene fatto insieme alla visualizzazione dello stress di VM, in questo modo andremo a togliere materiale nelle parti che risulteranno meno sollecitate.

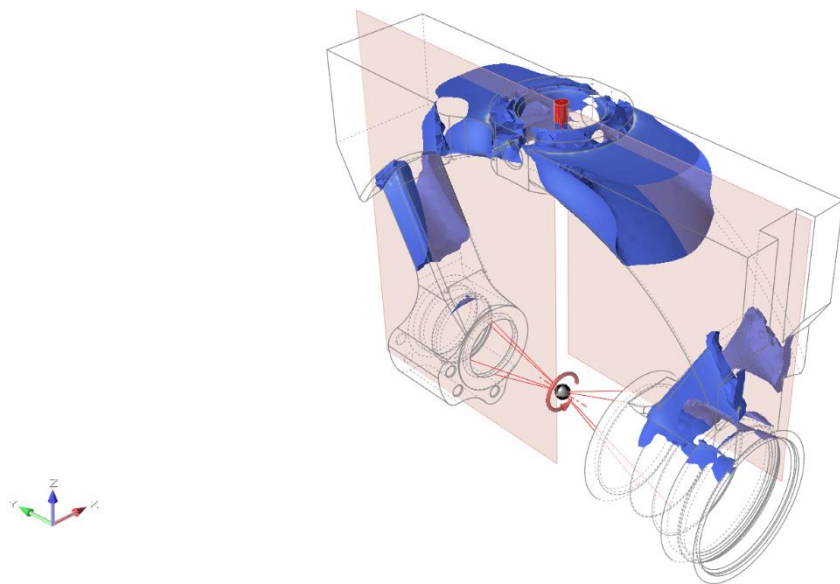


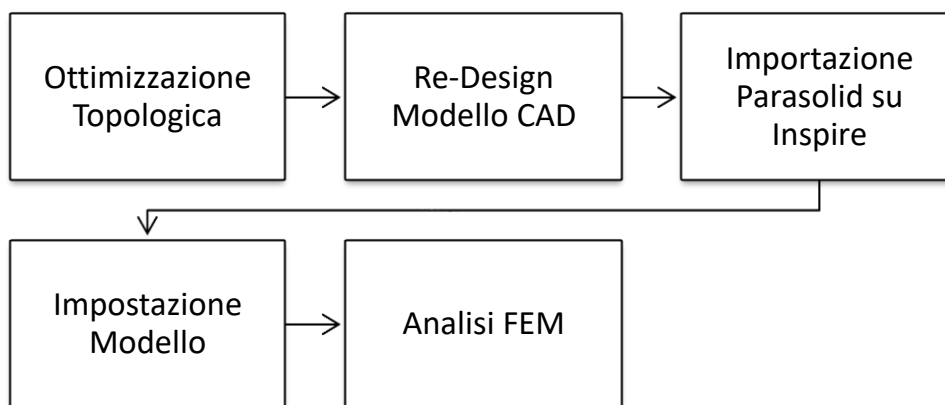
Figura 37 Andamento zone con VM STRESS più elevata X+\_C-

Considerando i risultati ottenuti si procede dunque con la fase di ReDesign, tenendo ben presente di dover trovare il giusto connubio tra ottimizzazione topologica e risultati dell'analisi FEM.

### 5.2.3) Redesign

In questa fase di progetto si è lavorato di continuo tra solidworks e Inspire.

Il workflow qui eseguito è semplice, ed è stato ripetuto più e più volte fino ad un primo di design definitivo di primo tentativo.



Ne vengono effettuati più tentativi poiché si è alla ricerca del design che dia maggiori vantaggi in termini di funzionalità, peso, rigidità e resistenza.

Le nuove geometrie create su solidworks sono state generate cercando di restare il più prossimi possibile ai risultati della TO e sempre nel rispetto degli andamenti degli stress di VM. In figura si mostra la prima geometria definitiva pensata e realizzata tramite SD:

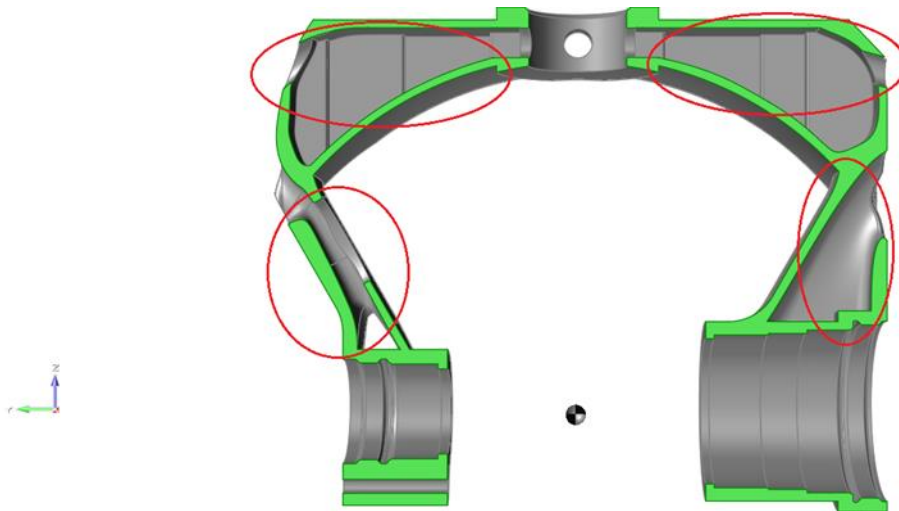


Figura 38 Vista in sezione Redesign

Grazie al software di modellazione CAD sono state create tutte le geometrie, sono state svuotate varie parti del componente cercando di restare il più fedeli possibile ai risultati della TO. Nell'immagine qui sopra, grazie alla vista in sezione, si esibiscono le parti vacanti e i fori generati.

Nella figura di sotto invece si mostra come è avvenuta la modellazione delle superfici esterne.

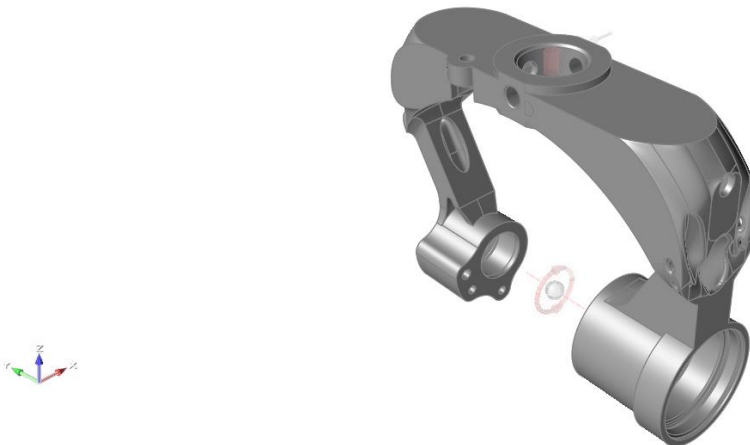


Figura 39 Vista ISO Redesign

Una volta fatto ciò si passa dalla geometria all'analisi FEM del componente così riprogettato. Si estrae dunque il file parasolid e lo si carica sempre su Inspire per impostare l'analisi.

Si espongono i risultati ottenuti in termini di max stress di VM e spostamenti.

Si può subito sottolineare come i valori qui riportati (fig.39) sono inferiori al caso del componente originale, abbiamo un primo riscontro di quelli che sono i risultati positivi che si possono ottenere tramite l'ottimizzazione topologica.

| Load Case ↓ | Max Displacement ▼                                                                                | Max von Mises Stress ▼                                                                               |
|-------------|---------------------------------------------------------------------------------------------------|------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| X+_Coppia+  | 1.173e-001 mm    | 3.459e+001 MPa    |
| X+_Coppia-  | 1.182e-001 mm    | 3.475e+001 MPa    |
| X-_Coppia+  | 1.182e-001 mm    | 3.475e+001 MPa    |
| X-_Coppia-  | 1.173e-001 mm    | 3.459e+001 MPa    |
| Y+_Coppia+  | 9.171e-002 mm    | 3.022e+001 MPa    |
| Y+_Coppia-  | 9.172e-002 mm    | 3.013e+001 MPa    |
| Y-_Coppia+  | 9.172e-002 mm    | 3.013e+001 MPa    |
| Y-_Coppia-  | 9.171e-002 mm    | 3.022e+001 MPa    |
| Z+_Coppia+  | 1.877e-002 mm    | 1.407e+001 MPa    |
| Z+_Coppia-  | 1.884e-002 mm    | 1.390e+001 MPa    |
| Z-_Coppia+  | 1.884e-002 mm   | 1.390e+001 MPa   |
| Z-_Coppia-  | 1.877e-002 mm  | 1.407e+001 MPa  |

Figura 40 Risultati analisi Max VM & Max spostamento

Dalle figure di sotto vediamo che la mappatura sia di VM e degli spostamenti risulta sempre la stessa delle varie analisi effettuate, significa che il componente è realizzato nel rispetto della funzionalità.

