



**Politecnico
di Torino**

Politecnico di Torino

Corso di Laurea Magistrale in Ingegneria Meccanica

**Progettazione di un
“recoater blade” per macchina
laser a letto di polvere metallica**

Relatori:
Prof. Luca Iuliano
Prof.ssa Flaviana Calignano

Candidato:
Giorgio Bencivinni

Anno accademico 2023/2024

Sommario

Indice delle figure	3
Indice delle tabelle	4
Abstract	5
1. Introduzione	7
1.1. Additive manufacturing	7
1.1.1. Cenni storici e sviluppo tecnologico	7
1.1.2. La tecnologia.....	8
1.1.3. Vantaggi e limitazioni dell’additive manufacturing.....	10
1.1.4. Le diverse tecnologie	11
1.2. Laser Powder Bed Fusion (PBF-LB/M)	14
1.2.1. Il processo.....	15
1.2.2. Post-processing	16
1.2.3. Polveri metalliche.....	17
1.2.4. Tipologie di recoater	19
1.3. Problematiche relative al letto di polvere nelle macchine PBF-LB/M	22
1.3.1. Interazione del recoater con i layer depositati: “super elevazione” e attrito	22
1.3.2. Vibrazioni recoater.....	25
1.3.3. Monitoraggio del letto di polvere	26
2. Presentazione caso studio	28
3. Analisi preliminare.....	32
3.1. Raccolta dati geometrici	32
3.1.1. Struttura	32
3.1.2. Lama.....	35
3.2. Analisi motore lineare	35
3.3. Analisi interazione con layer sottostanti	37
3.3.1. Definizione materiali	37
3.3.2. Definizione vincoli.....	38
3.3.3. Definizione carico	39

3.3.4. Analisi FEM e risultati.....	41
4. Riprogettazione portalama	44
4.1. Portalama originale	44
4.2. Nuovo portalama.....	46
4.2.1. Nuova lama	46
4.2.2. Descrizione nuovo portalama.....	47
5. Riprogettazione corpo centrale.....	50
5.1. Necessità della riprogettazione	50
5.2. Descrizione modifiche.....	50
6. Ottimizzazione topologica della struttura	53
6.1. Cenni su ottimizzazione topologica e additive manufacturing.....	53
6.2. Materiale e preparazione modello per l’ottimizzazione topologica	54
6.3. Ottimizzazione preliminare	54
6.4. Analisi di ottimizzazione.....	55
6.4.1. Tre arcate	56
6.4.2 Due arcate.....	58
6.4.3. Singola arcata	60
6.5. Creazione CAD	62
6.6. Risultati finali.....	66
7. Conclusioni.....	69
Bibliografia.....	71
Ringraziamenti.....	77

Indice delle figure

Figura 1 - SLA-1 [1]	7
Figura 2 - Supporti	9
Figura 3 – Slicing [6].....	9
Figura 4 - Tecniche di Additive Manufacturing.....	11
Figura 5 - Schema processo PBF-LB/M [27]	15
Figura 6 - Strutture di supporto [34]	17
Figura 7 - Polvere di alluminio [31].....	18
Figura 8 - HSS recoater blade [39]	20
Figura 9 - Soft recoater in silicone (trasparente) e NBR (nero) [38]	20
Figura 10 - Split recoater multi-materiale [42]	21
Figura 11 - Deformazione layer [29].....	22
Figura 12 - Difettosità causate dalla collisione del recoater [45]	23
Figura 13 - Effetti di un soft/hard recoater in seguito a una collisione [46].....	24
Figura 14 - Porosità del letto di polvere al variare della frequenza e dell'ampiezza delle vibrazioni e della velocità del recoater (lama) [48]	25
Figura 15- Porosità del letto di polvere al variare della frequenza e dell'ampiezza delle vibrazioni e della velocità del recoater (rullo) [48].....	26
Figura 16 - Struttura portalama	28
Figura 17 - Alloggiamento elemento laterale	29
Figura 18 - Sistema di movimentazione.....	30
Figura 19 - Vista laterale.....	32
Figura 20 - Vista frontale	33
Figura 21 - Vista assonometrica	34
Figura 22 - Vista frontale lama	35
Figura 23 - Vista laterale lama	35
Figura 24 - ECB14 [55]	36
Figura 25 - Sporgenza ammissibile ECB14 [56]	36
Figura 26 - Vincoli e viti struttura.....	38
Figura 27 - Tipologie di contatto	39
Figura 28 - Punto di applicazione resistenza all'avanzamento	41
Figura 29 - Spostamenti struttura	42
Figura 30 - Spostamenti, vista frontale	43
Figura 31 - Elemento di fissaggio originale.....	44
Figura 32 - Elemento di fissaggio originale, vista frontale.....	45
Figura 33 - Elemento di fissaggio originale, vista da sinistra.....	45
Figura 34 - Elemento di fissaggio originale, vista da destra.....	45
Figura 35 - Nuova lama	46

Figura 36 - Elemento 1 portalama (vista da destra)	47
Figura 37 - Elemento 1 portalama (vista da sinistra)	47
Figura 38 - Elemento 2 portalama (vista da destra).....	47
Figura 39 - Elemento 2 portalama (vista da sinistra).....	48
Figura 40 - Modifiche corpo centrale	48
Figura 41 - Portalama	48
Figura 42 - Idea progettuale.....	51
Figura 43 - Struttura riprogettata, vista frontale.....	52
Figura 44 - Cad ottimizzazione preliminare	54
Figura 45 - Risultati ottimizzazione preliminare.....	55
Figura 46 - Cad struttura tre arcate	56
Figura 47 - Risultati ottimizzazione con tre arcate.....	57
Figura 48 - Deformazioni con tre arcate.....	58
Figura 49 - Cad struttura due arcate.....	59
Figura 50 - Risultati ottimizzazione con due arcate	59
Figura 51 - Deformazioni con due arcate	60
Figura 52 - Cad struttura a singola arcata	61
Figura 53 - Risultati ottimizzazione con singola arcata.....	62
Figura 54 - Struttura finale, vista da sinistra.....	63
Figura 55 - Struttura finale, vista da destra	64
Figura 56 - Confronto risultati ottimizzazione-CAD definitivo.....	65
Figura 57 - Spostamenti struttura.....	67
Figura 58 - Spostamenti struttura, vista frontale	68

Indice delle tabelle

Tabella 1 - Massa elementi.....	34
Tabella 2 - Dati materiali	37
Tabella 3 - Proprietà AlSi10Mg.....	54
Tabella 4 - Confronto massa elementi	67

Abstract

Il lavoro di questa tesi si concentra sulla riprogettazione del recoater blade di una macchina PBF-LB/M. A causa di un problema di progettazione del recoater blade e della scelta del motore elettrico che lo movimenta, durante la stesura della polvere si possono innescare delle vibrazioni che si ripercuotono sull'intero sistema. Ciò può determinare delle difettosità sui pezzi realizzati.

Per comprendere meglio la natura e l'origine di queste vibrazioni, è stata effettuata un'analisi agli elementi finiti (FEM). Questa analisi ha permesso di osservare le deformazioni strutturali sotto carico, evidenziando come il peso eccessivo della struttura causasse un'eccessiva inflessione. Queste deformazioni erano direttamente riconducibili alle vibrazioni osservate durante la stesura dello strato di polvere.

Per risolvere tale problematica, la struttura è stata riprogettata unendo all'analisi FEM l'ottimizzazione topologica per avere un'indicazione di massima su dove si può agire a livello di aumento e riduzione del materiale. I risultati sono stati modificati e adattati al fine di rendere idonea la nuova struttura alla produzione, non solo con tecnologie tradizionali ad asportazione di truciolo, ma anche con tecnologie di additive manufacturing per la riduzione del materiale di scarto in produzione.

La struttura progettata è molto più leggera e rigida rispetto all'originale, con una riduzione della massa di circa il 50% e delle inflessioni di circa il 97%. Questi miglioramenti permettono di migliorare la stabilità del recoater, riducendo le vibrazioni durante l'esercizio e, di conseguenza, migliorando significativamente la qualità del processo di copertura della polvere.

1. Introduzione

1.1. Additive manufacturing

L’additive manufacturing rappresenta una tecnologia all’avanguardia nel campo della produzione industriale, caratterizzata dalla capacità di creare oggetti tridimensionali mediante l’aggiunta sequenziale di strati di materiale. Questo processo, noto anche come produzione additiva, consente la realizzazione di componenti con geometrie complesse in tempi ridotti e senza la necessità di utensili tradizionali. Il procedimento si basa sull’utilizzo di un modello CAD dell’oggetto, che guida la deposizione del materiale strato per strato. Tale approccio permette di ottenere forme personalizzate e intricate, difficilmente realizzabili con le tecniche di produzione sottrattiva convenzionali.

1.1.1. Cenni storici e sviluppo tecnologico

L’additive manufacturing ha iniziato a svilupparsi negli anni '80. Durante questo periodo, si sono verificati due eventi di fondamentale importanza. Nel 1984, l’ingegnere statunitense Chuck Hull ha depositato il brevetto per il sistema di stereolitografia (SLA). Successivamente, nel 1987, l’azienda da lui fondata, 3D Systems, ha commercializzato la prima stampante 3D, la SLA-1 [1], mostrata in figura 1.



Figura 1 - SLA-1 [1]

Questa tecnologia era tuttavia inizialmente conosciuta non come additive manufacturing, ma come “Rapid Prototyping”. Tale tecnica veniva infatti utilizzata

per realizzare modelli concettuali (prototipi) in tempi inferiori rispetto ai metodi tradizionali di produzione. Questo permetteva di testare e sviluppare il design di un componente in tempi molto più brevi. Tuttavia, non era ancora possibile realizzare prototipi o parti funzionali, poiché le proprietà del pezzo erano limitate dal processo di stereolitografia [2].

Con lo sviluppo tecnologico, il termine utilizzato per descrivere la produzione additiva è cambiato da “Rapid Prototyping” a “Additive Manufacturing”. Questo cambiamento riflette l’evoluzione delle capacità della tecnologia, che è passata dalla creazione di semplici prototipi a quella di parti funzionali complete e finite. Inizialmente, la tecnologia era utilizzata per realizzare modelli concettuali in tempi rapidi, ma con il tempo è diventata capace di produrre anche stampi, matrici, utensili e, infine, componenti complessi e funzionali. Ad oggi, infatti, il termine additive manufacturing viene utilizzato per riferirsi alle applicazioni di produzione di componenti industriali e attrezzature ad alte prestazioni [3].

1.1.2. La tecnologia

Il principio fondamentale dell’additive manufacturing consiste nella costruzione di un oggetto mediante la deposizione sequenziale di strati di materiale. Ogni strato, o layer, rappresenta una sezione trasversale del modello CAD, che viene suddiviso in strati e realizzato dalla macchina fino a completare il pezzo.

Il punto di partenza è il modello CAD dell’elemento da realizzare, che viene convertito nel formato STL. Il modello solido viene approssimato tramite triangoli di forma e dimensione variabile che ne descrivono la superficie: minore la dimensione di ogni triangolo, maggiore la precisione con cui viene approssimato il modello CAD. Ogni triangolo è rappresentato nel file STL mediante tre punti (ognuno con coordinate x , y , z) e un vettore normale al triangolo [4].

Il file viene caricato nel software di stampa, dove vengono eseguite tre operazioni fondamentali.

In primo luogo, si definisce l’orientazione dell’elemento da realizzare all’interno del volume di stampa della macchina. Tale scelta risulta fondamentale in quanto influenza il tempo di costruzione, l’accuratezza geometrica e dimensionale, i costi, etc. [5].

Successivamente, vengono definiti i supporti necessari per ancorare il modello alla piattaforma di costruzione e sostenere le parti sporgenti, come mostrato in figura 2.

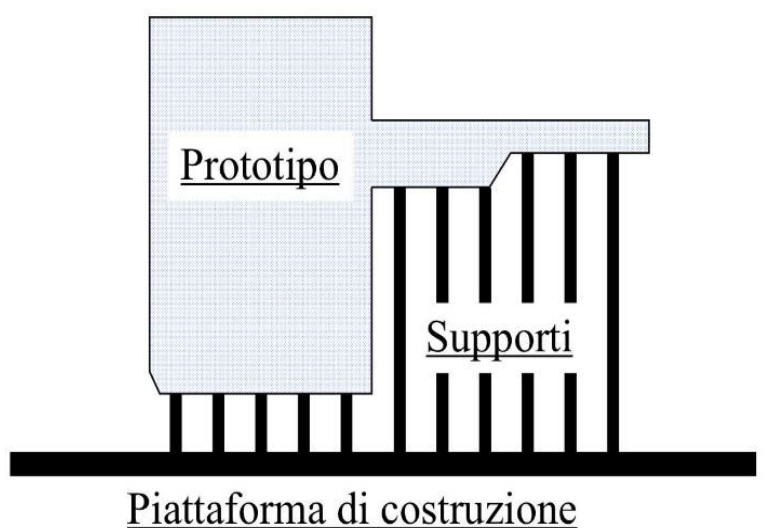


Figura 2 - Supporti

Infine, si procede con lo slicing: il modello viene sezionato utilizzando piani con normale parallela all'asse z e distanziati Δs , ottenendo i vari layer che la macchina di stampa utilizzerà per la realizzazione dell'oggetto (figura 3). La scelta dello spessore Δs del singolo layer è un parametro cruciale. Optare per uno spessore minore comporta una qualità superiore dell'oggetto realizzato, ma al contempo incrementa il tempo di stampa [6].

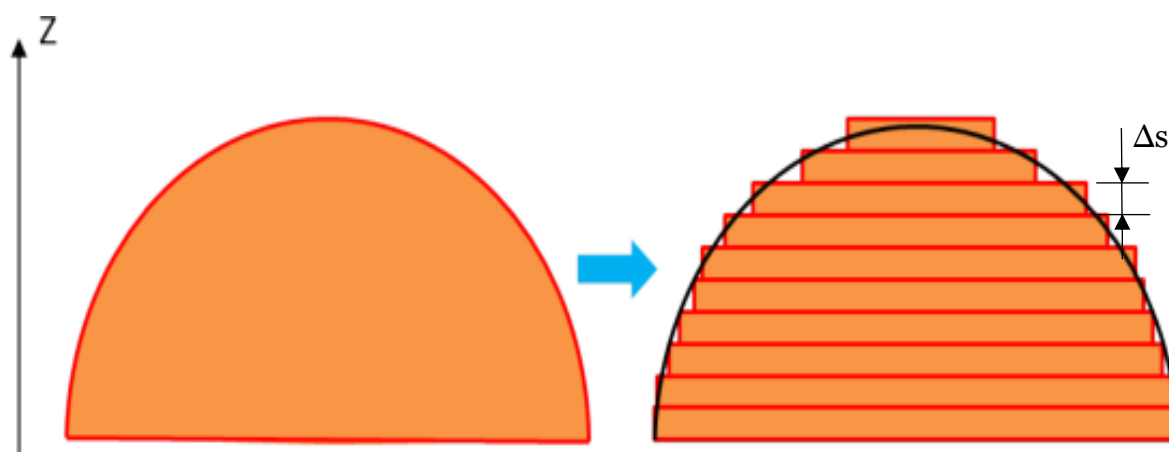


Figura 3 – Slicing [6]

Lo spessore è infatti responsabile del cosiddetto “staircase effect”, un errore legato all'approssimazione del CAD con dei layer planari discreti che determina imprecisioni geometriche del pezzo [7].

Completato quest'ultimo step, ogni layer viene inviato alla macchina di stampa: ognuno di essi viene depositato sul precedente, realizzando progressivamente il componente [8].

Ultimato il componente, si passa alla fase finale di post-processing, che comprende la pulizia del pezzo, la rimozione dei supporti, eventuali trattamenti termici (per i metalli), la finitura superficiale e altre operazioni di rifinitura necessarie.

1.1.3. Vantaggi e limitazioni dell’additive manufacturing

L’additive manufacturing offre numerosi vantaggi rispetto ai metodi di produzione tradizionali, sia in termini di prodotto che di processo, ma anche alcune limitazioni. Di seguito vengono analizzati gli aspetti di maggiore interesse.

Vantaggi [3], [8]:

- Qualunque forma può essere ottenuta rapidamente, senza la necessità di un operatore specializzato, passando direttamente dal CAD dell’oggetto alla sua rappresentazione fisica;
- Il processo di produzione additiva non dipende dalla forma e dalla complessità del componente da realizzare. A differenza dei metodi tradizionali, non richiede strumenti specifici, permettendo così di ridurre i costi di investimento in attrezzature. Inoltre, questa caratteristica conferisce una grande flessibilità nella produzione, consentendo di rispondere rapidamente alle richieste mutevoli del mercato o a singole commesse del cliente;
- La tecnologia offre una notevole libertà nel design del prodotto. È possibile realizzare strutture molto più leggere grazie alla loro complessità geometrica, che non sarebbero producibili con i metodi di produzione tradizionali, inclusa la possibilità di creare strutture reticolari. Inoltre, è possibile ottenere solidi in cui vengono utilizzati contemporaneamente diversi materiali, variando localmente le proprietà meccaniche. Questa tecnologia consente un altissimo grado di personalizzazione del prodotto e design ergonomici adattati alle esigenze specifiche dei clienti, come ad esempio protesi in ambito medico;
- È possibile realizzare meccanismi completamente integrati e incorporati nel prodotto finito, come cuscinetti o ingranaggi. Questo approccio riduce gli errori di assemblaggio e i costi associati;
- Il processo consente un uso efficiente dei materiali. A differenza dei metodi sottrattivi convenzionali, che richiedono la rimozione di grandi quantità di materiale, in questo caso il componente viene costruito strato per strato. Questo approccio riduce al minimo lo spreco di materiali;

- Tempi e costi di produzione sono legati unicamente alle dimensioni dell’oggetto da realizzare.

Limitazioni [3], [8]:

- I volumi di lavoro sono limitati dalle dimensioni della macchina di stampa, vincolando così le misure degli oggetti realizzabili.
- Le velocità di produzione risultano inferiori rispetto a quelle dei metodi tradizionali. Questo comporta una bassa produttività, rendendo la tecnologia meno adeguata per le grandi produzioni industriali.
- I materiali disponibili per l’additive manufacturing sono significativamente inferiori rispetto a quelli utilizzabili con le tecnologie convenzionali. Inoltre, non tutte le tecnologie additive permettono l’uso di materiali idonei per la realizzazione di prodotti funzionali.
- La finitura superficiale è dipendente dalla tecnologia additiva utilizzata.

1.1.4. Le diverse tecnologie

Con il passare del tempo e lo sviluppo tecnologico, a partire dalla stereolitografia (SLA), sono state messe a punto numerose nuove tecnologie di additive manufacturing. Queste sfruttano diversi principi e materiali, ampliando significativamente le possibilità applicative e migliorando le prestazioni dei processi di produzione additiva.

Esistono in letteratura diverse classificazioni delle tecnologie utilizzate, ognuna basata su un differente parametro: il materiale di partenza (solido, liquido, polvere), il processo stesso, l’attrezzatura utilizzata o la trasformazione dei materiali [3]._Adottando la classificazione basata sul processo, è possibile distinguere sette principali categorie [9], come schematizzato in figura 4.

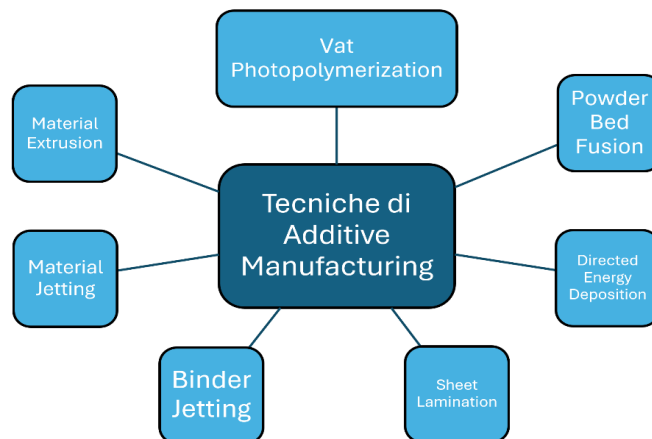


Figura 4 - Tecniche di Additive Manufacturing

- **Vat Photopolymerization**

La Vat Photopolymerization, o fotopolimerizzazione in vasca, è una tecnica di additive manufacturing che utilizza resine fotopolimeriche liquide, solidificate selettivamente tramite polimerizzazione attivata dalla luce. In questo processo, la resina liquida è contenuta in una vasca e mediante un fascio di luce UV viene solidificata strato per strato.

Tra le principali tecniche di fotopolimerizzazione troviamo la stereolitografia (SLA) e l’elaborazione digitale della luce (DLP). La SLA utilizza un laser per tracciare le sezioni trasversali dell’oggetto sulla superficie della resina. La DLP, invece, utilizza un proiettore digitale per esporre interi strati di resina contemporaneamente, rendendo il processo più veloce.

Questa tecnica presenta diversi vantaggi se paragonata ad altre tecniche di fabbricazione additiva: alta precisione, maggiore velocità, ottima finitura superficiale, costi e sprechi di materiale ridotti [10], [11].

- **Powder Bed Fusion**

Il processo PBF, conosciuto anche come fusione a letto di polvere, è una tecnica che utilizza polveri, metalliche o polimeriche, che vengono fuse in maniera selettiva mediante una fonte di calore, come un fascio laser o di elettroni. La polvere viene distribuita su una piattaforma di lavoro, successivamente il fascio scansiona selettivamente la polvere e la fonde strato dopo strato. La porzione fusa si solidifica rapidamente e successivamente viene depositato un nuovo strato di polvere. Il processo si ripete fino ad ottenere il componente finale.

Esistono diverse varianti del processo. Il PBF-LB/P e il PBF-LB/M utilizzano un laser per, rispettivamente, sinterizzare polveri polimeriche e fondere completamente polveri metalliche. Il PBF-EB/M, a differenza dei precedenti, utilizza un fascio di elettroni per la fusione di polveri metalliche [12].

- **Directed Energy Deposition**

La DED è una tecnologia utilizzata per la realizzazione di oggetti metallici. Il processo impiega una fonte di energia, come un laser o un fascio di elettroni, che fonde il materiale depositato localmente. Il materiale, che può essere sotto forma di polvere o filo, viene alimentato attraverso un ugello. La fonte di calore fonde il materiale depositato, creando un bagno di fusione. Il materiale fuso solidifica rapidamente, formando strati successivi che si accumulano per creare la forma desiderata.

La DED permette di combinare diversi materiali in un unico processo di costruzione ed è ideale per riparare componenti metallici danneggiati [13].

- **Binder Jetting**

Il Binder Jetting è una tecnica di produzione additiva che utilizza un legante, tipicamente un liquido polimerico, per unire strati di polvere. Il processo inizia con la stesura di un sottile strato di polvere su una piattaforma. Successivamente, una testina di stampa deposita il legante liquido selettivamente sulle aree desiderate del letto di polvere, solidificando il materiale e formando uno strato dell'oggetto. Questo processo viene ripetuto strato dopo strato fino a completare l'oggetto.

Una volta terminata la stampa, l'oggetto viene rimosso dal letto di polvere e sottoposto a ulteriori trattamenti, come la sinterizzazione o l'infiltrazione, per migliorare le proprietà meccaniche e la densità. È possibile utilizzare diverse tipologie di materiali, come metallici, ceramici e compositi [14].

- **Material Extrusion**

Il nome commerciale della Stratasys è Fused Deposition Modelling (FDM) e risulta una delle tecnologie di additive manufacturing più utilizzata. La stampante utilizza un filamento di un materiale termoplastico, il quale viene riscaldato all'interno della testina di stampa e portato a una fase semi-liquida. Il materiale viene quindi estruso attraverso un ugello e depositato dalla testina nella zona di stampa, dove si solidifica rapidamente. Strato dopo strato viene realizzata la struttura desiderata [15].

- **Material Jetting**

Il Material Jetting (MJ) è un metodo di produzione additiva che utilizza un fotopolimero liquido per creare l'oggetto desiderato. Durante il processo, piccole gocce di materiale fotopolimerico vengono depositate strato dopo strato su una piattaforma di costruzione. Ogni strato viene indurito (polimerizzato) tramite una fonte di luce UV, solidificando il materiale e formando la struttura desiderata.

Presenta diversi vantaggi, come la possibilità di adattare lo spessore del layer per ottenere parti di alta qualità, con imprecisioni geometriche trascurabili e bassa rugosità superficiale [16].

- **Sheet Lamination**

È una tecnologia di produzione additiva che prevede la costruzione di oggetti tridimensionali attraverso la laminazione di strati di materiale. Uno

dei processi più noti in questo ambito è il Laminated Object Manufacturing (LOM), introdotto nel 1991. Nel LOM, fogli di materiale, come carta, vengono tagliati secondo le sezioni trasversali del modello CAD dell'oggetto e poi laminati insieme strato per strato. Il taglio dei fogli avviene solitamente tramite un laser CO₂, e ogni strato viene incollato al precedente per formare l'oggetto finale. Esistono varianti di questo processo che utilizzano diversi materiali (come plastica o metallo) e metodi di legatura, come l'incollaggio, il riscaldamento, il serraggio o la saldatura ultrasonica. La saldatura ultrasonica, in particolare, è una tecnica di grande interesse per la ricerca attuale, poiché offre vantaggi in termini di velocità e precisione.

Questa tecnologia è apprezzata per la sua capacità di produrre rapidamente prototipi e modelli concettuali [17].

1.2. Laser Powder Bed Fusion (PBF-LB/M)

Il Laser Powder Bed Fusion (PBF-LB/M) [18], precedentemente noto come Selective Laser Melting (SLM), è un processo di produzione additiva a letto di polvere utilizzato per la fabbricazione di componenti metallici [19]. Questa tecnologia è attualmente tra le più diffuse e trova applicazione in numerosi settori, tra cui l'aerospazio [20], l'automotive [21], produzione di turbomacchine [22], campo biomedico [23], produzione di gioielli [24] e altri.

Tale tecnologia offre una notevole libertà nella progettazione del design dei componenti, oltre a un'elevata flessibilità produttiva [19]. Ciò consente la realizzazione di strutture più complesse rispetto a quelle ottenibili con i metodi tradizionali, migliorando sensibilmente le prestazioni dell'elemento in termini di resistenza e peso. Inoltre, il processo permette di ridurre al minimo il numero di parti da assemblare in un singolo componente, eliminando così i collegamenti e semplificando l'assemblaggio degli elementi [25].

Le caratteristiche meccaniche dei componenti realizzati risultano vicine o superiori a quelle ottenibili con i metodi di produzione tradizionali, come la fonderia. Infatti, con un'attenta ottimizzazione dei parametri di processo, si raggiungono densità tipicamente superiori al 99,5% rispetto a quelle nominali del materiale utilizzato e microstrutture più fini, con conseguente aumento della resistenza meccanica dell'elemento [26].

1.2.1. Il processo

Il PBF-LB/M è un processo a letto di polvere brevettato in Germania nel 1997. Di seguito in figura 5 è rappresentato uno schema del processo [27].

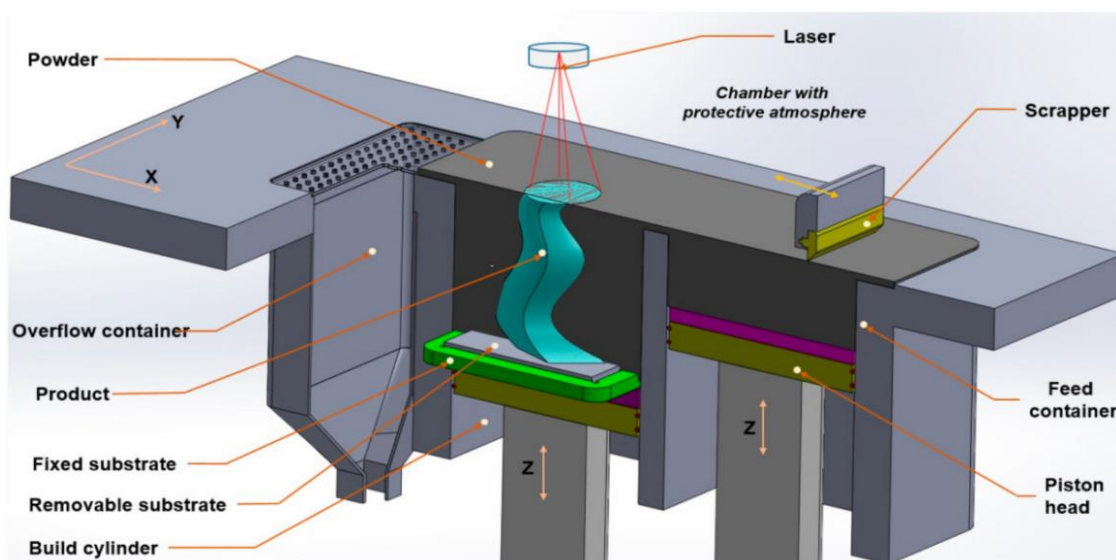


Figura 5 - Schema processo PBF-LB/M [27]

La polvere metallica viene stesa a strati sull’area di lavoro, con spessori che variano tipicamente dai $20\ \mu\text{m}$ ai $100\ \mu\text{m}$. Con tali dimensioni è infatti possibile ottenere una buona risoluzione. In funzione del particolare modello di stampante in considerazione, la polvere metallica può essere fornita da una tramoggia o in alternativa da un serbatoio, posti accanto all’area di lavoro [26], [27].

Con riferimento alla figura 5, la testa del pistone (indicata come “piston head”) inizialmente solleva la polvere contenuta nel contenitore fino a portarla al di sopra del livello dell’area di lavoro. Successivamente, una lama (o un rullo) distribuisce la polvere sulla piattaforma di lavoro, mentre l’eccesso viene raccolto in un secondo serbatoio di accumulo (overflow container). Nella parte superiore della camera è presente una sorgente laser che fonde la polvere depositata. In funzione della sezione trasversale del componente, la polvere viene esposta selettivamente al raggio laser nel piano x-y. Ciò determina la fusione localizzata sia della polvere investita dal raggio, sia di uno strato del layer sottostante già solidificato. Il cilindro di costruzione (build cylinder) si abbassa di una quantità pari allo spessore del layer da depositare e il processo viene ripetuto finché l’intera struttura non è stata realizzata [26], [27].

Al fine di evitare l’ossidazione del materiale durante la fusione, la camera di lavoro viene riempita durante il processo di stampa con gas inerti, come azoto o argon, riducendo così il quantitativo di ossigeno presente [26], [27].

Il processo di PBF-LB/M necessita della presenza di supporti. Queste strutture ancorano il componente alla base di lavoro, disperdono il calore e prevengono distorsioni causate dalla dilatazione termica dovuta ai grandi gradienti termici a cui è soggetto il materiale [28]. Tuttavia, includere strutture di supporto nel processo di stampa aumenta i tempi, i costi e la complessità della post-elaborazione. Di conseguenza, risulta fondamentale progettare e ottimizzare tali strutture, ad esempio orientando il pezzo in una posizione di stampa ideale [29].

Oltre a utilizzare i supporti, è possibile preriscaldare la piastra al fine di evitare le distorsioni del componente realizzato: in tal modo, infatti, si riducono i gradienti termici e di conseguenza le sollecitazioni residue [30].

Il processo coinvolge una grande quantità di variabili che determinano le proprietà finali del componente, quali microstruttura, resistenza meccanica, finitura superficiale, durezza, etc. È possibile distinguere due diverse categorie: proprietà della polvere (forma e dimensione, composizione chimica, etc.) e parametri di processo (potenza e raggio del laser, spessore del layer, velocità di scansione, etc.) [31].

1.2.2. Post-processing

Il componente realizzato necessita di alcune operazioni aggiuntive.

Risulta necessaria la rimozione della polvere che, a valle del processo di stampa, circonda la parte e rimane all'interno della geometria del componente. In tale senso, è conveniente creare geometrie che consentano di rimuovere facilmente la polvere da eventuali cavità, per evitare che rimanga intrappolata all'interno del componente, compromettendo le prestazioni e le funzionalità del pezzo [32]. Successivamente, dopo la rimozione del pezzo dalla piattaforma, si ha una seconda fase di rimozione della polvere: i principali metodi impiegati includono la sabbiatura, l'incisione chimica e la vibrazione ultrasonica [33].

Nel processo, le strutture di supporto sono realizzate con lo stesso materiale utilizzato per il pezzo. Queste, non essendo parte del prodotto finale, andranno rimosse dopo la stampa. Un esempio di supporti è mostrato in figura 6 [34].

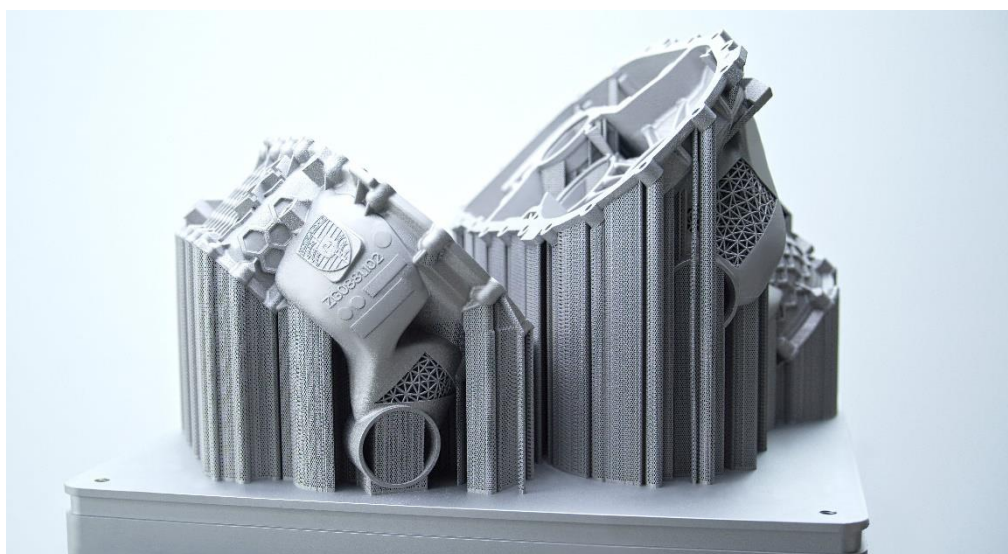


Figura 6 - Strutture di supporto [34]

Tale operazione richiede la rimozione manuale e processi quali l'elettroerosione a filo, il taglio a getto d'acqua e il taglio laser [33], [35]. L'elettroerosione, ad esempio, permette di lavorare forme complesse [36], ma risulta essere una tecnica lenta, costosa e che determina una non buona finitura superficiale.

Un terzo elemento da considerare riguarda la qualità della finitura superficiale. Nel caso in cui il componente deve essere accoppiato, è richiesta infatti una lavorazione successiva per ottenere la finitura superficiale desiderata. Le principali tecniche utilizzate a tal fine sono la rettifica e la lucidatura, che determinano i migliori risultati. Tuttavia, è possibile utilizzare altre tecniche, come la lucidatura laser, la sabbiatura e la finitura assistita da campo magnetico [25].

Infine, sono necessari post-trattamenti termici per far fronte a diverse esigenze, tra cui la rimozione degli stress residui causati dagli elevati gradienti termici, l'ottenimento della microstruttura desiderata, il miglioramento delle proprietà del componente e la regolazione della distribuzione delle porosità nel materiale. I principali trattamenti utilizzati includono lo stress relieving, effettuato prima di rimuovere il pezzo dalla piattaforma, e successivi eventuali trattamenti quali la ricottura, la normalizzazione e la tempra [33].

1.2.3. Polveri metalliche

I materiali utilizzabili per il processo includono leghe di alluminio, cobalto, cromo, nichel, acciaio e titanio.

Ogni tecnica di additive manufacturing si differenzia per le proprietà della polvere utilizzata, come la dimensione dei grani. In particolare, per il PBF-LB/M si utilizzano polveri con dimensioni comprese tra 15 e $45 \mu\text{m}$. Queste dimensioni rivestono un ruolo di particolare importanza in quanto influenzano diversi aspetti, come il controllo dello spessore del singolo layer, il tempo del processo di stampa e le porosità del componente finito [37].

Esistono diverse forme possibili per le polveri metalliche. Tra queste la forma sferica è considerata la migliore: consente di ottenere una buona fluidità e un’alta densità del letto di polvere. Un esempio di polvere di alluminio è mostrato in figura 7 [31].

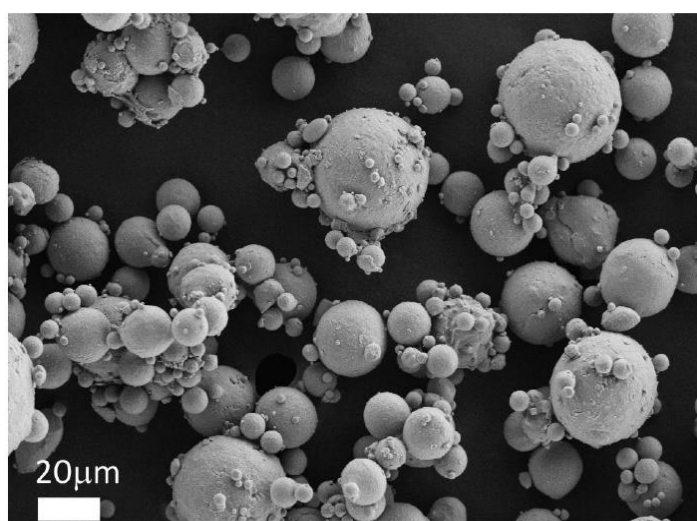


Figura 7 - Polvere di alluminio [31]

Entrando a contatto con l’atmosfera, le polveri possono assorbire gas come ossigeno, azoto e umidità dall’aria. Questi gas sono indesiderati poiché, durante il processo di stampa, possono dar luogo a porosità, ossidi e nitruri, con conseguente peggioramento delle proprietà del materiale. Per evitare tali problematiche, è possibile effettuare un pretrattamento termico della polvere, degassificandola [37].