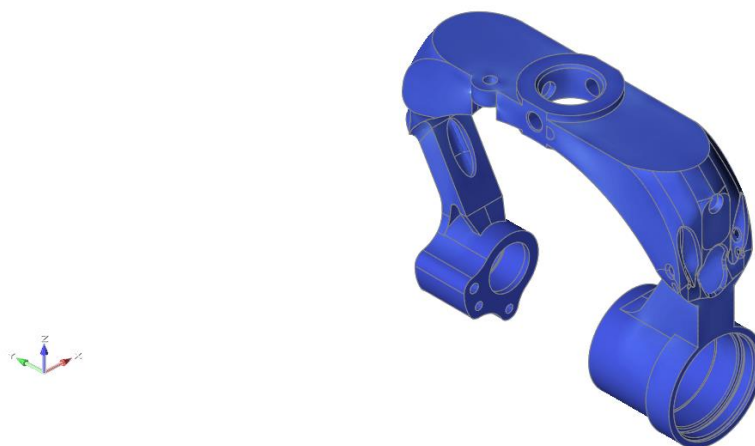
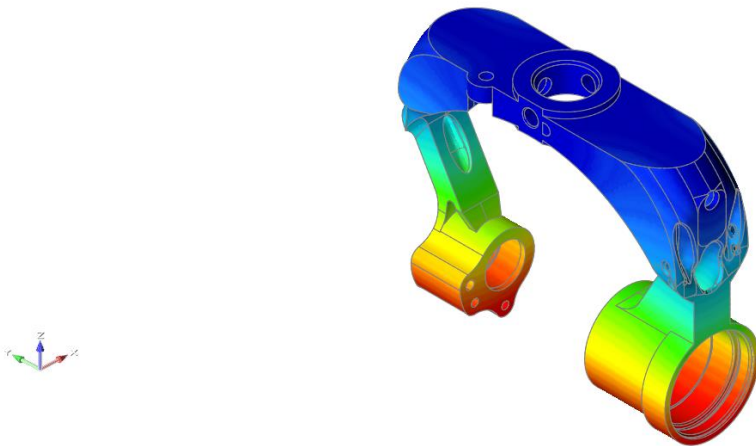


Figura 41 Andamento VM STRESS caso X+\_C-



*Figura 42 Spostamenti caso X+\_C-*

Una volta fatto ciò si è cercato di alleggerire il componente visto che in questa fase di progetto il peso risulta essere ancora simile al componente pensato dall'azienda.

Prima di fare queste nuove modifiche si è creato il file STL del componente così realizzato e lo si è caricato all'interno di Magics Materialise.

Si ha così l'opportunità di valutare delle possibili migliorie geometriche che ci permettano di evitare la realizzazione di supporti in zone che potrebbero essere di difficile rimozione. Tutto questo avviene in modo immediato tramite questo software realizzato appositamente per le tecnologie AM, in grado di permettere una visualizzazione rapida dei problemi che si potrebbero avere inserendo il file così come lo abbiamo realizzato in macchina.

### 5.3) File STL e generazione supporti

Verificata la tenuta del componente tramite l'analisi FEM si riapre il file parasolid su SD contenente la geometria del componente e lo si esporta nel formato STL. Adesso lo si può caricare sul programma Magics Maerialise.

È un software davvero versatile, leader nel market di preparazione dati ed editing del file STL. Molto utile perché capace di correggere errori, come triangoli intersecanti o con normali invertite per esempio, ed inoltre è fondamentale per la preparazione della piattaforma di produzione.

È bene tenere in mente che questo passaggio risulta necessario visto che InspireSolidthinking è un software CAE e non CAM.

La sua utilità sta nell'inserimento di un modello matematico del sistema fisico da studiare, calcolo numerico sul modello e visualizzazione ed analisi dei risultati. Ciò che manca è l'analisi del modello per generare le istruzioni necessarie al macchinario per eseguire il processo.

Di seguito si presentano i passaggi fatti.

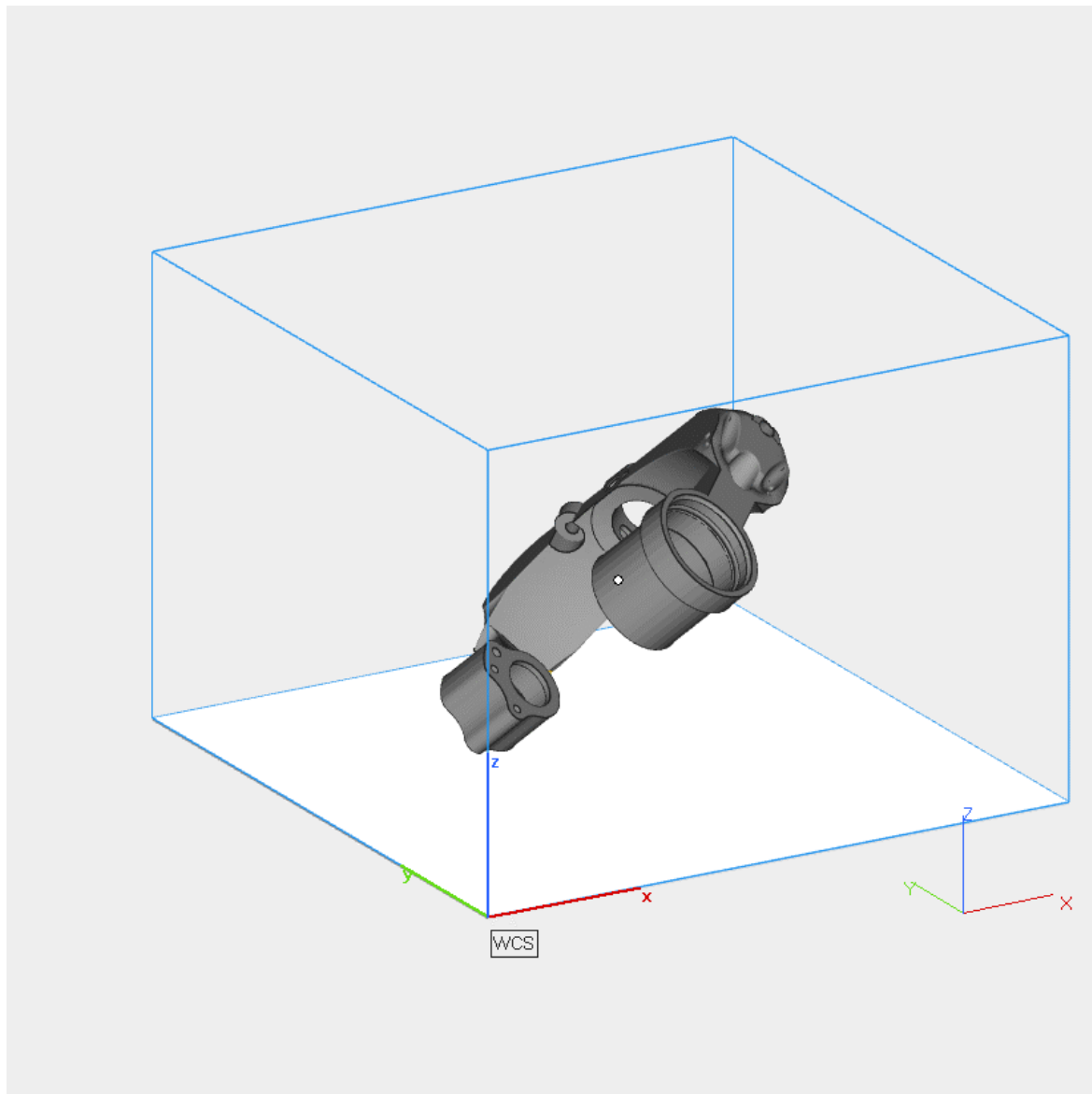
Si carica il file contenente il componente, lo si inserisce all'interno di una scena dove per scena non s'intende altro che la configurazione della macchina che verrà utilizzata per la produzione, in questo caso EOS M270.