In seguito a ogni processo di stampa, il materiale va rimosso dalla macchina e setacciato. In tal modo può essere riciclato, reinserendolo nuovamente all’interno della macchina per altri processi di stampa [37].

Tuttavia, un’importante limitazione per il processo è la scarsa disponibilità di materiali utilizzabili. Infatti, nonostante la grandissima varietà di leghe metalliche presenti sul mercato, solo una piccola parte di esse è attualmente disponibile per il PBF-LB/M [26]. È possibile richiedere l’atomizzazione (metodo

di produzione delle polveri metalliche) su richiesta di una particolare lega, ma questo risulta costoso e richiede molto tempo [19].

1.2.4. Tipologie di recoater

In una macchina PBF-LB/M, il sistema che distribuisce la polvere prende il nome di “recoater”.

Nel processo si possono utilizzare diverse configurazioni del recoater, ciascuna con i propri vantaggi e svantaggi. La scelta della configurazione più adatta dipende dall'applicazione specifica, permettendo di ottimizzare il processo in base alle esigenze particolari della situazione.

Come indicato dal produttore EOS, una distinzione che è possibile effettuare, basata sul tipo di lama, è tra “Hard recoater” e “Soft recoater” [38].

- **Hard recoater**

Il recoater rigido è la scelta standard per i sistemi EOS grazie ai suoi vantaggi in termini di qualità e ripetibilità delle parti. La lama rigida assicura uno spessore uniforme degli strati e compatta la polvere durante il recoating, fornendo un letto di polvere a maggiore densità. Sebbene siano più costosi, i recoater rigidi mostrano una resistenza all'usura superiore rispetto ai recoater morbidi, garantendo proprietà costanti anche per lavori di lunga durata.

Tuttavia, la rigidità del recoater può portare a problematiche durante il processo di spargimento della polvere. Il pezzo in lavorazione e il recoater possono entrare in contatto, ad esempio a causa del cedimento dei supporti dovuto agli stress residui o al surriscaldamento. In tali casi, c'è un alto rischio di interruzione del lavoro. Inoltre, tutte le forze di attrito vengono trasmesse al pezzo, il che può causare la piegatura del pezzo stesso o vibrazioni che disturbano il letto di polvere.

Le principali applicazioni dei recoater rigidi includono parti che richiedono la massima qualità in termini di proprietà meccaniche o precisione dimensionale, nonché parti voluminose. I sistemi EOS utilizzano due tipi di hard recoater: HSS (high speed steel), mostrato in figura 8 Figura 8 [39], e ceramici [38].

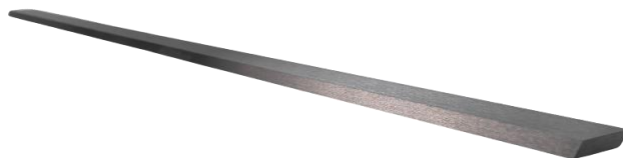


Figura 8 - HSS recoater blade [39]

- **Soft recoater**

Il principale vantaggio dei recoater morbidi è la riduzione delle forze di attrito sul pezzo durante il recoating. Grazie alla loro maggiore flessibilità, possono flettersi se le forze sono troppo elevate o adattarsi al profilo della parte se questa risulta deformata. In questo modo, a differenza dei recoater rigidi, si evita di danneggiare il pezzo o di interrompere il lavoro.

Questa tipologia di recoater è indicata per la realizzazione di parti con alto “aspect ratio” (parti con una grande differenza tra una dimensione e un’altra). Tuttavia, i recoater morbidi presentano un’usura maggiore rispetto ai recoater rigidi, il che può influire sulla qualità delle parti durante lavori di lunga durata.

EOS offre tre tipologie di soft recoater: a spazzola in fibra di carbonio, in silicone (figura 9) e in gomma nitrilica [38].



Figura 9 - Soft recoater in silicone (trasparente) e
NBR (nero) [38]

Il sistema classico di recoater è quello mostrato in figura 5, costituito da una lama e dalla struttura che la sostiene, con un dispenser separato contenente la polvere. Tale sistema spiana la polvere in modo uniforme, permettendo di avere una distribuzione omogenea su tutta l’area di lavoro. Tuttavia, esistono altre

configurazioni sviluppate sia in ambito industriale che di ricerca, che permettono di soddisfare diverse esigenze.

La SLM®280 2.0, sviluppata da SLM Solutions, presenta un sistema recoater bi-direzionale brevettato che consente di depositare un layer di polvere in entrambe le direzioni, senza la necessità di ritornare a una posizione di riposo. Questo permette di ridurre il tempo del processo di stampa [40].

La stampa di parti multi-materiale richiede macchine personalizzate e adattate allo scopo [25]. Come descritto da Neirinck et al. [41], diversi gruppi, sia in ambito accademico che industriale, stanno lavorando per sviluppare sistemi adeguati per la stampa multi-materiale, sia su scala di laboratorio che per un primo approccio commerciale.

Un esempio è l'integrazione del serbatoio della polvere nel gruppo recoater. Modificando e adattando il dispositivo già utilizzato in una macchina SLM Solutions, è stato sviluppato un meccanismo costituito da due camere rotanti e una lama in silicone tra le due, come mostrato in figura 10a. Ruotando, ogni camera rilascia una quantità controllata di polvere davanti alla lama. Regolando la velocità di rotazione delle camere e del recoater, è possibile controllare la quantità di polvere depositata. Il separatore centrale permette infine di immagazzinare e contenere contemporaneamente due materiali differenti [42].

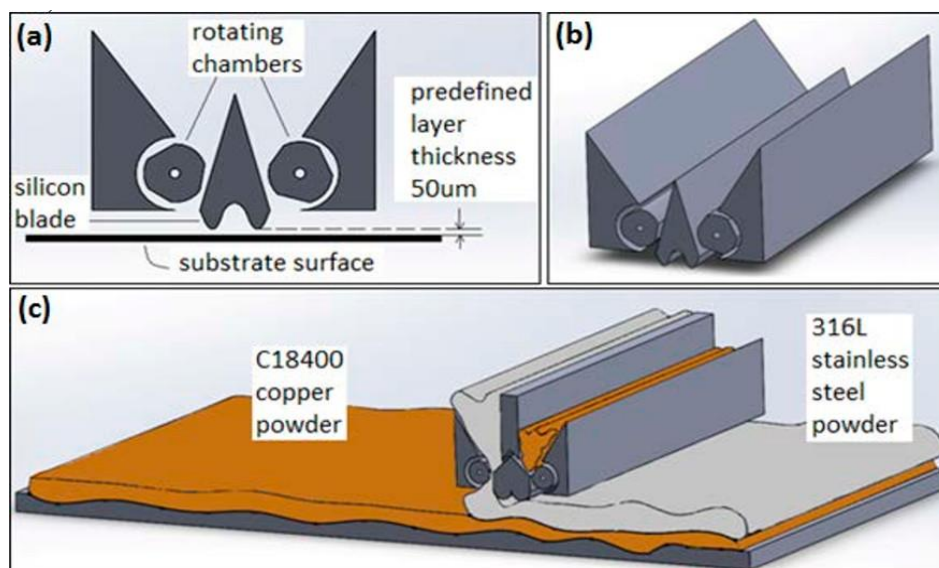


Figura 10 - Split recoater multi-materiale [42]

Sistemi come quello appena descritto possono anche essere utilizzati con un singolo materiale.

1.3. Problematiche relative al letto di polvere nelle macchine PBF-LB/M

1.3.1. Interazione del recoater con i layer depositati: “super elevazione” e attrito

1.3.1.1. “Super elevazione”

Nel processo PBF-LB/M, le ripetute fusioni e solidificazioni dei layer portano a sollecitazioni termiche e distorsioni. A causa della rapida fusione e solidificazione del materiale, questo è soggetto a significativi gradienti termici: quando lo stress termico supera la resistenza del materiale, si verificano deformazioni plastiche. Se tale situazione si verifica in corrispondenza di una superficie sporgente priva di strutture di supporto, si può avere un inarcamento del layer alla sua estremità, come mostrato in figura 11 [29].

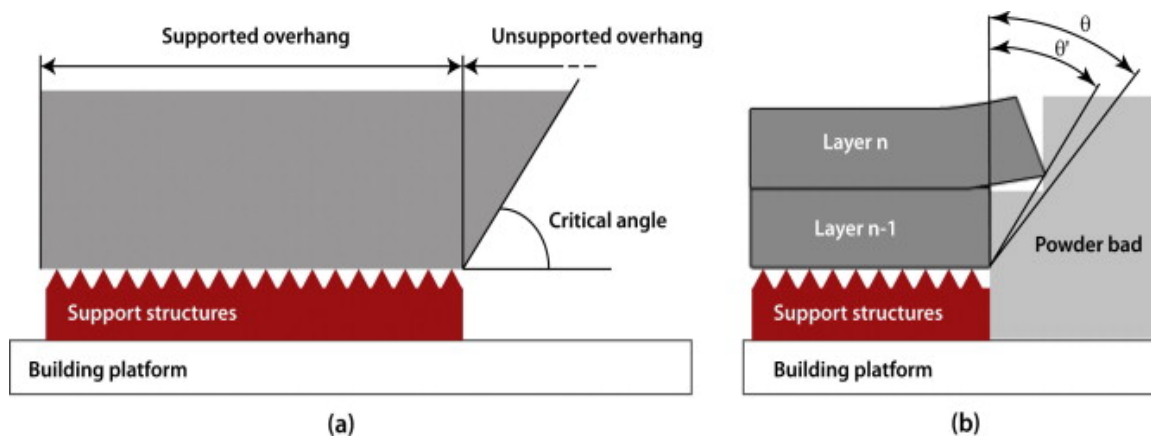


Figura 11 - Deformazione layer [29]

Nel caso in cui tali distorsioni risultino eccessive, si può incorrere nel rischio di arrestare il processo di stampa [43]. Se il bordo di tali porzioni deformate si posiziona al di sopra del livello del letto di polvere (evento noto come “super elevazione”), si rischiano collisioni tra il layer stesso e la lama o la struttura del recoater: ciò può portare a diverse problematiche come parti incomplete, difettosità, porosità e disomogeneità microstrutturali [44]. Un esempio delle conseguenze di tali collisioni è mostrato in figura 12, dove è possibile notare come nella parte sinistra le forme ad arco presentino delle evidenti difettosità [45].

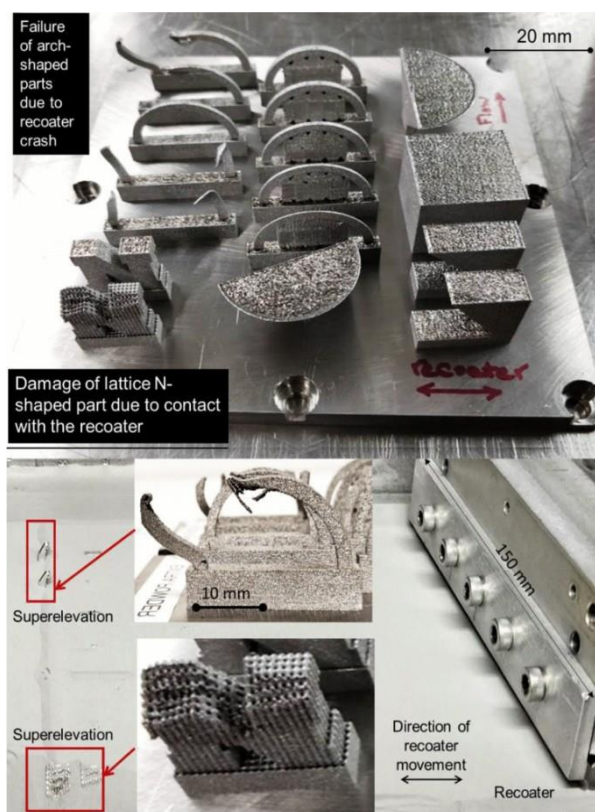


Figura 12 - Difettosità causate dalla collisione del recoater [45]

Inoltre, il recoater trascina i detriti della parte danneggiata, distribuendoli sulla piattaforma di costruzione e causando danni ad altre porzioni del pezzo in lavorazione. Di conseguenza, non è raro dover scartare un intero job a causa di questa problematica. A seguito della collisione, anche la lama può subire danni, rendendo necessaria la sua sostituzione [45].

In tale situazione risulta molto rilevante la tipologia di recoater impiegato. Reijonen et al. [46] hanno condotto uno studio per verificare l'effetto causato dall'utilizzare un soft o un hard recoater. Con la prima tipologia la lama viene danneggiata e ciò si traduce in graffi sul letto di polvere (figura 13c). Utilizzando un hard recoater si possono verificare due eventualità. Nel primo caso il pezzo in lavorazione viene danneggiato (figura 13f). Nel secondo né la lama né il pezzo cedono, il che può portare ad un inceppamento o a una rottura del recoater. Inoltre, nel caso in cui il contatto tra un hard recoater non rompe, ma piega, la parete sottile che sporge dal letto di polvere, si verificano frequenti disturbi del letto stesso (figura 13g).

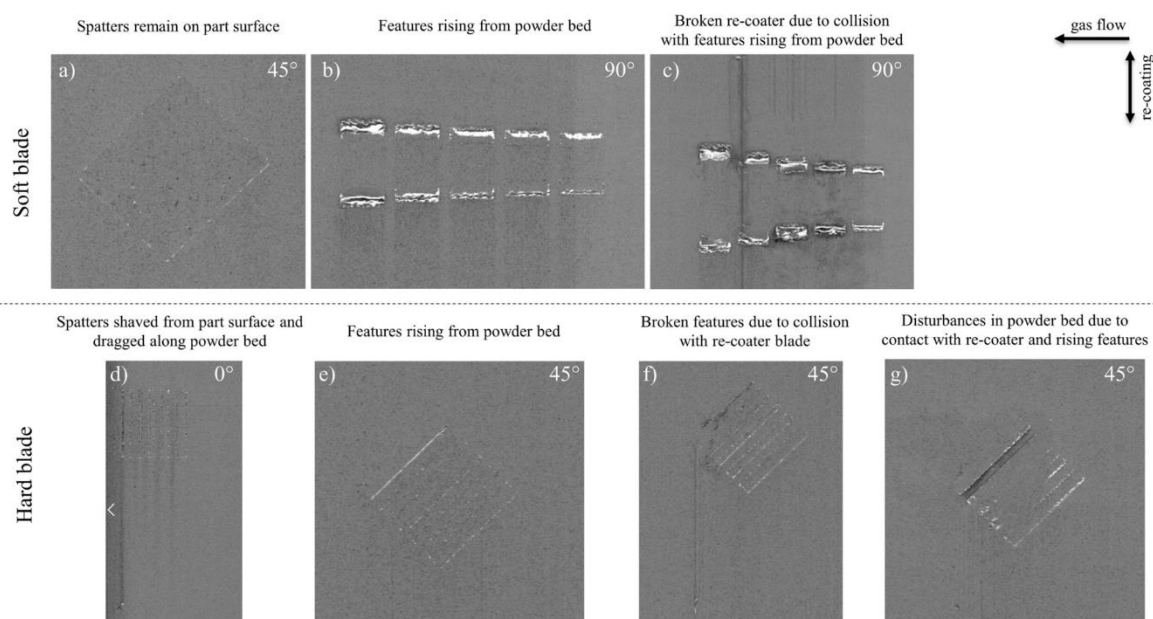


Figura 13 - Effetti di un soft/hard recoater in seguito a una collisione [46]

In aggiunta, nel caso in cui il fenomeno risulti molto accentuato, come già accennato, la parte solidificata entra in contatto con la struttura recoater. In tal caso, il recoater cercherà comunque di avanzare, ma sarà ostacolato dalla parte deformata: ciò determina l’insorgere di vibrazioni che si estendono all’intera struttura e che possono compromettere la qualità del processo di recoating.

1.3.1.2. Attrito

Un secondo aspetto da considerare è quello per cui, durante il passaggio della lama sulla piattaforma di costruzione per depositare la polvere, si generano delle forze di attrito dovute alla rugosità superficiale dei layer precedentemente fusi.

Sono molti i fattori che hanno un effetto diretto sulla rugosità superficiale. Possono essere legati ai parametri di processo (come la potenza del laser e la dimensione del diametro del fascio, la velocità di scansione, l’hatching distance, lo spessore del layer e l’orientazione della parte) o alle caratteristiche della polvere (come forma e dimensione) [47].

La finitura superficiale di un layer precedentemente depositato può essere comparata allo spessore del nuovo strato di polvere: tale situazione può determinare un’interferenza tra la lama e il layer stesso. La lama, inoltre, spinge durante il recoating una data quantità di polvere che può causare pressioni dinamiche contro il bordo della parte in costruzione. Tali fattori contribuiscono a creare forze di attrito considerevoli tra la lama e il layer fuso in precedenza [5].

1.3.2. Vibrazioni recoater

I fenomeni finora presentati possono causare vibrazioni che interessano l'intero recoater, compromettendo la qualità del letto di polvere. Tuttavia, nonostante i numerosi studi presenti in letteratura che analizzano l'influenza del materiale e dei parametri di processo, l'influenza delle vibrazioni del recoater sul processo di distribuzione della polvere è stata scarsamente analizzata. Il primo studio condotto in merito è stato realizzato a fine 2021 da Nasato et al. [48], i quali si sono concentrati sul miglioramento della qualità del letto di polvere in un processo PBF-LB/M. Il fenomeno vibratorio è stato analizzato con simulazioni agli elementi discreti (DEM), utilizzando come materiale la poliammide 12.

Sono state svolte diverse simulazioni, variando la velocità del recoater, la frequenza e l'ampiezza delle vibrazioni, e il tipo di recoater utilizzato (lama o rullo), per valutare l'influenza di questi fattori sulla porosità del letto di polvere.

In figura 14 sono riportati i risultati del caso in cui viene impiegata una lama.

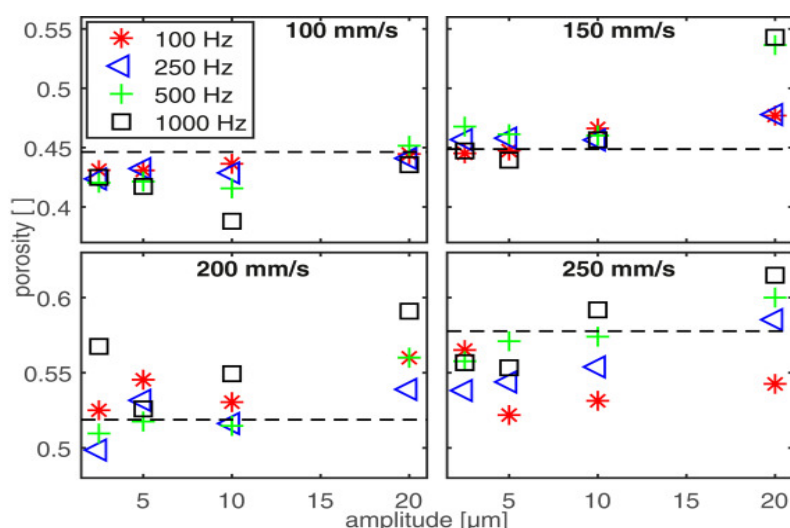


Figura 14 - Porosità del letto di polvere al variare della frequenza e dell'ampiezza delle vibrazioni e della velocità del recoater (lama) [48]

È possibile notare che, rispetto al caso in cui non sia presente alcuna vibrazione (linea tratteggiata), le diverse combinazioni di velocità, frequenza e ampiezza hanno un'influenza significativa. In funzione della combinazione dei tre parametri, si possono ottenere miglioramenti o peggioramenti della porosità del letto di polvere rispetto al caso di riferimento senza vibrazioni. In particolare, è evidente come la porosità aumenti in corrispondenza di grandi ampiezze e frequenze. Questo accade in quanto, in tali condizioni, le particelle di polvere entrano in uno stato vibro-fluidizzato e ciò le rende più facilmente trasportabili dalle forze di taglio esercitate dalla traslazione della lama.

In figura 15 sono riportati i risultati del caso in cui viene impiegato un rullo.

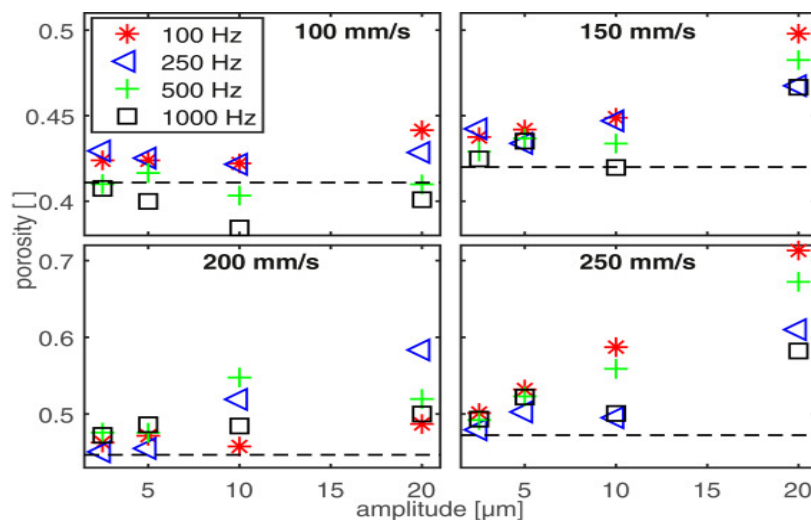


Figura 15- Porosità del letto di polvere al variare della frequenza e dell'ampiezza delle vibrazioni e della velocità del recoater (rullo) [48]

A differenza del caso in cui si utilizza la lama, la diminuzione della porosità si ottiene unicamente con una velocità di 100 mm/s e frequenze superiori a 500 Hz. Tale differenza è dovuta alla geometria del rullo, che crea irregolarità sul letto di polvere, aumentando così la porosità.

Dallo studio presentato, risulta evidente come la presenza delle vibrazioni possa giocare un ruolo importante nel definire la qualità del processo. Con parametri opportunamente calibrati è infatti possibile ottenere un miglioramento della qualità del letto di polvere. Tuttavia, eventuali vibrazioni indesiderate che si innescano durante il processo di recoating possono inficiare sulla porosità.

Tale aspetto è da tenere in considerazione in quanto la densità di impaccamento del letto di polvere influisce direttamente sulle proprietà fisiche e meccaniche, sul ritiro, sulla densità e sulla microstruttura dei prodotti realizzati [49].

1.3.3. Monitoraggio del letto di polvere

Nelle macchine PBF/LB-M, numerosi parametri di processo influenzano la qualità degli artefatti realizzati. Per questo motivo, è di fondamentale importanza il rilevamento dei dati durante il processo, al fine di individuare eventuali criticità che potrebbero comprometterlo. In ambito di ricerca, sono attivi molti studi per l'integrazione di sensori di processo e strumenti di monitoraggio, con l'obiettivo di controllare i processi in tempo reale. In funzione del parametro o del fenomeno da osservare, vengono generalmente impiegati sensori di diversa tipologia, quali acustici, termici, ottici e altri ancora [50].

In merito al monitoraggio del letto di polvere, esistono diverse metodologie. Tra queste, vi sono tecniche di imaging basate sull'analisi delle immagini fornite da una telecamera che monitora il processo [51]. È possibile utilizzare le immagini ottenute dopo la realizzazione di un layer per valutare errori relativi alla geometria della parte, errori di connessione dei supporti e rilevare la presenza di “super elevazioni” [52]. Basandosi sulle immagini ricavate dopo la deposizione del nuovo layer di polvere, è possibile rilevare irregolarità nel processo di recoating, come zone con quantità insufficiente di polvere o altre disomogeneità causate dalla “super elevazione” e dai danni che tale fenomeno può causare sul recoater [53]. Impiegando efficaci sistemi di controllo è dunque possibile monitorare tali fenomeni e prevenire che possano inficiare sul processo di stampa.

Oltre ai sistemi di monitoraggio precedentemente menzionati, sono in corso studi su metodi che permettono di simulare il processo produttivo al fine di predire e prevenire eventuali anomalie. Tra questi, si possono citare metodi per prevenire gli impatti del recoater, come simulazioni basate su modelli termomeccanici [45] o analisi agli elementi finite [44].

2. Presentazione caso studio

Il presente lavoro di tesi si concentra sull’analisi della struttura recoater di una macchina PBF-LB/M, la Print Sharp ps250 prodotta da Prima additive, mostrata in figura 16.

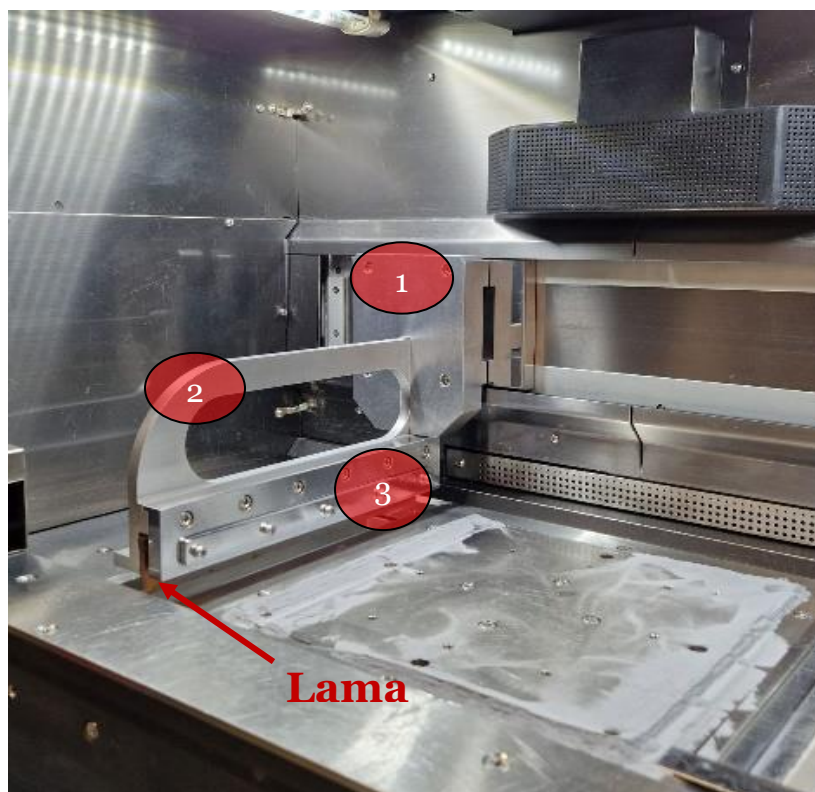


Figura 16 - Struttura portalama

Come già analizzato nel capitolo introduttivo, la struttura ha la funzione di sostenere e movimentare la lama durante il processo di copertura della piattaforma di costruzione di polvere.

La struttura è composta dai seguenti elementi:

1. Piastra di fissaggio in alluminio (elemento 1 in figura 16), vincola l’intera struttura a una slitta, consentendo il moto traslatorio.
2. Corpo centrale in alluminio (elemento 2 in figura 16), costituisce la parte principale della struttura.
3. Elemento laterale in acciaio (elemento 3 in figura 16), serve a bloccare e mantenere in posizione la lama.
4. Blocchetto in acciaio (elemento 4 in figura 17) è posizionato in un alloggiamento specifico ricavato nel corpo centrale.

Ogni elemento risulta fissato al corpo principale mediante l’utilizzo di viti M5.



Figura 17 - Alloggiamento elemento laterale

Le geometrie del corpo centrale e dell'elemento laterale sono progettate per formare un vano in cui viene posizionata la lama, come evidenziato in figura 16. La lama si appoggia contro la parete laterale del corpo centrale e viene fissata tramite la forza di chiusura esercitata dalle viti sull'elemento laterale.

Come detto, l'intera struttura è fissata a una slitta posteriore mediante quattro viti M5. Questa slitta, azionata da un motore elettrico lineare, scorre lungo una guida che definisce la corsa dell'intera struttura (figura 18).



Figura 18 - Sistema di movimentazione

A causa di un problema di progettazione della camera interna, la polvere metallica si infila all'interno della slitta creando attrito intorno ai microinterruttori. L'eccessivo peso del recoater peggiora il problema.

Durante la stesura della polvere, la forza di attrito tra la lama e gli strati fusi può generare delle vibrazioni che si ripercuotono sull'intero sistema. Queste vibrazioni possono portare ad una stesura non corretta della polvere che genererà delle difettosità sui pezzi realizzati [5], [48]. Per affrontare tale problema, si è seguito un approccio che comprende due fasi principali:

- 1. Analisi preliminare per la determinazione di tutte le cause che generano vibrazioni nel sistema.** Inizialmente, è stato verificato il peso che il motore lineare può sorreggere e movimentare. Successivamente, è stata condotta un'analisi FEM per valutare le deformazioni della struttura durante l'esercizio.
- 2. Riprogettazione della struttura.** Una volta identificate le cause delle vibrazioni, si è proceduto alla riprogettazione della struttura utilizzando tecniche di ottimizzazione topologica e modificando il risultato per renderlo idoneo alla produzione con tecnologie di additive manufacturing.

L’obiettivo è migliorare la stabilità della struttura portalama, riducendo l’eccessivo peso e le vibrazioni e, di conseguenza, migliorando la qualità del processo di copertura della polvere.

3. Analisi preliminare

Il primo step del lavoro è stato quello di determinare le cause che provocano la vibrazione della struttura durante il processo di copertura della polvere. In questa fase, sono state considerate due principali ipotesi:

- L’incapacità del motore lineare di sostenere il peso della struttura, cosa che poteva causare un movimento a scatti e, quindi, vibrazioni.
- L’interazione della lama con gli strati di polvere precedentemente depositati e fusi.

3.1. Raccolta dati geometrici

3.1.1. Struttura

La prima attività svolta è stata quella di determinare le dimensioni e la massa della struttura, dati necessari per effettuare gli studi sulla causa delle vibrazioni.

Dopo aver rimosso la struttura dalla macchina, sono state misurate tutte le dimensioni necessarie utilizzando un calibro. Queste misurazioni hanno permesso di ricreare i modelli CAD di ogni componente. Questi saranno in seguito utilizzati per effettuare l’analisi strutturale necessaria a verificare la seconda delle due ipotesi precedentemente elencate nell’introduzione al capitolo. Di seguito sono riportate le dimensioni di maggiore interesse (figura 19 e figura 20) e una vista assonometrica della struttura (figura 21).

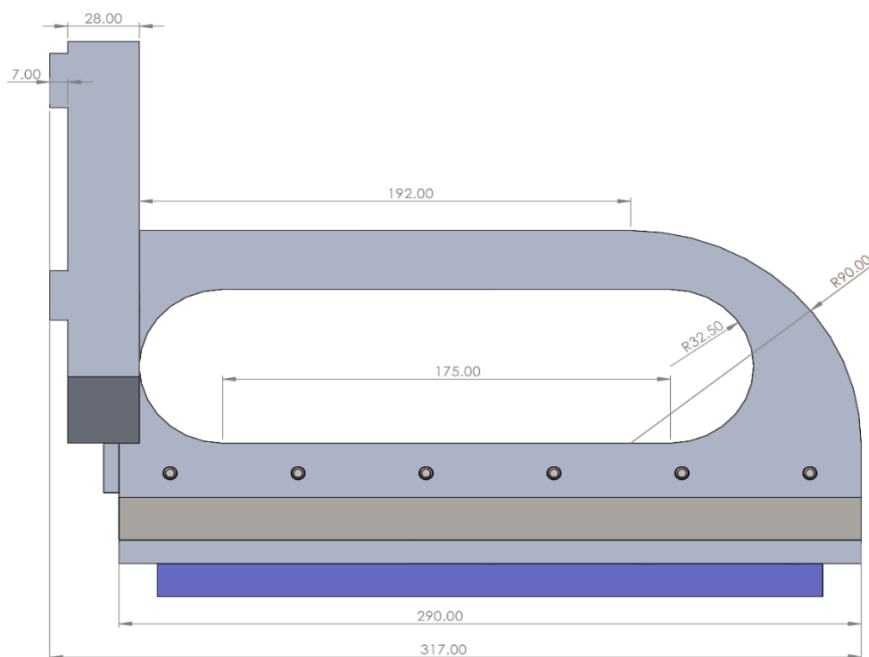


Figura 19 - Vista laterale

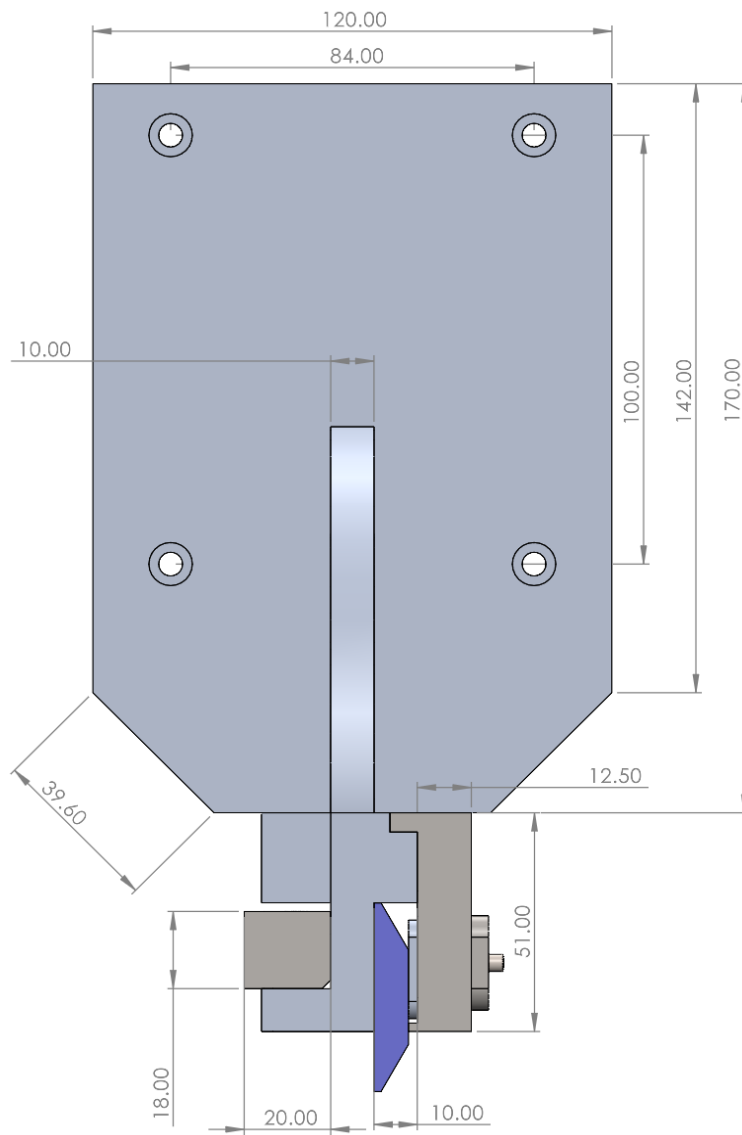


Figura 20 - Vista frontale

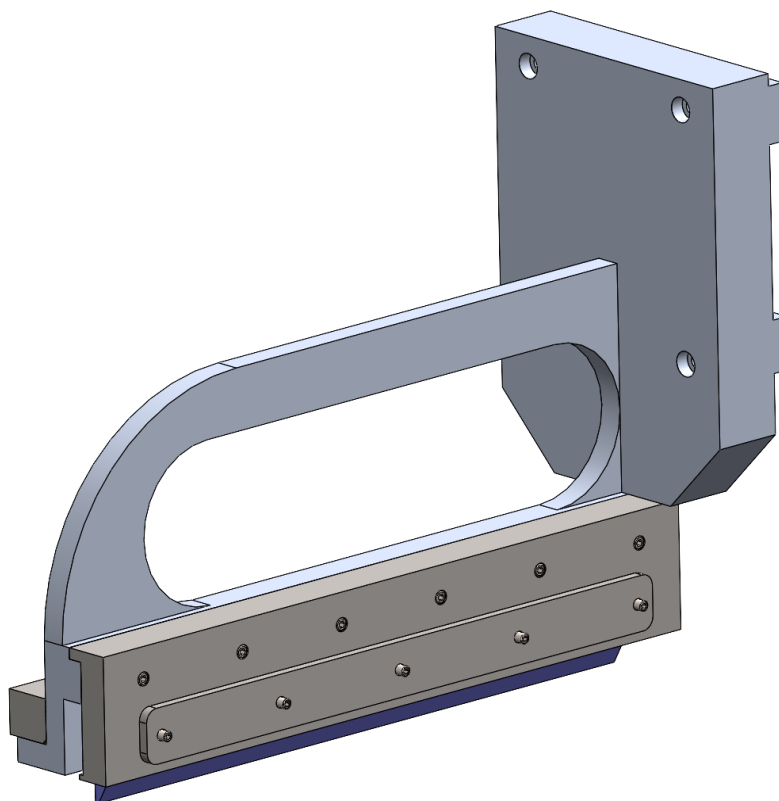


Figura 21 - Vista assonometrica

Inoltre, utilizzando una bilancia, è stata determinata la massa di ciascun componente. È bene evidenziare che la piastra di fissaggio e il corpo centrale sono realizzati in lega di alluminio 6082, mentre l'elemento laterale e il blocchetto sono in acciaio AISI 304. La tabella 1 riporta la massa di ogni elemento.