Definito il profilo della macchina e quindi tutti i parametri relativi a piattaforma, laser e supporto, si orienta il pezzo in base alle regole di generazione dei supporti. Per avere anche delle indicazioni sul corretto orientamento del pezzo si utilizza una funzione del software grazie alla quale può essere ottimizzato in base a dei criteri di riduzione:

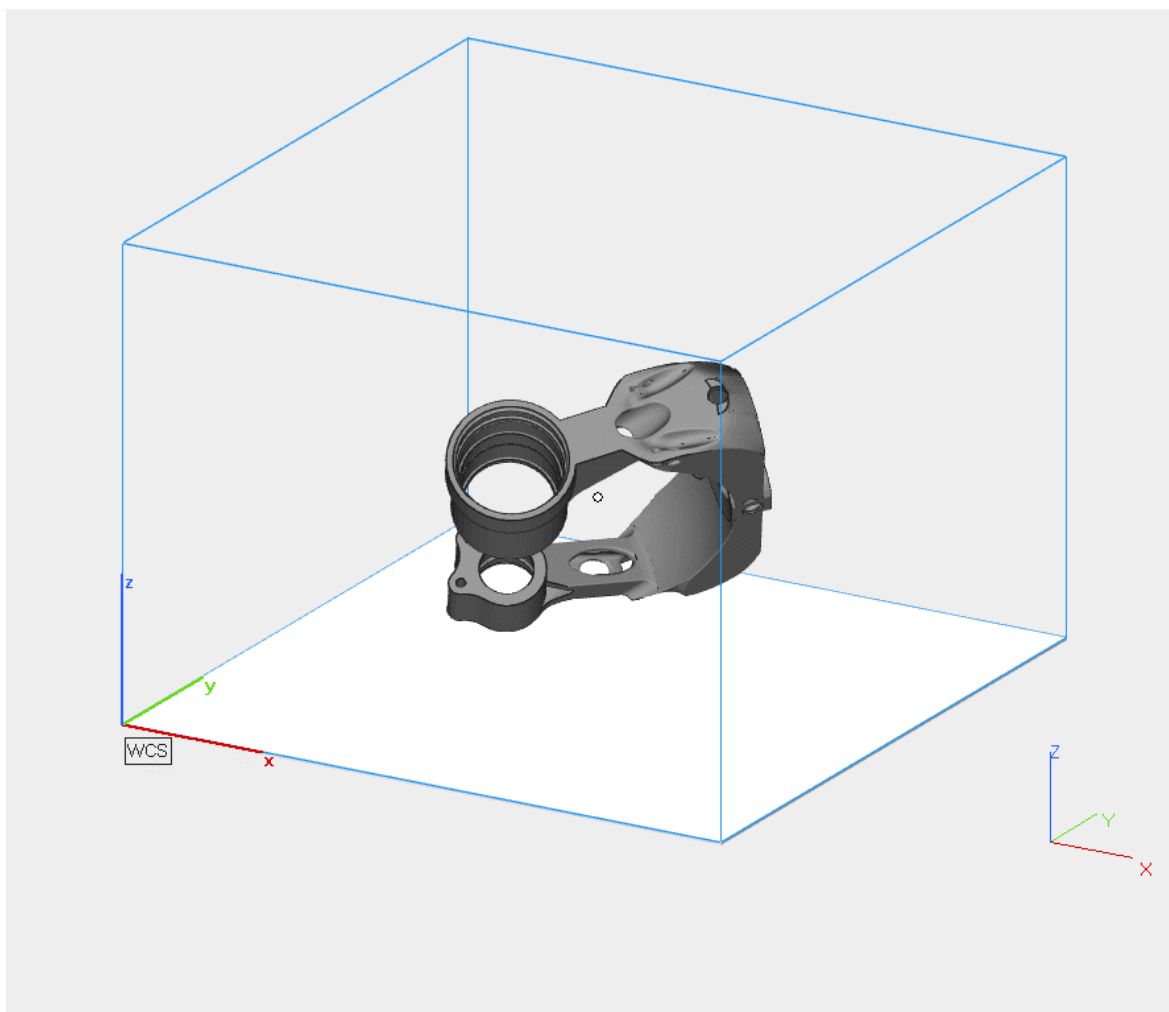
- Altezza Z
- Proiezione XY
- Superficie di supporto
- Sezione XY massima
- Supporto su superfici marcate

Scegliendo tra un algoritmo di calcolo rapido o preciso.

Dopo la valutazione di diversi tentativi, con conseguente build del materiale di supporto, si è deciso come orientamento del pezzo in macchina il seguente, riportato nelle figure 43 e 44 e rappresentato in due viste differenti.



*Figura 43 Vista ISO componente con corretto orientamento*



*Figura 44 Vista front\_right corretto orientamento*

Questo orientamento risulta essere differente rispetto al caso restituito dal programma qualora si fosse scelto di orientarlo in base al minor volume di supporto generato.

È stata presa questa decisione perché in tal maniera i supporti di difficile rimozione, all'interno delle parti cave del componente, risultano essere presenti nel modo meno invasivo possibile.

Si nota comunque che in entrambi i lati dei componenti, nelle parti cave inferiori, si vengono a generare dei supporti, si decide quindi di attuare delle modifiche alla geometria del componente in modo da rendere quella zona accessibile e dunque garantire una facile rimozione dei supporti.

Queste nuove modifiche vengono effettuate sempre nel rispetto degli andamenti dello stress di VM, grazie a cui si capisce si può rimuovere del materiale in quelle zone, senza causare un'eccessiva variazione della rigidità del componente.

#### 5.4) Remodelling componente

In questa fase presentano le modifiche anticipate ed altre operazioni di fino che permetteranno di arrivare al design finale, rispettando il vincolo di rigidità posto all'inizio, spostamenti inferiore a 0.3 mm.

Il primo passo è quello di andare a visualizzare l'andamento degli stress di VM attraverso l'analisi fatta in precedenza per capire se tutte le operazioni di modifica pensate sono realizzabili.

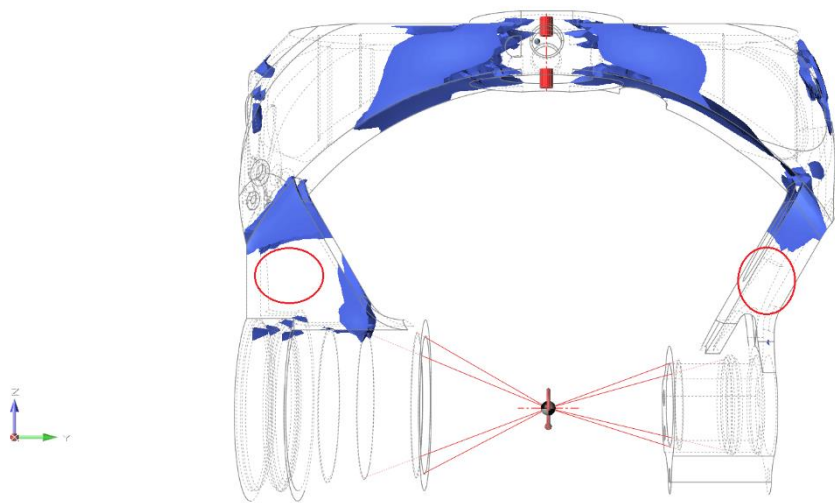
Prendo il caso di carico più critico:

| Load Case ▼ | Max Displacement ▼                                                                               | Max von Mises Stress ▼                                                                             |
|-------------|--------------------------------------------------------------------------------------------------|----------------------------------------------------------------------------------------------------|
| X+_C-       | 1.182e-001 mm  | 3.475e+001 MPa  |

*Figura 45 Caso di carico più critico*

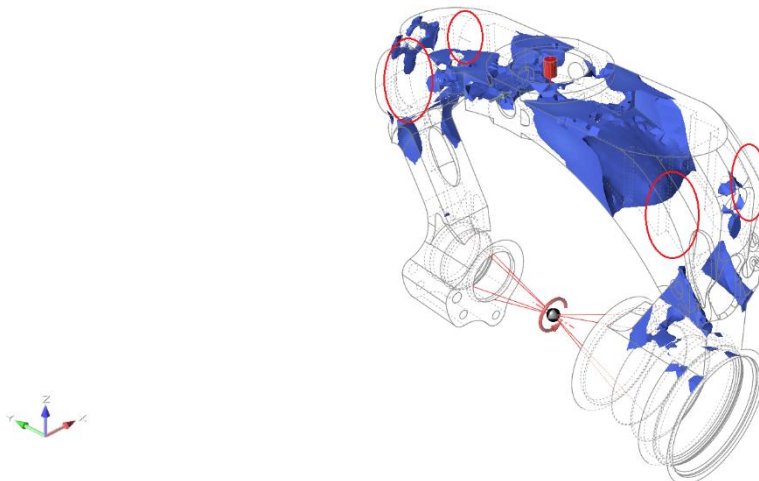
Da questo se ne estrae una visualizzazione grafica dei casi in cui lo stress di VM è più elevato. Si ottiene quindi un riscontro immediato tramite il quale si capisce che nelle zone in cui si era pensato di rimuovere del materiale si può andare ad agire liberamente.

In figura sono messe in risalto con dei cerchi rossi.



*Figura 46 VM stresses*

In questa ulteriore vista invece si mette in risalto delle zone che si è pensato di andare a rifilare, così da avere un miglior rendering del componente, garantendo sempre i vincoli progettuali.



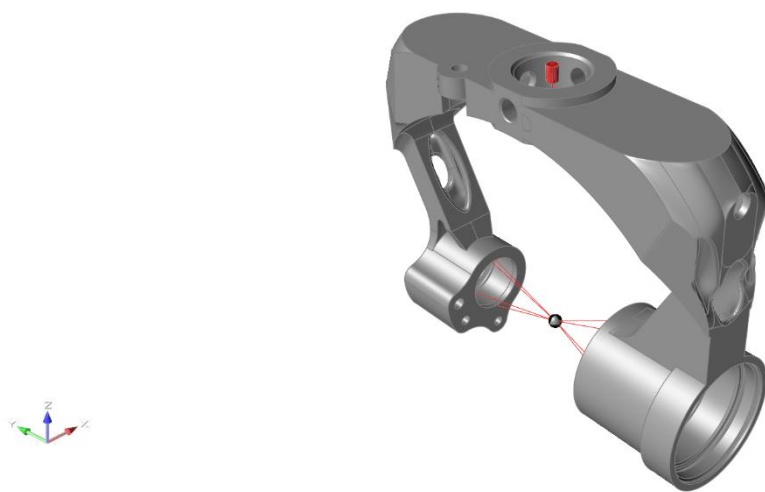
*Figura 27 VM stresses*

Una volta fatte quindi le dovute valutazioni il passaggio successivo è quello di andare a creare queste geometrie nuove.

Si carica il file parasolid contenente il componente fin qui progettato e si effettuano le modifiche.

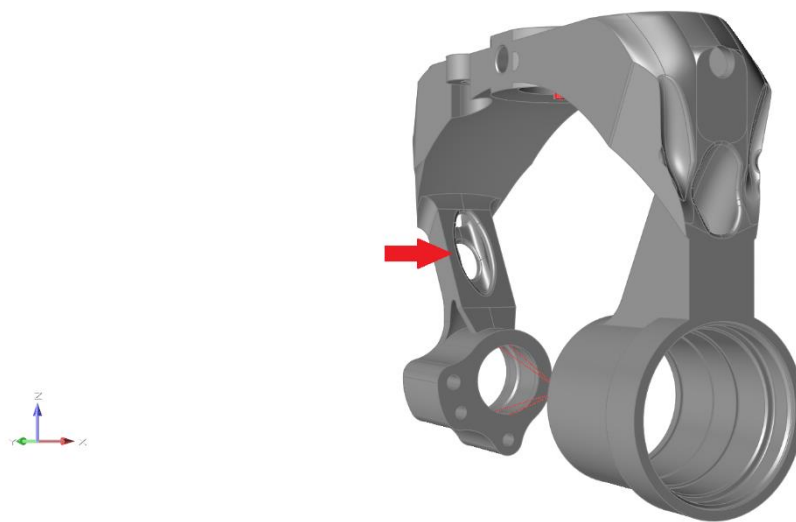
Una volta completato si estrae la geometria e la si ricarica su Inspire andando ad impostare sempre lo stesso modello fisico così da effettuare l'analisi FEM e verificare che il componente rientri sempre nei vincoli imposti.

Nell'immagine di sotto si vede la geometria così riprogettata.

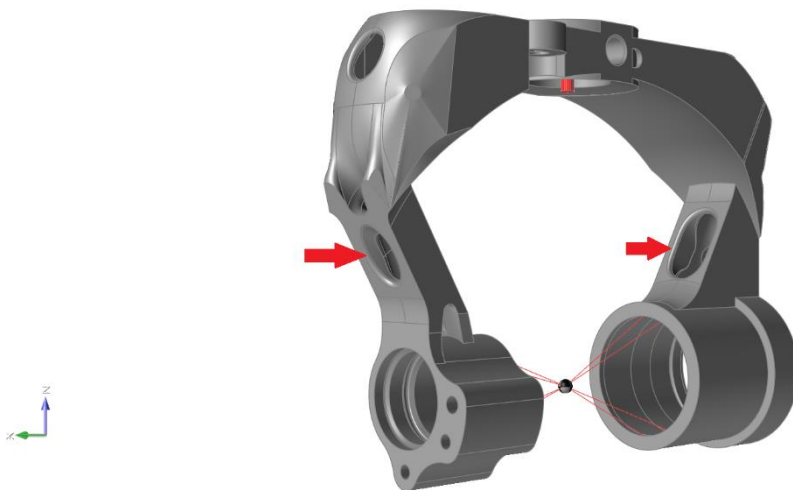


*Figura 48 Remodelling ISO*

Seguentemente vengono riportate due immagine per mettere in risalto le modifiche effettuate per rendere le parti cave accessibili per una rimozione facilitata dei supporti interni.

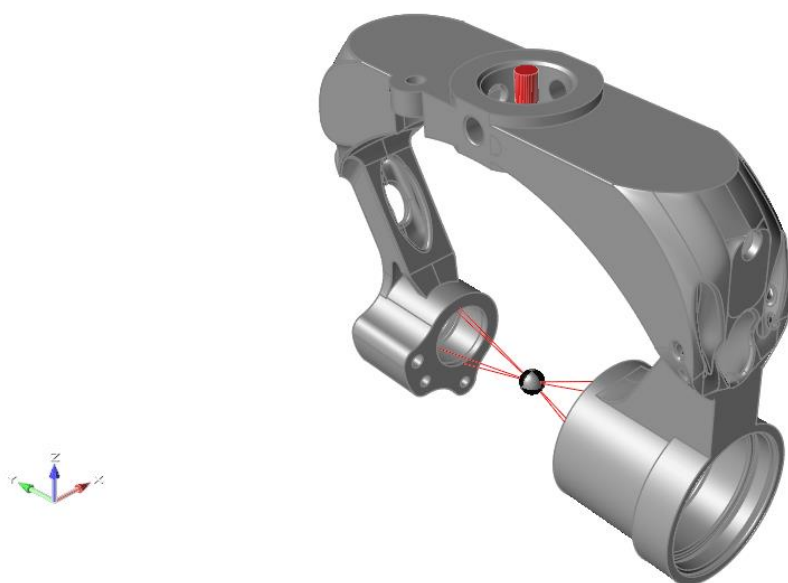


*Figura 49 Remodelling risalto uno*



*Figura 50 Remodelling risalto 2*

Con le superfici così generate sono stati rilevati errori nel file .STL motivo per cui si è deciso di optare ad un design diverso nel quale non vengono inserite le modifiche delle superfici superiori. Vediamo qui sotto il Design finale del componente così riprogettato.