Componente	Massa [kg]
Piastra di fissaggio	1.40
Corpo centrale	0.92
Elemento laterale	1.74
Blocchetto	0.81
Massa totale	4.87

Tabella 1 - Massa elementi

Come si può notare, gli elementi con il contributo maggiore sono la piastra di fissaggio e l'elemento laterale. In particolare, quest'ultimo potrebbe essere realizzato in un materiale diverso dall'acciaio, meno resistente ma al contempo più leggero, in quanto non sono presenti condizioni di carico tali da giustificare l'uso di un acciaio. In questo modo sarà possibile ottenere una notevole riduzione del peso.

3.1.2. Lama

La lama utilizzata per il processo di copertura della polvere è realizzata in gomma siliconica azzurra. Il materiale utilizzato è il BA 65 HT, prodotto da Nicem [54]. La lama presenta una massa di circa 0.1 kg. Dimensioni e forma sono rappresentate in figura 22 e figura 23.

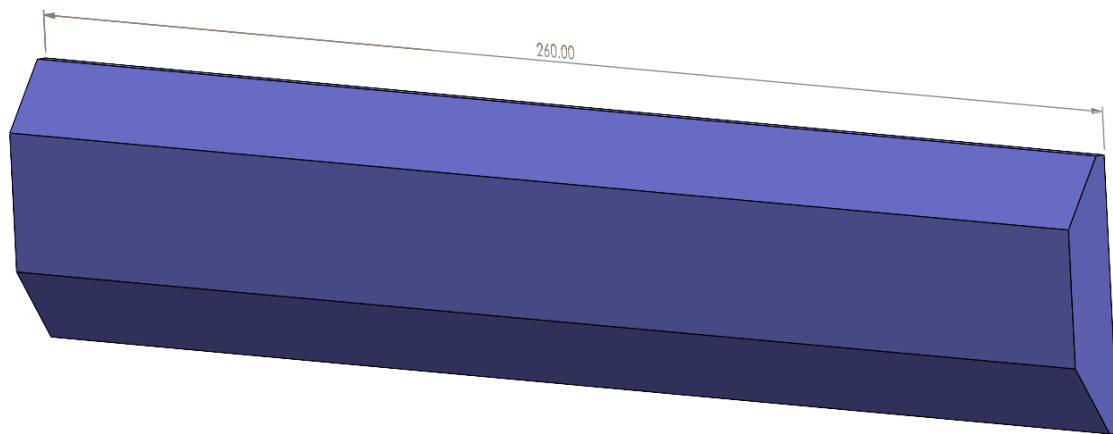


Figura 22 - Vista frontale lama

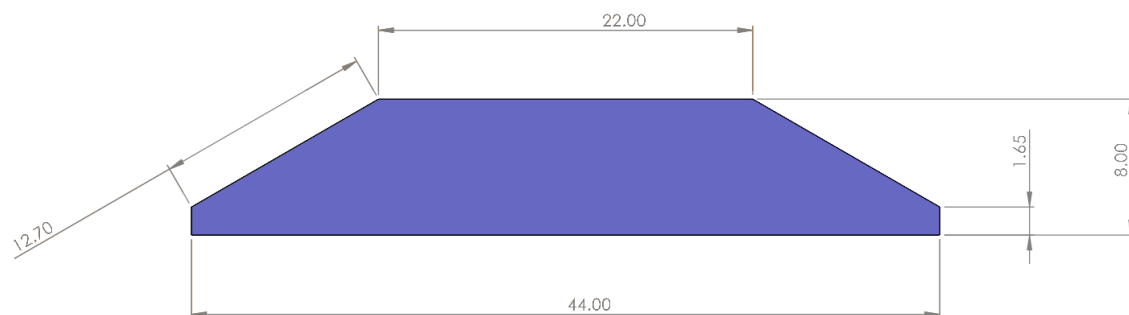


Figura 23 - Vista laterale lama

3.2. Analisi motore lineare

La prima ipotesi da verificare riguarda la possibilità che il motore lineare sia sottodimensionato rispetto al carico richiesto per supportare e movimentare la struttura. In tal caso, l'attuatore non sarebbe in grado di garantire un moto

costante e uniforme. Al contrario, incontrando una resistenza all’avanzamento eccessiva rispetto alle proprie specifiche tecniche, il motore genererebbe un moto irregolare e discontinuo, provocando vibrazioni nell’intera struttura durante il processo di copertura della polvere.

Il motore lineare utilizzato all’interno della macchina Print Sharp 250 è l’ECB14, prodotto da TOYO, mostrato in figura 24 [55].



Figura 24 - ECB14 [55]

Il primo parametro è la velocità massima ammissibile, pari a 2400 mm/s, rispetto ai 100÷200 mm/s tipici del processo [56].

Il secondo parametro rilevante è la “sporgenza ammissibile”, ovvero la distanza massima entro la quale un elemento può sporgere dal motore senza compromettere la funzionalità o la sicurezza del sistema [56].

容許負載力距表 Allowable Overhang			
(單位 Unit : mm)		(單位 Unit : mm)	
水平安裝 Horizontal Installation	A	B	C
10kg	1495	688	512
20kg	715	324	242
25kg	558	251	188
壁掛安裝 Wall Installation	A	B	C
10kg	512	688	1495
20kg	242	324	715
25kg	188	251	558

Figura 25 - Sporgenza ammissibile ECB14 [56]

Come illustrato in figura 25, estratta dalla scheda tecnica fornita dal produttore [56], il motore può essere configurato in due modalità diverse, delle quali quella rappresentata a destra è pertinente al nostro caso. In particolare, nel nostro scenario, la dimensione di interesse è indicata con “A”. Considerando che la struttura si estende in tale direzione, a partire dal motore stesso, per 317 mm (vedi figura 19) e che la sua massa è di 4.87 kg, dai dati riportati nella tabella 1 si deduce che, anche in questo caso, il motore risulta adeguato.

In conclusione, l’ipotesi di un motore sottodimensionato può essere esclusa. Pertanto, è necessario procedere con la verifica della seconda ipotesi.

3.3. Analisi interazione con layer sottostanti

Come riportato in letteratura [5], durante il passaggio della lama sulla piattaforma di costruzione per depositare la polvere, si generano delle forze di attrito dovute alla rugosità superficiale delle parti precedentemente fuse.

È stata eseguita un’analisi strutturale utilizzando Inspire, software sviluppato da Altair, simulando le condizioni operative per determinare se la generazione delle vibrazioni dovute all’attrito potesse generare un’inflessione della struttura che si ripercuote sul motore creando improvvisi blocchi. Di seguito vengono descritti in dettaglio il procedimento e le considerazioni adottate per condurre l’analisi.

3.3.1. Definizione materiali

Come accennato in precedenza, i materiali utilizzati per gli elementi della struttura sono l’acciaio AISI 304 e l’alluminio 6082. Il primo è già presente nella libreria del software utilizzato per l’analisi, mentre per il secondo i dati sono stati ricavati dalla scheda tecnica fornita da Trevigiana Metalli [57]. Per quanto riguarda la lama è realizzata in gomma siliconica BA65HT. In tabella 2 sono evidenziate le proprietà dei due materiali.

		Modulo di Young E [GPa]	Tensione di snervamento σ_s [MPa]	Densità ρ [kg/dm³]
Elemento laterale	AISI 304	195	215	8.0
Blocchetto				
Corpo centrale	Alluminio 6082	69	260	2.7
Piastra fissaggio				

Tabella 2 - Dati materiali

3.3.2. Definizione vincoli

In questa sezione, vengono descritti i vincoli applicati alla struttura nell’analisi FEM. Su Inspire vengono definiti i vincoli strutturali veri e propri, i collegamenti tra i diversi elementi della struttura e i tipi di contatti tra gli elementi.

- Come descritto nel capitolo 2, l’intera struttura è fissata alla slitta posteriore mediante 4 viti M5, posizionate nei quattro fori ricavati sulla piastra di fissaggio. Questo comporta l’assenza di movimenti relativi tra i due corpi: tale configurazione può dunque essere modellizzata mediante l’utilizzo di un vincolo ad incastro. Di conseguenza, in corrispondenza di questi fori, l’intera struttura è stata vincolata con un incastro per impedire qualsiasi movimento. I vincoli sono mostrati in rosso in figura 26.
- Per quanto riguarda l’assemblaggio dei singoli elementi della struttura, questi sono uniti tra loro tramite viti di collegamento. Per simulare tali giunzioni, il software offre la possibilità di inserire automaticamente, in corrispondenza dei fori allineati di due elementi adiacenti, degli elementi che fungono da viti di collegamento. In figura 26 sono mostrati i collegamenti filettati tra il corpo centrale e l’elemento laterale.

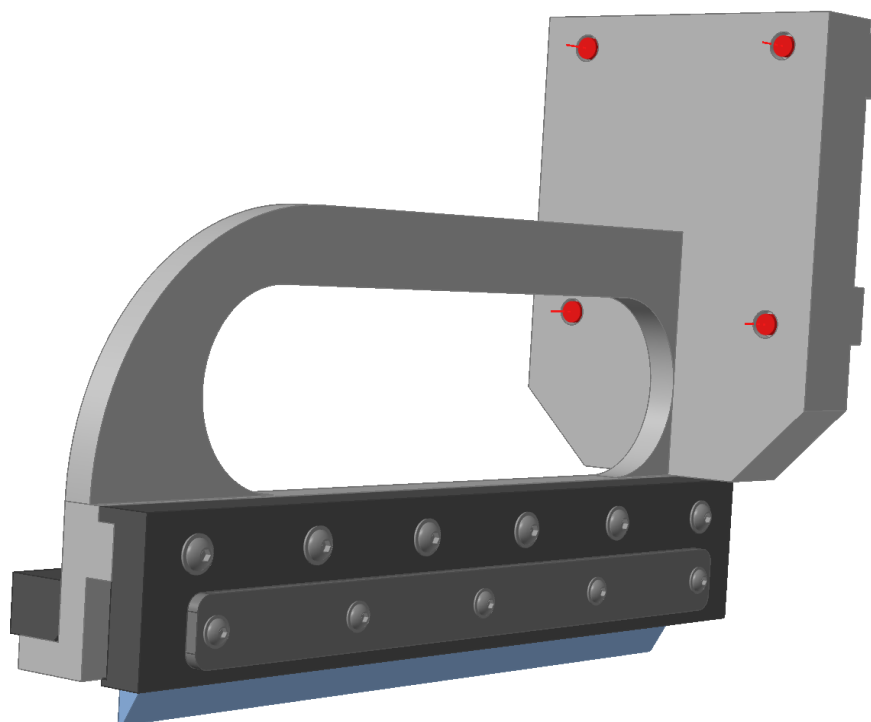


Figura 26 - Vincoli e viti struttura

- Infine, è necessario definire i contatti tra i diversi corpi per evitare possibili compenetrazioni. Per i corpi uniti con collegamenti filettati, il software riconosce automaticamente il contatto tra le superfici e lo identifica come “scorrimento”.

Per quanto riguarda la lama, è stato utilizzato un tipo diverso di contatto. Quest’ultima è mantenuta in posizione, senza possibilità di movimento, attraverso il forzamento esercitato dalle viti di fissaggio poste sull’elemento laterale in acciaio. Queste premono un lamierino metallico che, a sua volta, entra in contatto con la superficie laterale della lama. In questo modo, la lama è a battuta con la superficie del corpo centrale ed è vincolata in tale posizione. Per simulare tale forzamento che impedisce qualunque movimento è stato scelto un contatto di tipo “saldato”.

In figura 27 sono mostrati i tipi di contatto utilizzati, in giallo “scorrimento” e in blu “saldato”.

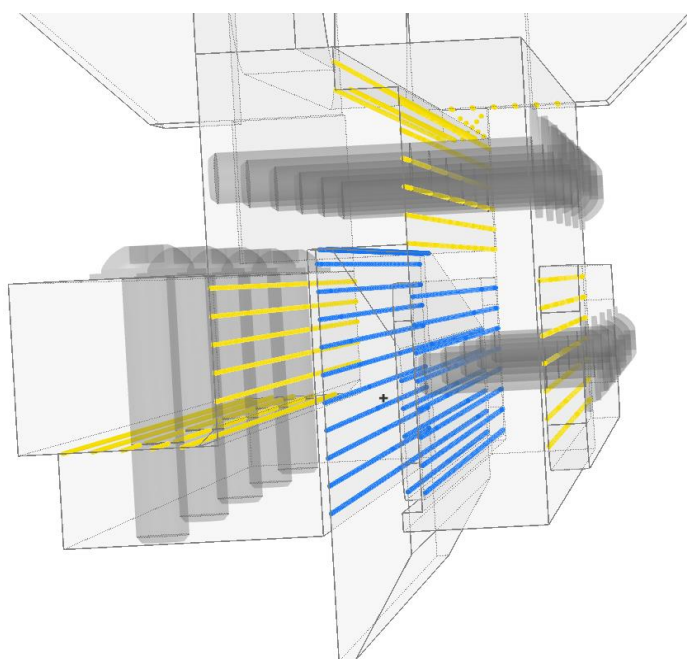


Figura 27 - Tipologie di contatto

Definiti tutti i vincoli, i collegamenti e i tipi di contatto, l’intera struttura risulta completamente vincolata e non presenta parti mobili.

3.3.3. Definizione carico

La definizione dei carichi è fondamentale per determinare le deformazioni e, di conseguenza, l’inflessione della struttura. Infatti, come precedentemente menzionato, quest’ultima potrebbe indurre vibrazioni nella struttura. I principali

fattori da considerare sono tre: il peso, la forza esercitata dal motore elettrico e la resistenza all'avanzamento offerta dalla polvere.

- Per quanto riguarda il peso, esso rappresenta la forza principale da considerare, in quanto responsabile dell'inflexione verso il basso. Per includerlo nell'analisi FEM, non è necessario definire un carico equivalente al peso da applicare alla struttura, ma è sufficiente abilitare la presenza della gravità all'interno del software.
- Passando alla forza esercitata dal motore, questa è la forza che, attraverso la slitta, mette in moto la struttura. Per quanto riguarda questa forza, si è scelto di effettuare una semplificazione. Come detto, essa viene trasmessa alla struttura mediante la slitta che, tuttavia, risulta solidale alla prima. Inoltre, il moto è rettilineo uniforme, privo di accelerazioni. In virtù di queste considerazioni, posizionandosi in un sistema di riferimento solidale alla struttura, questa forza risulta trascurabile.
- Infine, la resistenza all'avanzamento è la forza applicata sulla lama a causa dell'interazione di quest'ultima con la polvere durante il processo di spargimento. Tuttavia, la determinazione di tale forza ha presentato alcune difficoltà.

Come primo approccio, si è scelto di effettuare una ricerca bibliografica al fine di ottenere una metodologia appropriata e precisa per definire il carico. Tuttavia, tale ricerca non ha prodotto risultati utili, in quanto non è stato possibile trovare informazioni adeguate sull'argomento.

Si è quindi deciso di adottare un'ipotesi semplificativa: un carico resistente pari al peso della polvere depositata per il singolo layer. In particolare, si è considerato il caso più gravoso, ovvero l'utilizzo di polvere di acciaio, data la sua densità più elevata rispetto agli altri materiali utilizzati ($\rho = 7.8 \text{ kg/dm}^3$), e il massimo spessore ammissibile per il singolo layer ($t = 0.09 \text{ mm}$). Sapendo che l'area di stampa ha dimensioni $A=260 \times 260 \text{ mm}^2$, il volume del singolo layer risulta

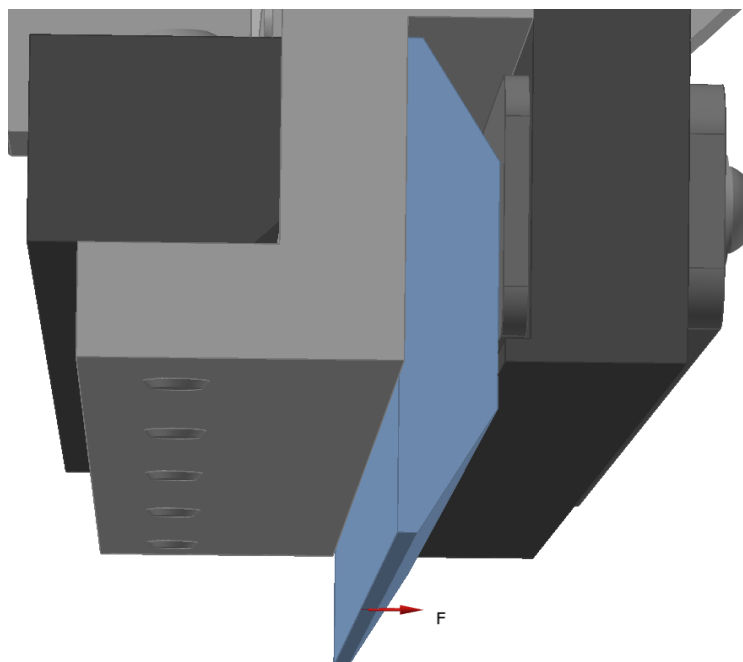
$$V = At = 6.084 \text{ mm}^3$$

e la forza resistente è pari a

$$F_{resistente} = V\rho g = 0.465 \text{ N}$$

È evidente come l'entità di tale forza risulti piuttosto ridotta.

Tale forza è applicata uniformemente sulla superficie inferiore della lama che entra in contatto con la polvere, con direzione parallela alla superficie e verso opposto a quello di avanzamento della lama, come mostrato in figura 28.



*Figura 28 - Punto di applicazione resistenza
all'avanzamento*

Giunti a questo punto, risulta evidente che il principale carico agente sulla struttura sia quello legato al peso della stessa. Pertanto, ci si può aspettare che le deformazioni principali siano dovute al peso, mentre quelle causate dalla forza resistente siano trascurabili. Di conseguenza, nella successiva fase di riprogettazione, sarà essenziale ridurre il peso per diminuire il carico principale presente e, di conseguenza, l'inflessione della struttura.

3.3.4. Analisi FEM e risultati

Definiti i materiali, i vincoli e i carichi, si può procedere direttamente alla simulazione.

Il software utilizza un solutore di tipo implicito, “SimSolid”, il quale offre tre metodi di adattamento della soluzione per controllare l'accuratezza. Per la simulazione è stato scelto il solutore “per stress”, in virtù della maggiore precisione dei risultati che permette di ottenere.