*Figura 51 Vista ISO design finale*

I fori nei lati vengono quindi mantenuti, mentre le superfici superiori rifilate vengono rimosse e si mantengono le geometrie iniziali in quella zona, visto che erano quelle a causare problemi durante la costruzione del nuovo STL.

Nelle parti cave superiori vengono inoltre progettate due alette che avranno la funzione di guida per i cavi passanti tra i fori, permetteranno al cavo di non inputarsi.

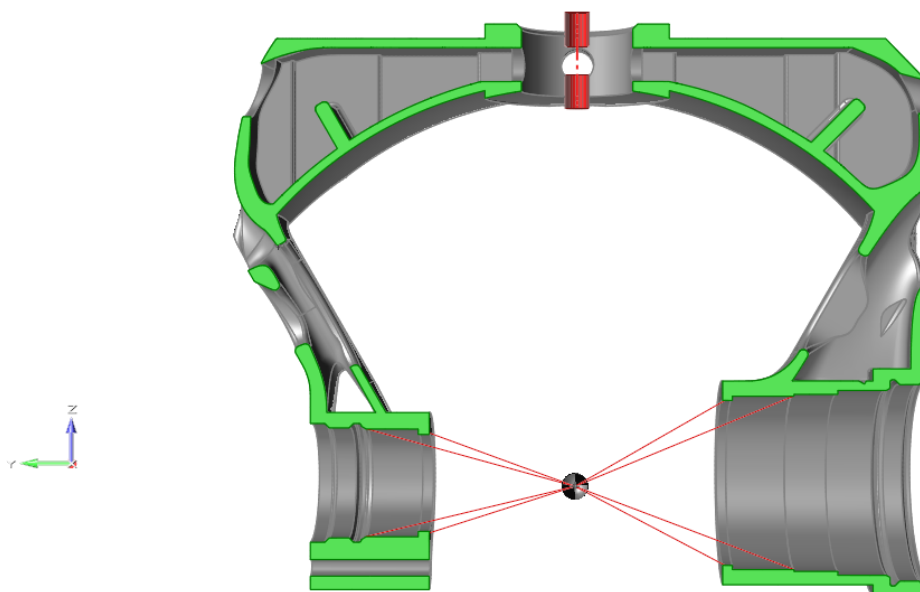


Figura 52 Vista in sezione (piano YZ) componente

#### 5.4.1) Risultati analisi FEM modello con Design finale

Vengono di seguito riportati dell'analisi lanciata con il modello così riprogettato.

| Load Case ▼ | Max Displacement ▼ | Max von Mises Stress ▼ |
|-------------|--------------------|------------------------|
| X+_C-       | 1.239e-001 mm      | 3.339e+001 MPa         |
| X-_C+       | 1.239e-001 mm      | 3.339e+001 MPa         |
| X+_C+       | 1.228e-001 mm      | 3.325e+001 MPa         |
| X-_C-       | 1.228e-001 mm      | 3.325e+001 MPa         |
| Y+_C+       | 9.372e-002 mm      | 2.955e+001 MPa         |
| Y-_C-       | 9.372e-002 mm      | 2.955e+001 MPa         |
| Y+_C-       | 9.371e-002 mm      | 2.957e+001 MPa         |
| Y-_C+       | 9.371e-002 mm      | 2.957e+001 MPa         |
| Z+_C-       | 1.938e-002 mm      | 1.471e+001 MPa         |
| Z-_C+       | 1.938e-002 mm      | 1.471e+001 MPa         |
| Z+_C+       | 1.931e-002 mm      | 1.453e+001 MPa         |
| Z-_C-       | 1.931e-002 mm      | 1.453e+001 MPa         |

Rispetto ai risultati ottenuti nel caso del primo design ipotizzato si nota che i valori sono, come si poteva immaginare, più elevati.

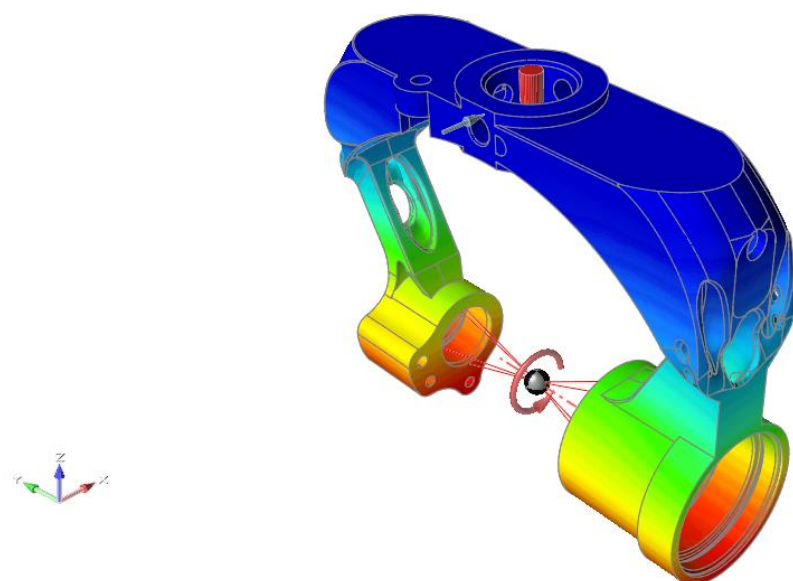
In particolare, per il caso di carico più critico si ha un aumento del 5.6% per quanto riguarda il Max displacement, mentre per quanto riguarda la Max VM stress si ha un aumento più contenuto del 3.46%.

Volendo invece sottolineare i miglioramenti ottenuti secondo questo lavoro di riprogettazione rispetto al caso iniziale si può evidenziare che per quanto riguarda gli spostamenti la situazione è migliorata nettamente. Si è rientrati al di sotto del limite di progetto dei 0.3 mm per tutti i casi di carico e in più nel caso più critico si è ottenuta una riduzione del valore del 74%, il tutto accompagnato anche da una lieve riduzione della massa, circa il 2%.

Ricordiamo che il nostro obiettivo era quello di riuscire a conferire rigidezza alla struttura, possiamo quindi dire che lo scopo è stato largamente raggiunto.

Si può dunque confermare la validità delle modifiche fin qui ottenute e proseguire con l'inserimento del file così prodotto all'interno del software CAM per controllare nuovamente il posizionamento e orientamento del pezzo in macchina e procedere con l'editing del file STL.

In questo modo siamo giunti al componente con il design finale. Di seguito si può sottolineare come si è utilizzato un approccio alla riprogettazione del componente seguendo un'ottimizzazione topologica robusta improntata al processo additive di laser powder bed fusion con polvere metallica.

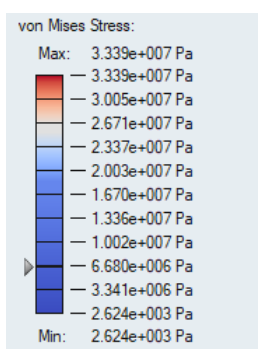


*Figura 53 Displacement caso di carico più critico*

Con l'ottimizzazione topologica non ci si è spinti proprio al limite. Per il concetto di ottimizzazione topologica robusta si sarebbe potuto rimuovere più materiale dal componente, preso in considerazione però che quello fornitoci dall'azienda è un coefficiente di sicurezza sul carico e non sulla direzionalità, spingendoci oltre avremmo rischiato di ottenere un componente, sicuramente più leggero, ma fragile se sottoposto a carichi con direzioni diverse. Si è preferito evitare di incorrere in questo errore.

Per avere una idea immediata di ciò che succede al componente andiamo a riportare un'immagine in cui è riportata sia la deformata che il componente normale.

Si riporta anche l'andamento di VM nel caso di carico X+C.



*Figura 3 Visualizzatore VM Stress*

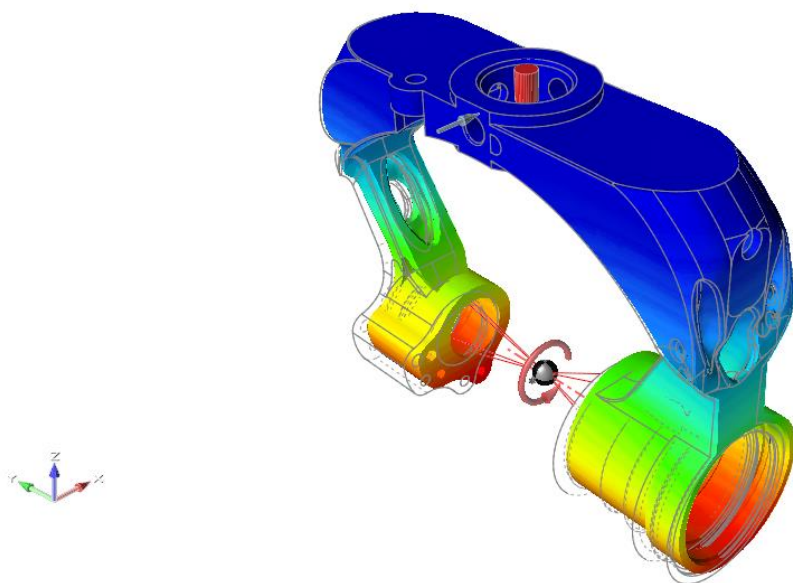


Figura 55 Deformata, caso di carico  $X+_C-$ , direzione X

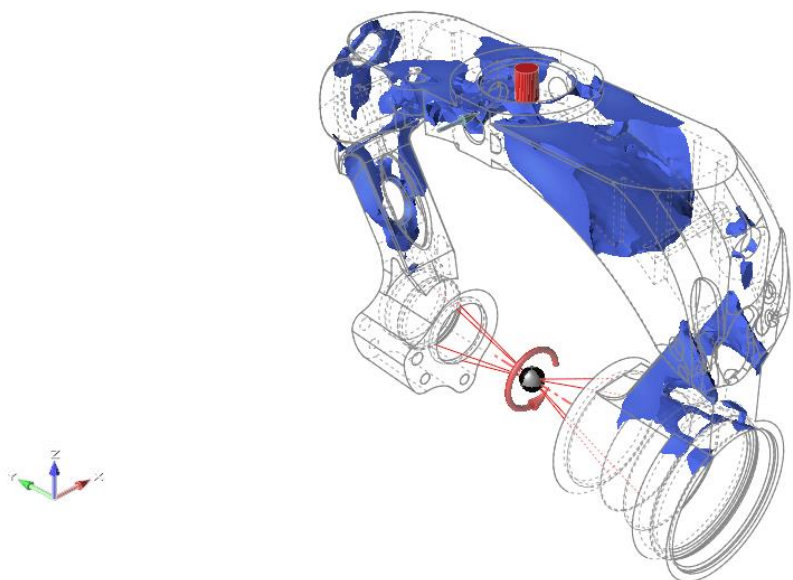


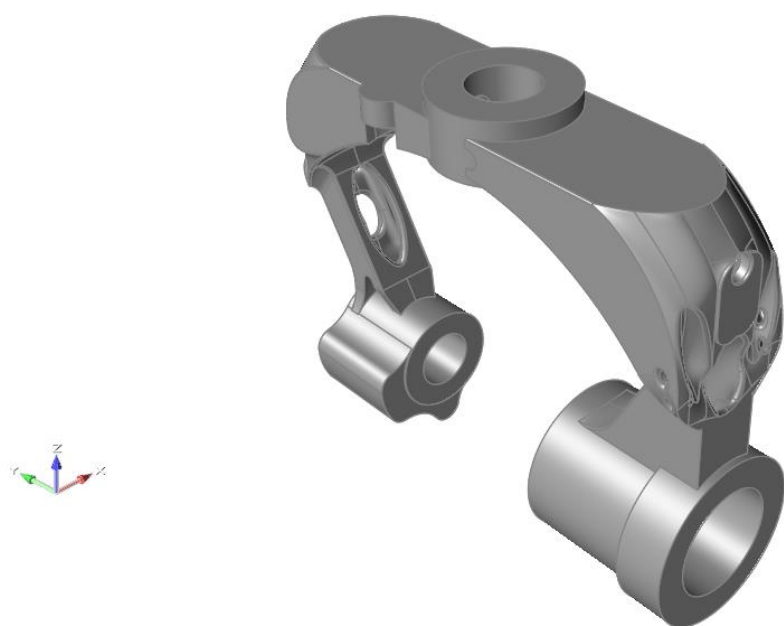
Figura 56 VM STRESS,  $X+_C-$

### 5.5) Superfici con sovrametallo

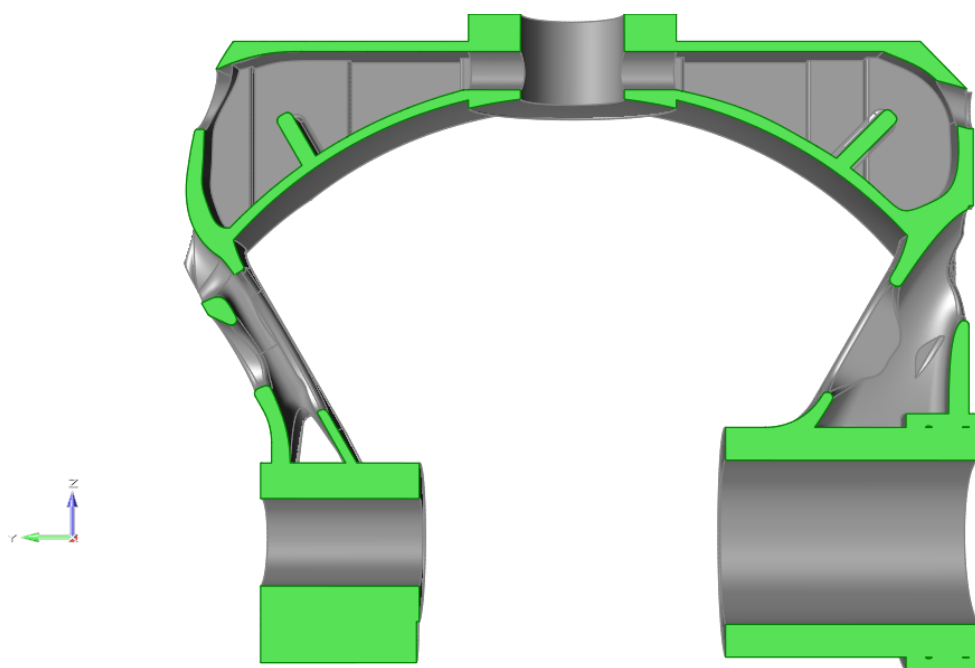
In questo paragrafo si presentano le modifiche che verranno effettuate al CAD realizzato in precedenza per tener conto delle successive lavorazioni convenzionali di cui necessitano alcune superfici del componente. In questo modo otterremo il file del grezzo.

Elenchiamo adesso le zone in cui si è dovuto tener conto di lavorazioni, sulle quali bisognerà quindi effettuare delle semplificazioni o aggiungere materiale:

- I due cilindri inferiori risultano avere delle geometrie interne ricche di particolari. Questi verranno creati successivamente tramite delle lavorazioni, motivo per cui nel componente grezzo creato tramite AM dovrà essere considerato del sovrametallo e avranno uno spessore maggiore ed uniforme.
- Le pareti piane dei due cilindri, sia quelle rivolte verso il centro di massa che quelle verso l'esterno, avranno uno spessore di sovrametallo di 2mm ciascuna.
- La parete piana del cilindro più piccolo rivolta verso l'interno dovrà subire una lamatura e quindi sarà considerato uno spessore di 0.5mm di sovrametallo.
- Il cilindro superiore, dove si pone il vincolo rotazionale, risulterà anch'esso più pieno e verrà lavorato successivamente.
- La parete piana del cilindro superiore avrà uno spessore di sovrametallo di 2 mm.
- Nella parete dove andrà inserita la scheda elettrica bisogna considerare 0.8mm di sovrametallo, pelatura necessaria per poi effettuare quattro fori per la scheda.
- Molti dei fori verranno effettuati di macchina, quindi per il nostro componente risulteranno essere delle zone piene.