Definiti questi aspetti, si procede ora all'analisi dei risultati. In particolare, ciò che è interessante analizzare per lo studio in corso è visualizzare l'inflessione massima

della struttura in direzione z. Infatti, deformandosi in tale direzione, la struttura si avvicina al piano di stampa, portando la superficie inferiore della lama a una posizione diversa da quella nominale. Se tale spostamento risulta eccessivo, la lama può interagire (localmente o uniformemente) contro il layer precedentemente depositato, determinando l’insorgere di vibrazioni nella struttura. Di seguito in figura 29 sono riportati i risultati della simulazione.

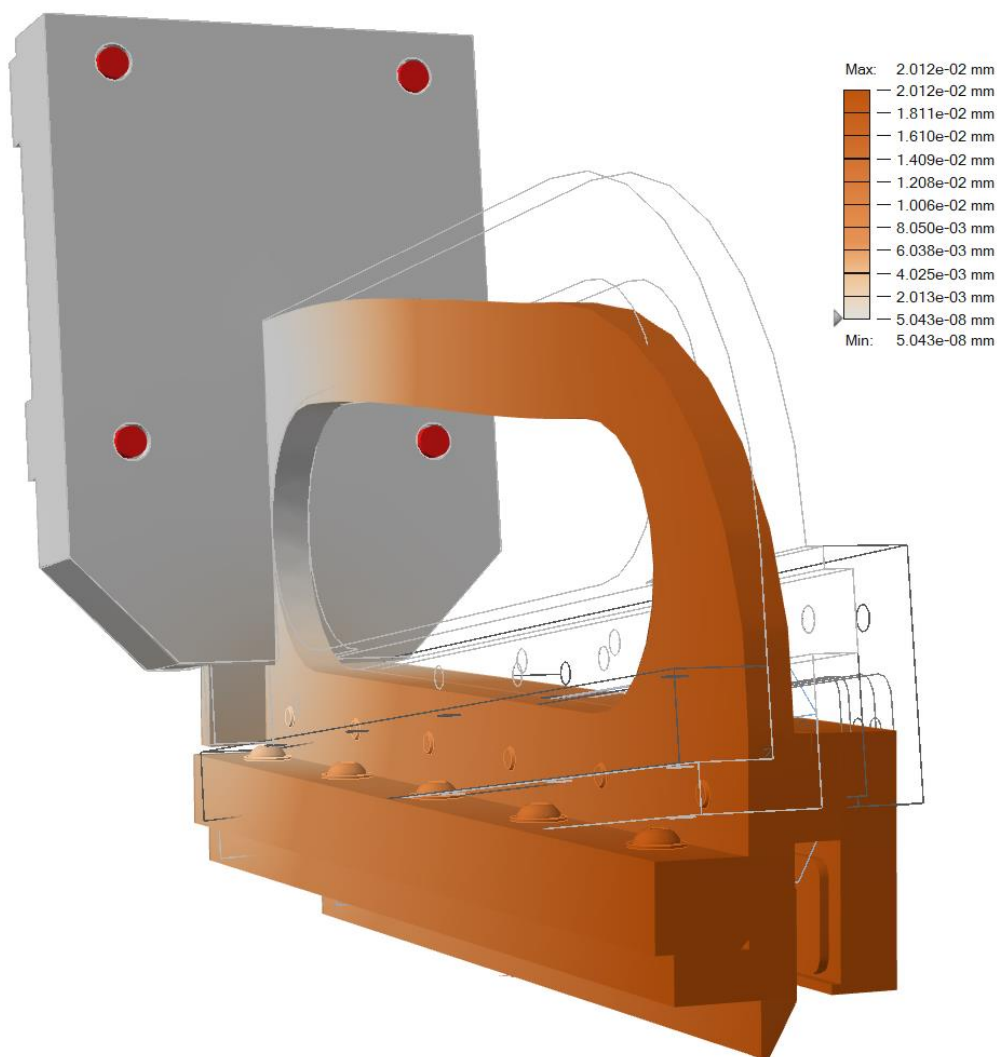


Figura 29 - Spostamenti struttura

Come evidenziato dai risultati e come precedentemente ipotizzato, la deformazione maggiore è attribuibile al peso in direzione z. L’inflessione aumenta linearmente allontanandosi dalla piastra di fissaggio, fino a raggiungere un valore massimo di $2.012 \times 10^{-2} \text{ mm}$ all’estremità.

È interessante analizzare la deformazione che si ha nella direzione di applicazione della forza resistente. Come messo in evidenza in figura 30, nonostante la forza sia applicata verso destra, l'intera struttura va comunque a deformarsi nel verso opposto. Ciò è probabilmente dovuto a una distribuzione asimmetrica della massa.

L'entità della deformazione lungo z è tale da poter causare l'interazione della lama con i layer.

Infatti, in una macchina PBF-LB/M, gli spessori di un layer variano generalmente da 0.02 mm a 0.09 mm , in funzione della precisione desiderata nella realizzazione di un pezzo. L'inflessione massima riscontrata è di circa 0.02 mm , che corrisponde alla dimensione minima possibile per un layer. Di conseguenza, quando si utilizza tale spessore, la lama affonda nella polvere e impatta sulla porzione del layer sottostante solidificato, determinando l'insorgere delle vibrazioni. Nei casi in cui si utilizzano spessori maggiori, è comunque possibile avere contatti a causa di possibili eventi aleatori che determinano in maniera localizzata degli spessori maggiori di quello del layer stesso.

Nella successiva fase di riprogettazione, con ottimizzazione topologica, sarà quindi necessario minimizzare il peso della struttura e, contestualmente, massimizzarne la rigidità. Questo perché il peso è la causa principale dell'inflessione osservata, ma al tempo stesso, a parità di massa, è possibile progettare una struttura con una geometria tale da migliorare e massimizzare la rigidità, riducendo significativamente le deformazioni.

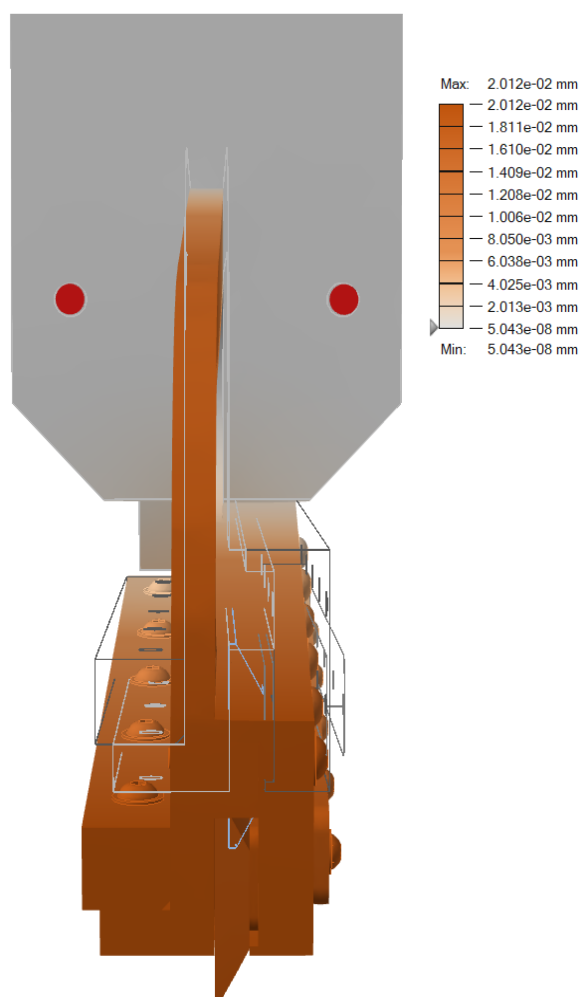


Figura 30 - Spostamenti, vista frontale

4. Riprogettazione portalamama

Prima di procedere con l’ottimizzazione topologica dell’intera struttura, bisogna riprogettare tutte le parti funzionali. Questo passaggio è necessario perché l’ottimizzatore distingue tra aree di lavoro e aree funzionali. Una volta definite le aree funzionali, insieme ai vincoli e ai carichi, il software ottimizza la massa delle aree di lavoro per connettere efficacemente le aree funzionali.

Nel lavoro in esame, è necessario riprogettare il sistema di fissaggio della lama. Nella struttura originale, tale sistema è costituito da due elementi: il corpo centrale e l’elemento laterale in acciaio. Questi dovranno essere ripensati, con l’obiettivo di eliminare il componente in acciaio, che risulta eccessivamente massivo, e sostituirlo con uno in alluminio in modo da ridurre il peso. Dovrà inoltre essere adattato a un nuovo tipo di lama, cercando al contempo di semplificare il processo di fissaggio della stessa e del portalamama alla struttura centrale.

In questo capitolo vengono analizzate nel dettaglio le soluzioni tecniche adottate.

4.1. Portalamama originale

L’elemento di fissaggio originale (precedentemente denominato “elemento laterale” nel Capitolo 2) ha la funzione di bloccare la lama in posizione, esercitando su di essa una forza che la porta a contatto con la superficie laterale del corpo centrale. Come illustrato in figura 31, il corpo centrale e l’elemento di fissaggio sono in contatto sulla superficie di accoppiamento evidenziata in rosso e sono fissati tramite collegamenti filettati M5, evidenziati in verde.

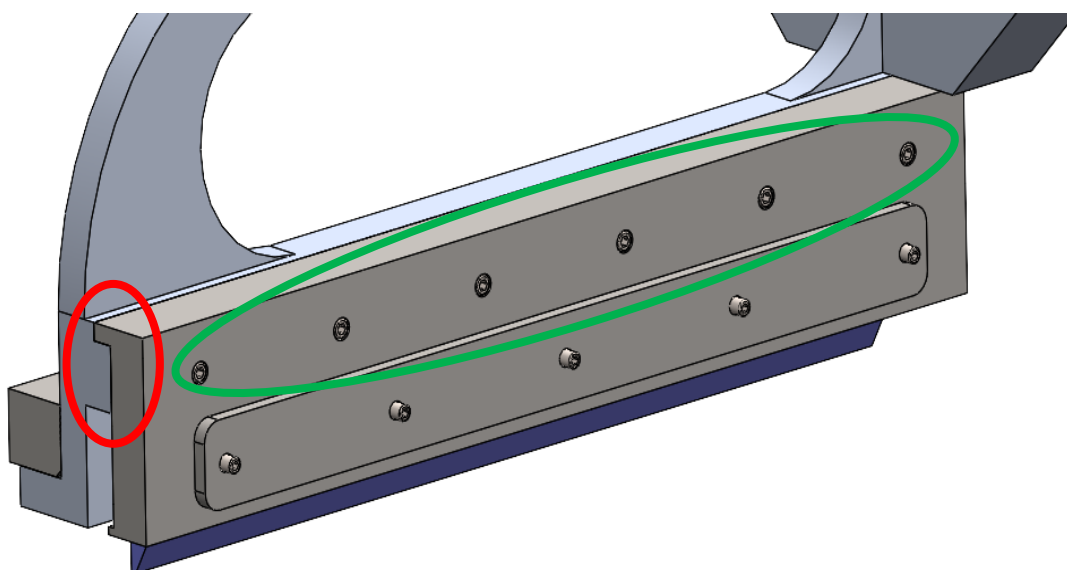


Figura 31 - Elemento di fissaggio originale

Il portalama è costituito da tre componenti principali. Con riferimento alla figura 32, figura 33 e figura 34 si hanno:

- Corpo principale (elemento 1 figura 32), contiene le superfici di accoppiamento con la struttura in alluminio e le sedi dei collegamenti filettati;
- Piastrina interna (elemento 2 figura 32), è l'elemento che entra in contatto con la lama;
- Elemento esterno (elemento 3 figura 32), contiene l'alloggiamento delle viti che esercitano la forza di chiusura.

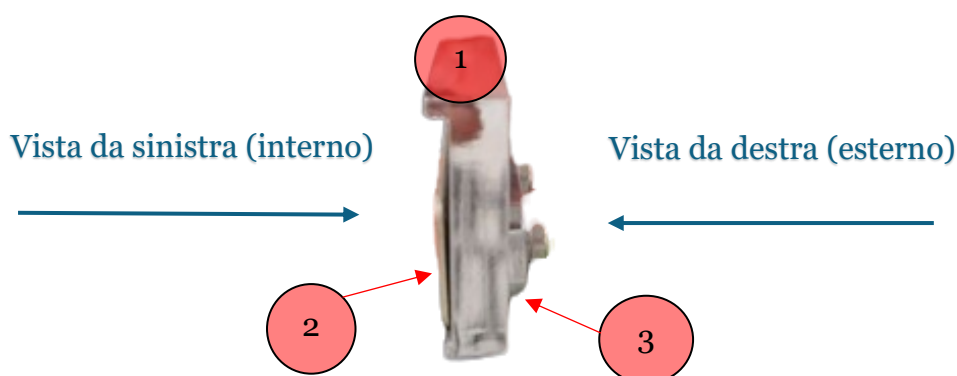


Figura 32 - Elemento di fissaggio originale, vista frontale



Figura 33 - Elemento di fissaggio originale, vista da sinistra



Figura 34 - Elemento di fissaggio originale, vista da destra

Sull'intero componente non agiscono carichi significativi. Le sue uniche funzioni sono quelle di determinare, mediante le viti, una sufficiente forza di serraggio tale

da mantenere in posizione la lama e, al contempo, di creare, insieme al corpo centrale in alluminio, la forma del vano in cui si inserisce la lama.

Il componente è stato realizzato in acciaio, cosa che si rivela in realtà una scelta non ottimale: ciò porta infatti ad avere una massa eccessiva che non risulta essere giustificata dai carichi presenti che, come detto, risultano essere irrilevanti. Inoltre, durante il serraggio delle viti, la forza impressa deforma la lama, producendo degli errori nel parallelismo tra la piattaforma e la lama.

4.2. Nuovo portalama

4.2.1. Nuova lama

La precedente lama utilizzata, mostrata nel Capitolo 3, presenta una problematica in termini di sostenibilità. Non appena il bordo della stessa si consuma durante il processo di recoating, questa andrà scartata. Tuttavia, l'intera fascia centrale di materiale risulta ancora perfettamente integra: ciò si traduce in un inutile spreco di materiale, con conseguenti costi aggiuntivi.

Per ovviare a tale problematica si è scelto di utilizzare una nuova tipologia di lama in silicone, mostrata in figura 35.

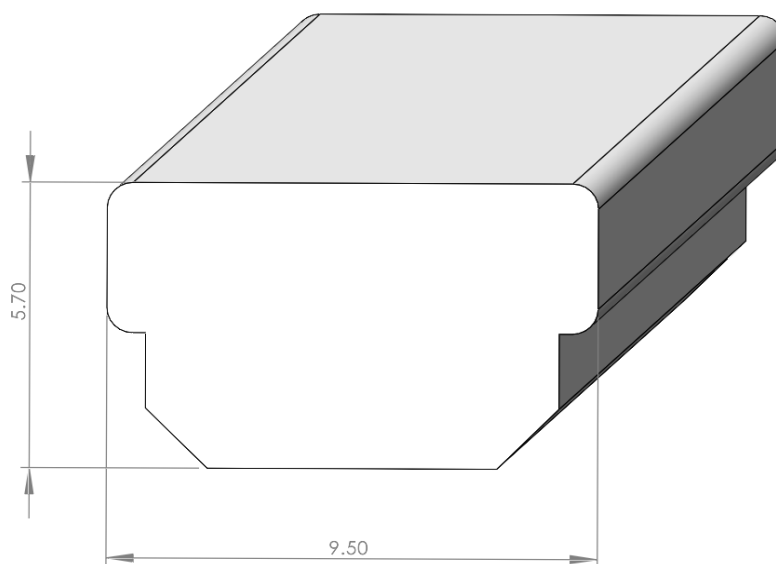


Figura 35 - Nuova lama

Quest'ultima presenta delle dimensioni sensibilmente inferiori a quelle della precedente. Ciò comporta una riduzione sia in termini di materiale utilizzato per la produzione che di materiale scartato, con conseguente miglioramento della sostenibilità del processo.

4.2.2. Descrizione nuovo portalama

Il sistema di fissaggio è stato ripensato per adattarsi alla nuova lama utilizzata, ridurre la massa della struttura e agevolare le operazioni di montaggio e smontaggio del portalama sulla struttura del recoater. Ciò ha portato alla definizione di un nuovo portalama e a modifiche sul corpo centrale per adattarlo al nuovo sistema.

Il portalama risulta formato da due elementi: il primo è mostrato in figura 36 e figura 37, il secondo in figura 38 e figura 39.

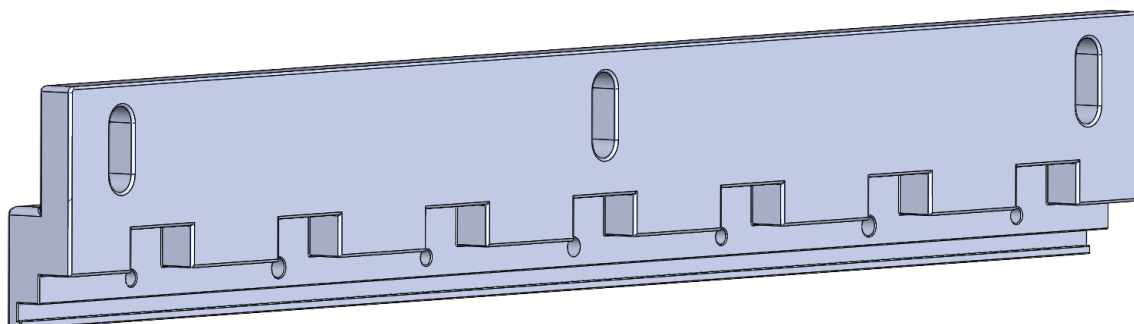


Figura 36 - Elemento 1 portalama (vista da destra)

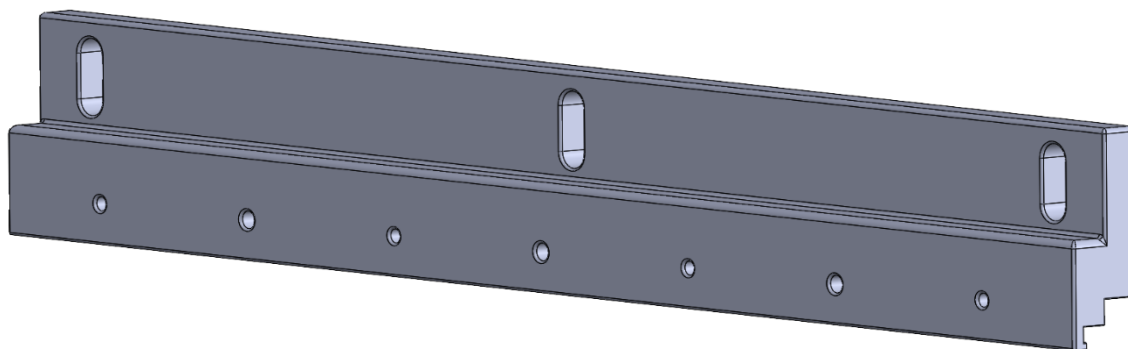


Figura 37 - Elemento 1 portalama (vista da sinistra)

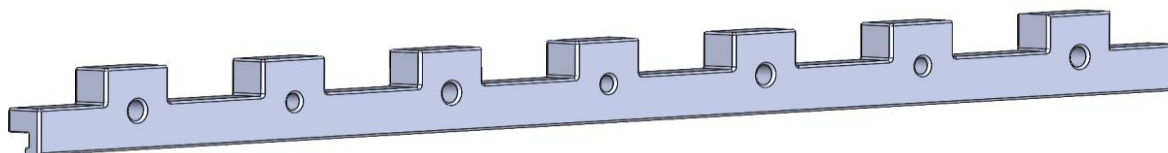


Figura 38 - Elemento 2 portalama (vista da destra)

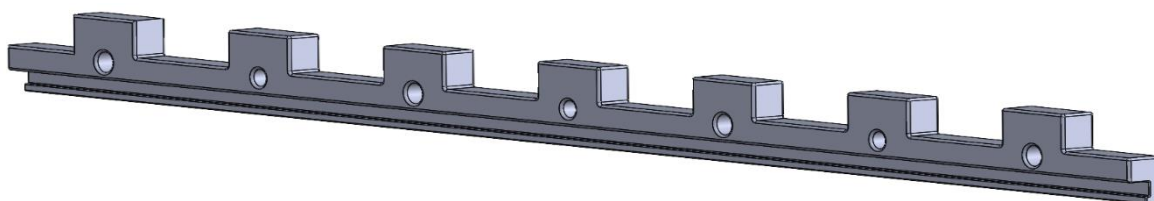


Figura 39 - Elemento 2 portalama (vista da sinistra)

Come detto, il corpo centrale è stato modificato al fine di adattarlo al nuovo portalama. In particolare, si è intervenuti sulla regione che in precedenza andava a contatto con la lama, come mostrato in figura 40.