*Figura 57 Vista ISO componente con sovrametallo e superfici semplificate*



*Figura 58 Vista in sezione componente con sovrametallo e superfici semplificate*

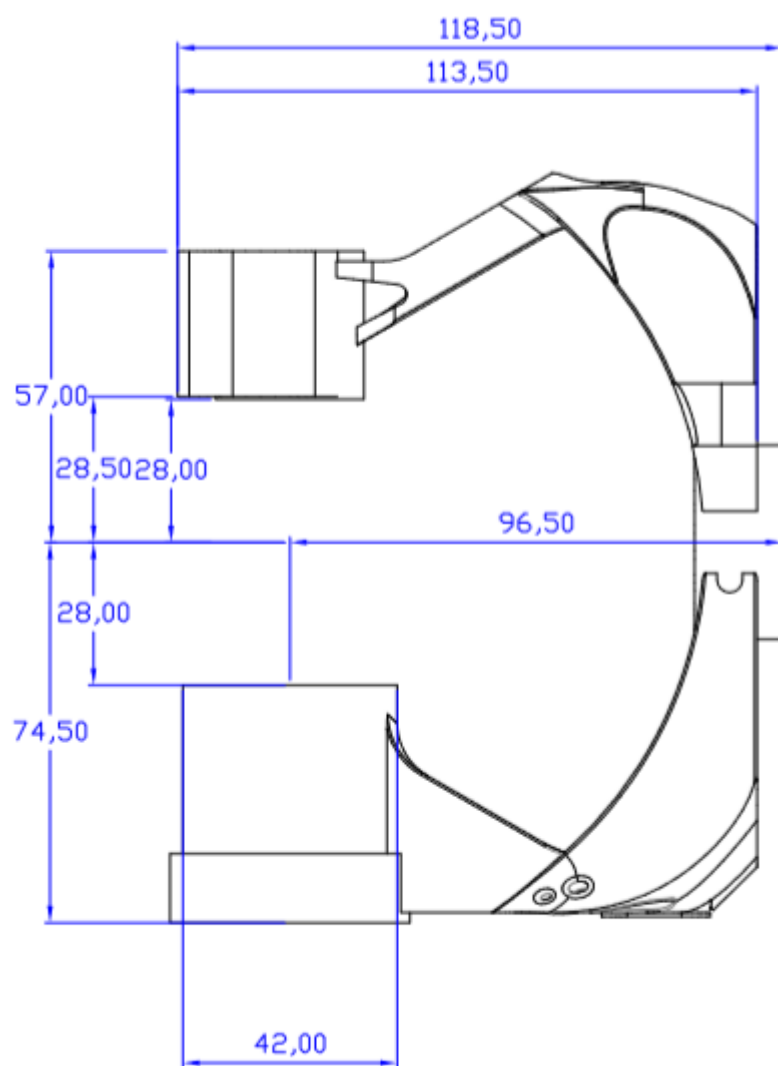
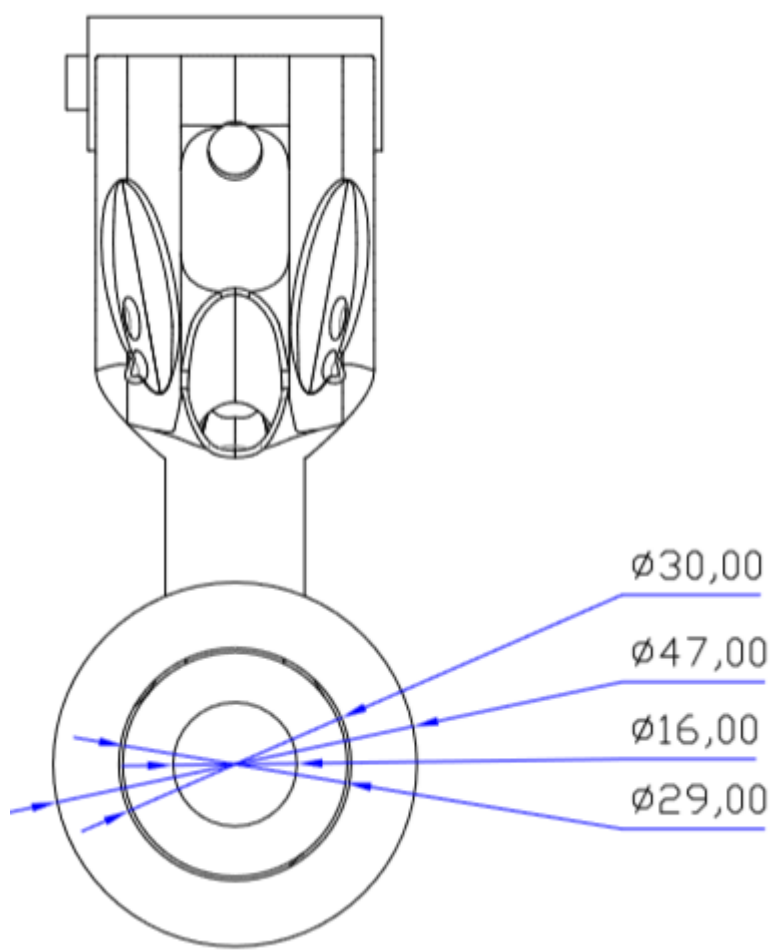


Figura 59 Vista sinistra componente grezzo, quotatura delle dimensioni modificate



*Figura 60 Vista inferiore componente sovrmetal*

## 6) Conclusioni

In questo lavoro di tesi è stato introdotto nei primi capitoli il mondo dell'Additive in generale, il focus è stato poi spostato sulle tecnologie in grado di produrre componenti metallo. In questo modo si è giunti alla presentazione del case study.

Grazie ad un tipo di progettazione incentrata su AM Metal ed all'utilizzo dell'ottimizzazione topologica il pezzo è stato ripensato in modo da usufruire il più possibile dei vantaggi messi a disposizione dalla tecnologia.

L'elaborato in questione punta nello specifico a presentare le libertà e le nuove problematiche che il progettista può avere utilizzando queste nuove tecnologie. Si mostrano quali possono essere i rischi per un'azienda nel fare un investimento in questa direzione, nello stesso tempo si mettono in risalto quelli che sono i punti in comune con la rivoluzione che sta investendo il mondo industriale in questo momento storico.

In questo modo si può concludere che:

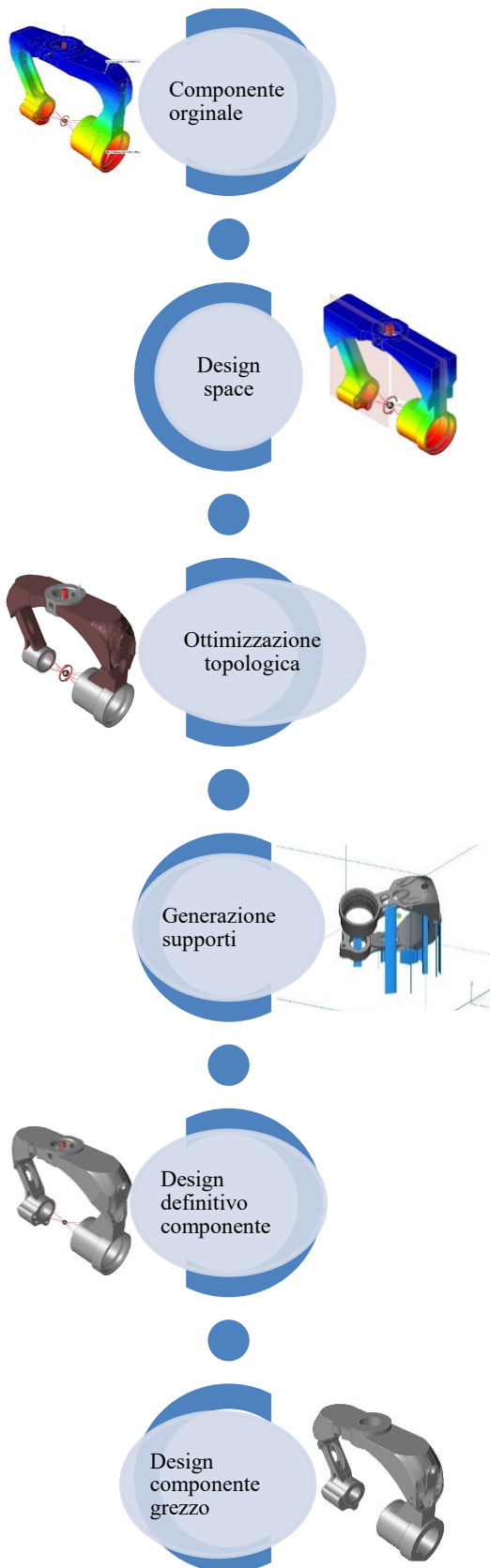
- Il progettista dovrà avere bene in mente il workflow da eseguire per la progettazione di un componente realizzato tramite AM, eseguendo i vari steps dello sviluppo del Design for AM.
- Bisogna conoscere l'importante connessione che vi è tra l'ottimizzazione topologica e tecnologie di questo genere.

Per quanto riguarda il case study invece:

- Il componente così realizzato è rientrato nelle specifiche tecniche richieste dal progetto, la rigidità del componente adesso risulta essere funzionale alla sua applicazione.
- È stato raggiunto un alleggerimento del componente, anche se minimo.
- Mediante tale processo AM con polvere metallica si sono ottenute forme complesse, con l'opportunità di recuperare la polvere in abbondanza.
- Infine, un altro aspetto da non sottovalutare è che grazie al processo di fusione si assicura una microstruttura finale molto fine e di conseguenza le caratteristiche meccaniche possono essere notevolmente buone.

Il mondo dell'AM Metal è in piena evoluzione e le aziende che saranno in grado di muoversi in questa direzione potranno usufruire di enormi vantaggi. Tutto ciò sarà subordinato anche ad una nuova impronta nel modo di lavorare dei progettisti.

Si sottolinea come i vantaggi ottenuti con la riprogettazione di questo componente risultano essere figli di un corretto utilizzo di uno strumento come la TO che dà al progettista la possibilità di visualizzare nuove morfologie, poi modellate ed adattate alla tecnologia di produzione utilizzata.



## Bibliografia

- [1] I. Gibson, D. W. Rosen, and B. Stucker, *Additive Manufacturing Technologies: Rapid Prototyping to Direct Digital Manufacturing*. 2010.
- [2] ASTM International, “F2792-12a - Standard Terminology for Additive Manufacturing Technologies,” *Rapid Manuf. Assoc.*, pp. 10–12, 2013.
- [3] K. V. Wong and A. Hernandez, “A Review of Additive Manufacturing,” *ISRN Mech. Eng.*, vol. 2012, pp. 1–10, 2012.
- [4] P. D. I. Milano, “Politecnico di milano,” pp. 1–40, 2006.
- [5] A. Salmi, F. Calignano, M. Galati, and E. Atzeni, “An integrated design methodology for components produced by laser powder bed fusion (L-PBF) process,” *Virtual Phys. Prototyp.*, vol. 0, no. 0, pp. 1–12, 2018.
- [6] H. Bikas, P. Stavropoulos, and G. Chryssolouris, “Additive manufacturing methods and modeling approaches: A critical review,” *Int. J. Adv. Manuf. Technol.*, vol. 83, no. 1–4, pp. 389–405, 2016.
- [7] S. Version, “State-of-the-art for Additive Manufacturing of Metals,” no. June, 2017.
- [8] W. J. Sames, F. A. List, S. Pannala, R. R. Dehoff, and S. S. Babu, “The metallurgy and processing science of metal additive manufacturing,” *Int. Mater. Rev.*, vol. 61, no. 5, pp. 315–360, 2016.
- [9] B. Leutenecker and J. Ferchow, “Industrializing Additive Manufacturing - Proceedings of Additive Manufacturing in Products and Applications - AMPA2017,” no. October 2017, 2018.
- [10] A. M. At, S. Motorsport, A. G. Profile, D. Metal, C. Of, and P. Removal, “Metal AM,” 2018.
- [11] M. Mortarino, “F abbricazione additiva a misura di i ndustria 4 . 0,” pp. 38–41, 2017.
- [12] I. Seong *et al.*, “Model Factory for Additive Manufacturing of Mechatronic Products : Interconnecting World-Class Technology Partnerships with Leading AM Players,” *Procedia CIRP*, vol. 54, pp. 210–214, 2016.
- [13] N. Guo and M. C. Leu, “Additive manufacturing: Technology, applications and research needs,” *Front. Mech. Eng.*, vol. 8, no. 3, pp. 215–243, 2013.
- [14] Boston Consulting Group, “Get ready for industrialized Additive Manufacturing,” no. May, pp. 1–15, 2017.
- [15] “01 - Wohlers Report 2017.pdf.” .
- [16] D. E. Cooper, M. Stanford, K. A. Kibble, and G. J. Gibbons, “Additive Manufacturing for product improvement at Red Bull Technology,” *Mater. Des.*, vol. 41, no. October, pp. 226–230, 2012.
- [17] S. Biggi, I. San, M. Ist, and U. O. Clinica, “L ’ utilizzo di cotili in titanio trabecolare con accoppiamento ceramica-ceramica nell ’ artroprotesi primaria di anca . Studio monocentrico a dieci anni Materiali e metodi,” vol. 1, pp. 138–143, 2017.
- [18] R. P. Development, *Additive Manufacturing 4.0*. 2017.
- [19] U. M. Dilberoglu, B. Gharehpapagh, U. Yaman, and M. Dolen, “The role of additive manufacturing in the era of Industry 4 . 0,” *Procedia Manuf.*, vol. 11, no. June, pp. 545–554, 2017.

- [20] L. E. J. Thomas-Seale, J. C. Kirkman-Brown, M. M. Attallah, D. M. Espino, and D. E. T. Shepherd, "The barriers to the progression of additive manufacture: Perspectives from UK industry," *Int. J. Prod. Econ.*, vol. 198, no. February, pp. 104–118, 2018.
- [21] "Industrialising 3D printing for functional parts."
- [22] E. Hietikko, "□ Design for Additive Manufacturing – DFAM Esa Hietikko," pp. 14–19, 2014.
- [23] C. Klahn, D. Omidvarkarjan, and M. Meboldt, "Evolution of Design Guidelines for Additive Manufacturing - Highlighting Achievements and Open Issues by Revisiting an Early SLM Aircraft Bracket," *Ind. Addit. Manuf. - Proc. Addit. Manuf. Prod. Appl. - AMPA2017*, pp. 3–13, 2018.
- [24] M. Seabra *et al.*, "Selective laser melting (SLM) and topology optimization for lighter aerospace componentes," *Procedia Struct. Integr.*, vol. 1, pp. 289–296, 2016.
- [25] C. Kuo, C. Su, and A. Chiang, "Parametric Optimization of Density and Dimensions in Three-Dimensional Printing of Ti-6Al-4V Powders on Titanium Plates Using Selective Laser Melting," vol. 18, no. 11, pp. 1609–1618, 2017.
- [26] S. Leong, F. Edith, and W. Yee, "Robotics and Computer – Integrated Manufacturing Selective laser melting of lattice structures : A statistical approach to manufacturability and mechanical behavior," vol. 49, no. June 2017, pp. 170–180, 2018.
- [27] D. D. Gu *et al.*, "components : materials , processes and mechanisms Laser additive manufacturing of metallic components : materials , processes and mechanisms," vol. 6608, 2013.
- [28] F. Calignano, "Design optimization of supports for overhanging structures in aluminum and titanium alloys by selective laser melting," *J. Mater.*, vol. 64, pp. 203–213, 2014.
- [29] I. Yadroitsev, P. Krakhmalev, and I. Yadroitsava, "Hierarchical design principles of selective laser melting for high quality metallic objects," *Addit. Manuf.*, vol. 7, pp. 45–56, 2015.
- [30] R. Paul, "Adaptive Slicing in Additive Manufacturing Process Using a Modified Boundary Octree Data Structure," vol. 137, no. February 2015, pp. 1–11, 2018.
- [31] B. E. Carroll, T. A. Palmer, and A. M. Beese, "Anisotropic tensile behavior of Ti-6Al-4V components fabricated with directed energy deposition additive manufacturing," *Acta Mater.*, vol. 87, pp. 309–320, 2015.
- [32] J. Liu and Y. Ma, "Advances in Engineering Software A survey of manufacturing oriented topology optimization methods," *Adv. Eng. Softw.*, vol. 100, pp. 161–175, 2016.
- [33] "YOUR GUIDE TO THE 4 AREAS WHERE 3D PRINTING IS UNSTOPPABLE."
- [34] I. Prodotto *et al.*, "Scheda Di Sicurezza (SDS)," pp. 1–10, 2017.