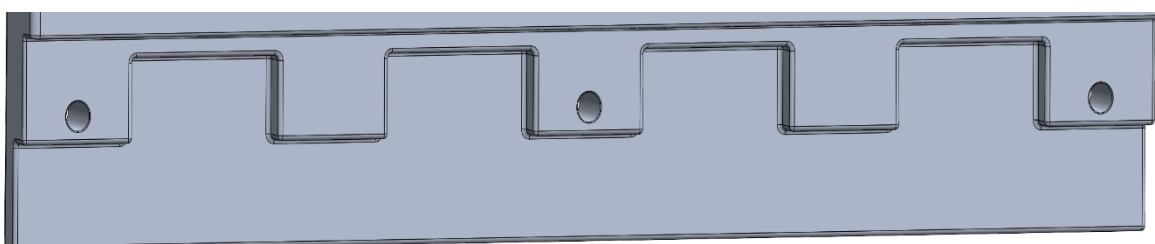


Figura 40 - Modifiche corpo centrale

Gli elementi vengono assemblati come mostrato in figura 41.

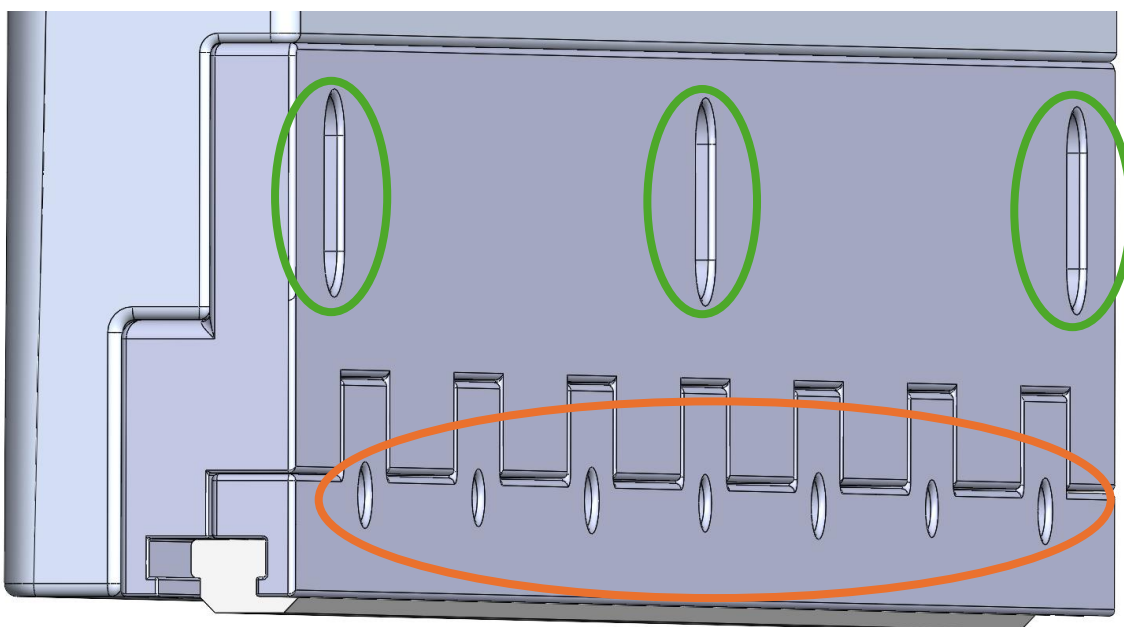


Figura 41 - Portalama

L'elemento 1 e l'elemento 2, una volta accoppiati, formano un vano in cui viene inserita la lama. Mediante collegamenti filettati (tre M4 e quattro M3), i cui fori sono evidenziati in arancione in figura 41, l'elemento 2 viene fissato sull'elemento

1, garantendo così la forza di serraggio necessaria a mantenere la lama in posizione. Nella parte superiore dell'elemento 1 sono inoltre ricavate tre asole, necessarie per fissare il portalama al corpo centrale e regolarne l'altezza rispetto a quest'ultimo.

Come mostrato in figura 40, i fori di accoppiamento M6 nel corpo centrale sono stati ricavati in corrispondenza di tre risalti. Questa scelta è stata adottata per ridurre la massa, evitando di avere un pieno tra i tre fori. Nonostante ciò, sono stati mantenuti due risalti per eventuali problematiche di inflessione del portalama, che potrebbero richiedere ulteriori asole per fissarlo al corpo centrale. Queste asole, e i rispettivi fori sul corpo centrale, potranno essere ricavate successivamente mediante tecniche di asportazione di truciolo.

Un'ulteriore modifica rispetto alla struttura iniziale è visibile in figura 41. Sempre nell'ottica di riduzione della massa, è stato eliminato il blocchetto di acciaio laterale inizialmente presente. Di conseguenza, non è più necessario l'alloggiamento per tale elemento ricavato sul corpo centrale, che è stato quindi rimosso.

In sintesi, la nuova configurazione consente di ottenere un design più compatto rispetto al precedente e una maggiore facilità d'uso. Inoltre, grazie anche alla realizzazione interamente in alluminio, si ottiene una notevole riduzione della massa.

5. Riprogettazione corpo centrale

Prima di procedere all’ottimizzazione topologica del componente, è necessario definire tutte le sue parti funzionali. In questo capitolo verrà trattata la riprogettazione del corpo centrale, escludendo la porzione relativa al fissaggio della lama, già affrontata nel capitolo precedente.

5.1. Necessità della riprogettazione

In seguito all’ottimizzazione topologica, mediante cui si giungerà a definire la geometria finale del componente, si procederà alla realizzazione dello stesso mediante tecnologia PBF-LB/M.

Uno degli elementi più massivi presenti nella struttura originale è la piastra di collegamento che ha una massa di 1,40 kg. Di conseguenza, risulta logico ottimizzare anche tale componente per ottenere una significativa riduzione del peso. Risulterebbe più conveniente sfruttare l’additive manufacturing per realizzare un singolo corpo che includa sia la piastra che il corpo centrale, in modo da ridurre collegamenti filettati e avere una maggiore rigidità.

Tuttavia, la polvere metallica essendo fine, durante la stesura dello strato, in parte volerà andando a inserirsi anche nello spazio tra la struttura metallica e la lama. Per effettuare quindi una completa pulizia, in particolare durante il cambio di materiale per evitare la contaminazione, conviene creare una struttura facilmente smontabile.

5.2. Descrizione modifiche

L’idea alla base della riprogettazione del corpo centrale è quella di realizzare una struttura che massimizzi la rigidità. Per ottenere questo risultato, si cerca di massimizzare la superficie di contatto tra il corpo centrale e la piastra di collegamento e, contemporaneamente, di realizzare un collegamento diretto tra l’estremità dell’alloggiamento del portalama e la zona superiore della piastra, utilizzando una geometria ad arcate. In figura 42 è mostrata una rappresentazione schematica di quanto descritto.

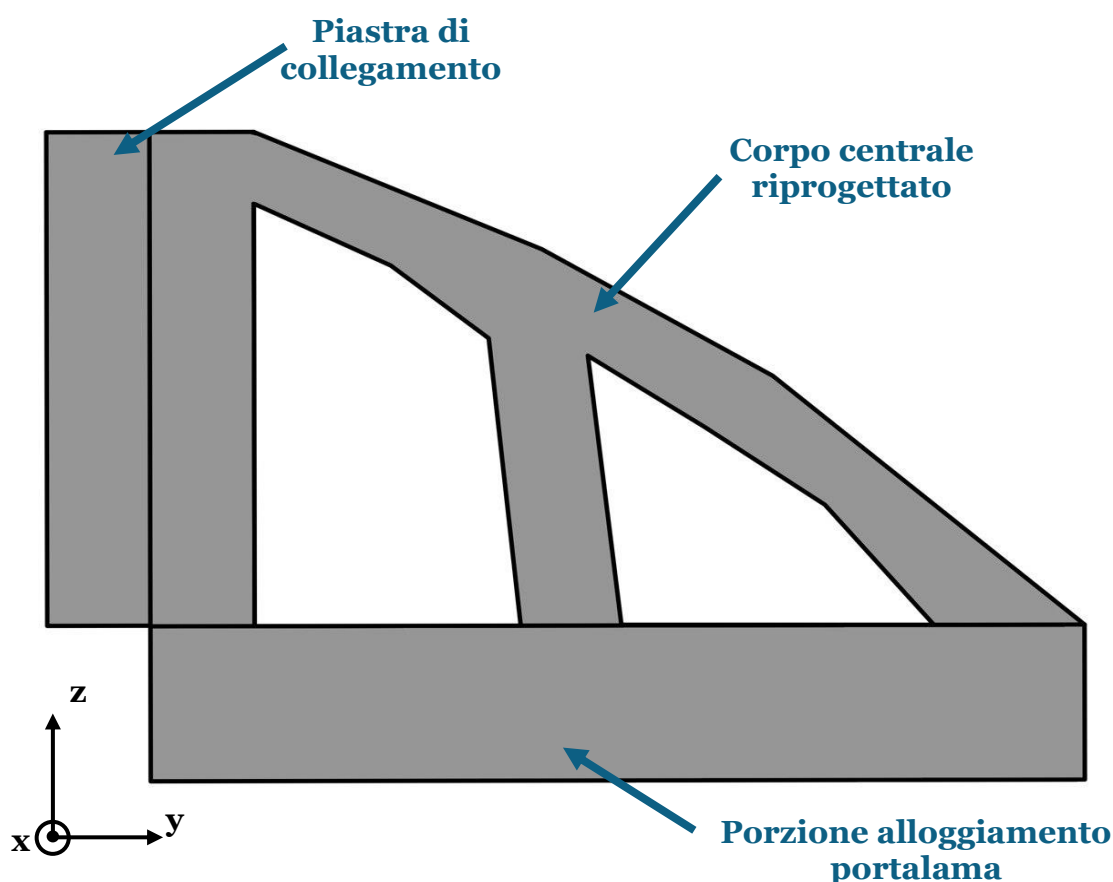


Figura 42 - Idea progettuale

La maggiore estensione del contatto tra il corpo centrale e la piastra di collegamento permette di ridurre le rotazioni intorno all'asse x dovute al momento flettente causato dalla forza peso.

La geometria ad arcate viene utilizzata per massimizzare il braccio resistente per la flessione intorno l'asse z. Per fare ciò è necessario unire la parte a contatto con la piastra con l'estremità opposta. Tuttavia, per evitare di avere una struttura piena (come una sorta di struttura triangolare) che aumenterebbe notevolmente la massa, si ricavano delle strutture ad archi che eliminano tale problematica.

Infine, per quanto riguarda il collegamento tra la piastra e il corpo centrale, su quest'ultimo sono state ricavate quattro flange contenenti un foro per l'alloggiamento di viti filettate M5. Tali fori sono stati ricavati anche nella piastra. Il tutto è rappresentato in figura 43.

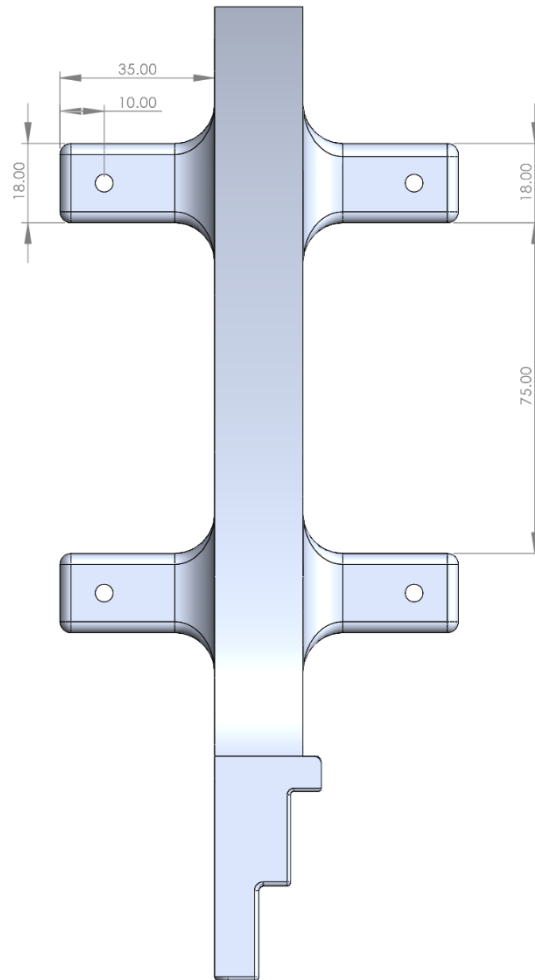


Figura 43 - Struttura riprogettata, vista frontale

6. Ottimizzazione topologica della struttura

6.1. Cenni su ottimizzazione topologica e additive manufacturing

L’ottimizzazione topologica è una tecnica matematica avanzata che permette di determinare la disposizione ideale del materiale all’interno di uno spazio di progettazione definito, con l’obiettivo di massimizzare le prestazioni di un sistema sotto specifici carichi, condizioni al contorno e vincoli. Questo metodo consente di creare strutture con prestazioni superiori, riducendo il peso e migliorando l’efficienza senza compromettere la resistenza o la funzionalità. Diversamente dall’ottimizzazione delle dimensioni e della forma, l’ottimizzazione topologica non dipende dalla configurazione iniziale e offre uno spazio di progettazione più ampio. Per questo motivo, è diventata una tecnica di progettazione strutturale di riferimento per la realizzazione di strutture ad alte prestazioni, leggere e multifunzionali, trovando ampio impiego nei settori aerospaziale, automobilistico, architettonico e altri [58].

Negli ultimi due decenni, l’ottimizzazione topologica orientata alla produzione è stata ampiamente studiata, portando a soluzioni di progettazione quasi ottimali e facilmente producibili. L’AM riduce significativamente le restrizioni di complessità geometrica imposte dall’ottimizzazione topologica nella produzione convenzionale. Questo permette di sfruttare appieno i risultati forniti da dell’ottimizzazione topologica. Inoltre, l’efficienza di produzione e il costo di fabbricazione nell’AM non sono sensibili alla complessità geometrica, permettendo la creazione di progetti a forma libera senza aumentare i costi [59].

In sintesi, l’ottimizzazione topologica combinata con la produzione additiva offre un enorme potenziale per la progettazione e la produzione di componenti avanzati. Questa combinazione permette di superare le limitazioni dei metodi di produzione convenzionali, sfruttando al massimo le capacità di progettazione a forma libera e migliorando le prestazioni strutturali dei componenti.

6.2 Materiale e preparazione modello per l’ottimizzazione topologica

Prima di procedere all’ottimizzazione, è necessario descrivere brevemente alcuni aspetti.

Il materiale scelto per la realizzazione del corpo centrale e della piastrina è una lega di alluminio, specificamente l’AlSi10Mg, una lega comunemente utilizzata per l’additive manufacturing. Nella tabella 3 sono riportate le proprietà di maggiore interesse [60].

Densità ρ [g/cm ³]	Tensione di snervamento σ_s [MPa]	Modulo di Young E [GPa]
2.59	180	70

Tabella 3 - Proprietà AlSi10Mg

Per quanto riguarda l’ottimizzazione topologica, la simulazione viene eseguita nuovamente utilizzando il software Inspire. Fornendo al software il modello CAD su cui eseguire l’ottimizzazione, è necessario indicare le regioni che devono essere soggette alla riduzione di massa e quelle che devono restare inalterate.

6.3. Ottimizzazione preliminare

Come prima analisi, si è scelto di utilizzare una struttura piena, come mostrato in figura 44.

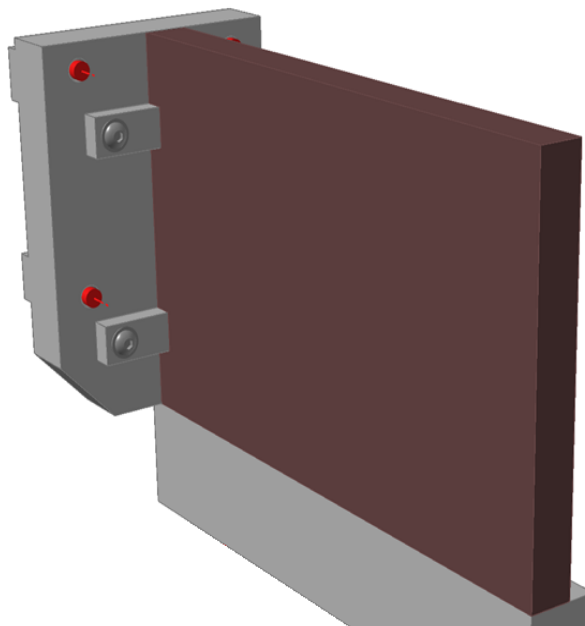


Figura 44 - Cad ottimizzazione preliminare

In questo modo, è possibile identificare le regioni in cui il software ritiene sia più necessario posizionare il materiale. Questo passaggio è di particolare importanza poiché sarà necessario integrare l’idea progettuale precedentemente descritta con le indicazioni fornite dal software in assenza di vincoli progettuali.

Sempre in figura 44, è possibile distinguere le aree di lavoro, rappresentate in marrone, dalle aree in grigio e i collegamenti filettati che fissano il corpo centrale alla piastra posteriore.

I risultati dell’analisi sono rappresentati in figura 45.

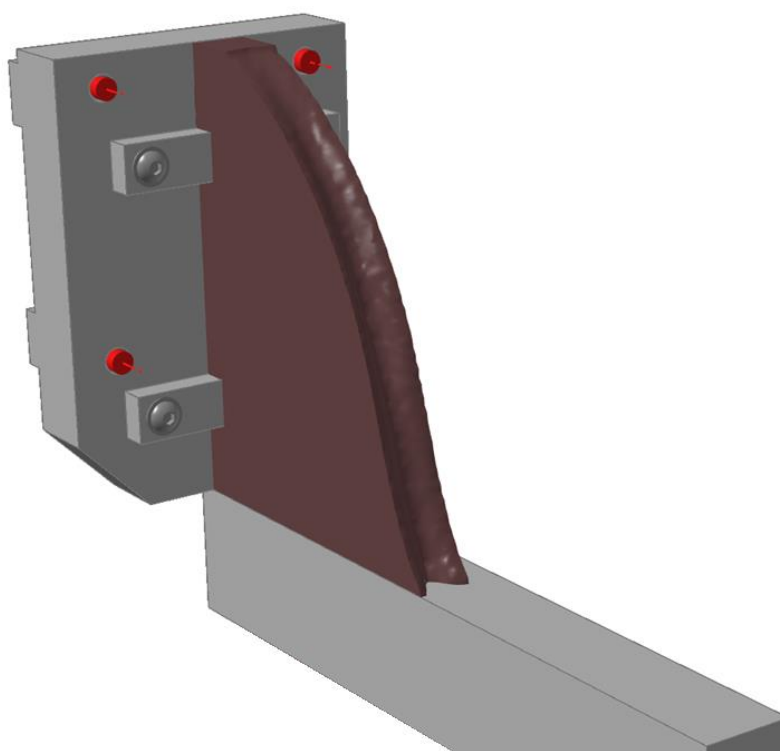


Figura 45 - Risultati ottimizzazione preliminare

È possibile notare come tutto il materiale si addossi nella zona più prossima alla piastra posteriore, comportando una distribuzione non omogenea del materiale. Si osserva inoltre una distribuzione pressoché simmetrica del materiale. Questi due aspetti saranno tenuti in considerazione nella realizzazione delle successive analisi.

6.4. Analisi di ottimizzazione

A partire dai risultati della prima simulazione, si è proceduto a realizzare nuove analisi utilizzando non più una struttura piena, ma modelli CAD con una struttura

ad arcate. Si procede infatti con un processo iterativo, modificando di volta in volta il modello CAD di partenza in funzione dei risultati ottenuti a ogni step. La geometria è stata semplificata il più possibile, evitando di aggiungere dettagli particolari. Questo approccio riduce il tempo di simulazione. Eventuali dettagli necessari saranno aggiunti a valle della simulazione, durante la fase di creazione del modello CAD.

6.4.1. Tre arcate

Il punto di partenza adottato per l’ottimizzazione della struttura è mostrato in figura 46.

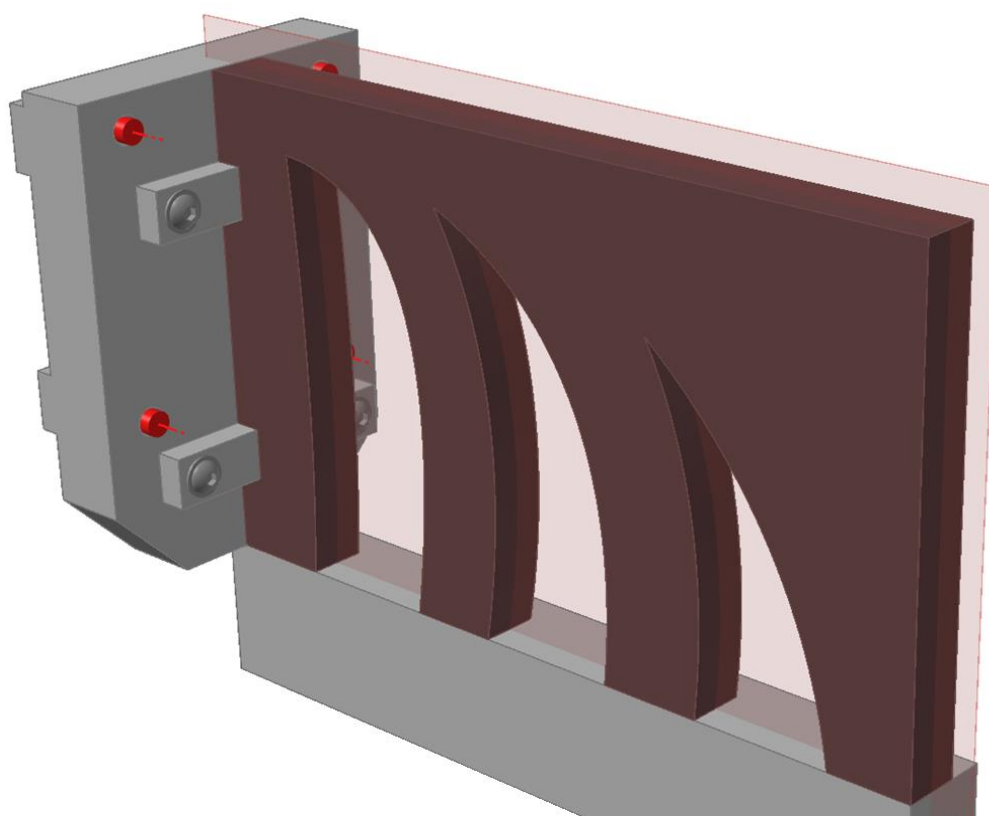


Figura 46 - Cad struttura tre arcate

Rispetto ai risultati forniti dalla prima simulazione, la quantità di materiale a ridosso della piastra è stata ridotta grazie all’introduzione di tre cavità. In questo modo, si ottiene una struttura ad arcate che permette di ridistribuire il materiale, precedentemente concentrato in una singola zona, in maniera più uniforme lungo tutta la lunghezza del corpo. Inoltre, è stato mantenuto il contatto lungo tutta l’altezza tra il corpo centrale e la piastra. In figura 46 è anche evidenziato un piano

in rosso, che funge da piano di simmetria, così come indicato dai risultati della prima simulazione.

Di seguito in figura 47 sono rappresentati i risultati dell’ottimizzazione.

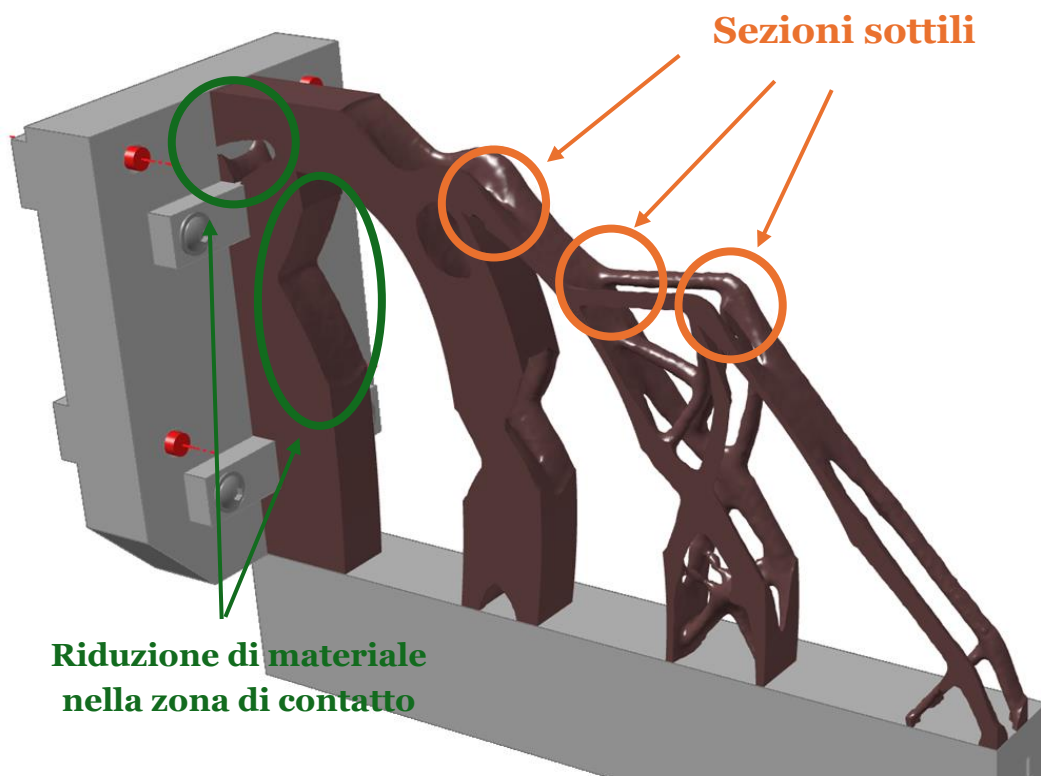


Figura 47 - Risultati ottimizzazione con tre arcate

È evidente come, a partire dal CAD fornito, si riesca ad ottenere la struttura ad arcate desiderata. Tuttavia, tale struttura presenta due problematiche: le sezioni di collegamento tra un’arcata e la successiva risultano eccessivamente sottili e il materiale in prossimità della piastra risulta eccessivamente ridotto rispetto a quanto indicato dalla prima simulazione.

Il modello ottenuto è stato convertito in CAD per condurre un’analisi FEM, al fine di avere un’indicazione qualitativa di massima sulle deformazioni che si ottengono. I risultati sono rappresentati in figura 48.

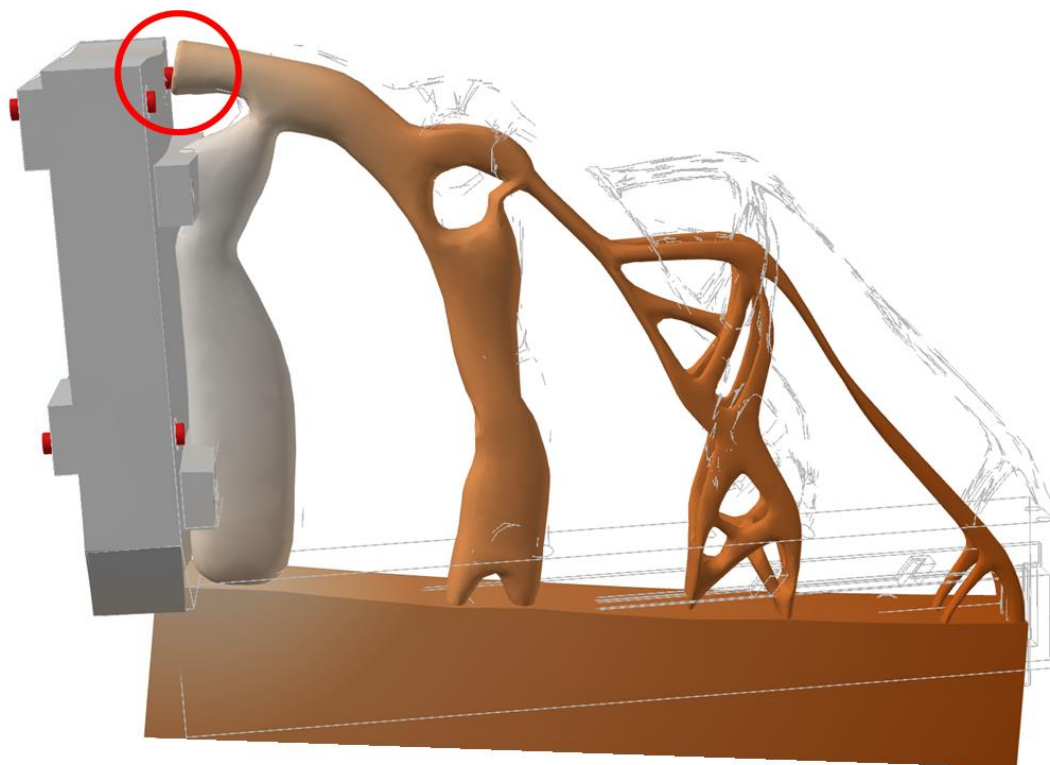


Figura 48 - Deformazioni con tre arcate

Come evidenziato dai risultati, risulta conveniente aggiungere un quinto collegamento filettato tra corpo e piastra in corrispondenza della zona evidenziata in rosso. In tal modo si evita lo scostamento che si verifica al momento, aumentando la rigidezza e diminuendo le deformazioni.

6.4.2 Due arcate

Per risolvere le problematiche riscontrate con l'utilizzo di tre arcate, il modello CAD è stato modificato di conseguenza.

Sono ora presenti due sole cavità, al fine di aumentare lo spessore delle sezioni di collegamento tra arcate successive. Questo consente anche di mantenere una maggiore quantità di materiale nella zona di contatto con la piastra.

Inoltre, è stato aggiunto un quinto collegamento filettato tra il corpo centrale e la piastra per prevenire il distacco tra i due componenti nella zona apicale.

Tali modifiche sono mostrate in figura 49.

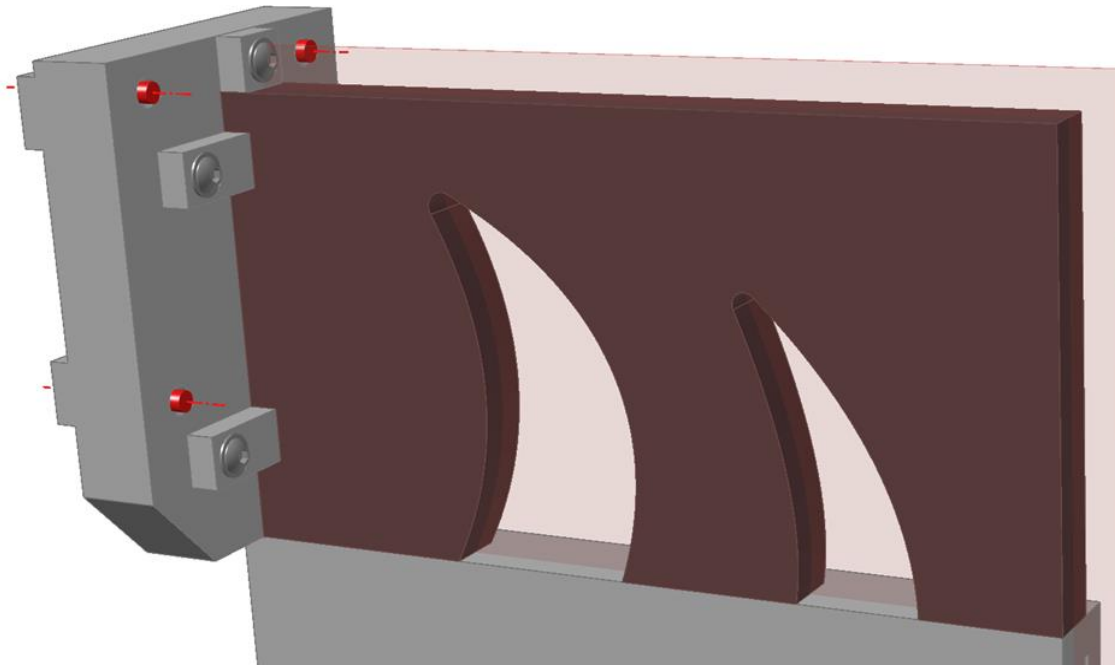


Figura 49 - Cad struttura due arcate

I risultati dell'ottimizzazione sono rappresentati in figura 50.

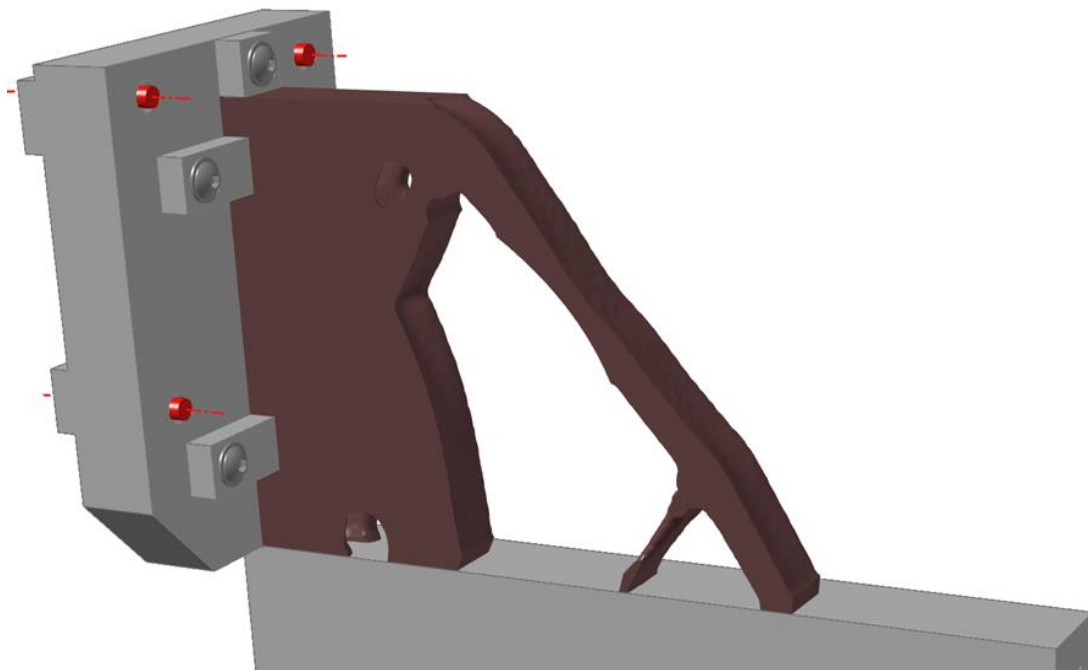


Figura 50 - Risultati ottimizzazione con due arcate

Dai risultati emerge che la scelta di utilizzare due arcate sia stata vantaggiosa, ma ha introdotto una nuova problematica.

Sono stati risolti i problemi relativi allo spessore nella zona di unione tra due arcate e alla quantità ridotta di materiale in corrispondenza della zona a contatto con la piastra. Tuttavia, con tale geometria non è più possibile ottenere una struttura che raggiunga la zona più estrema del corpo. Si ottiene una singola arcata che raggiunge solo la mezziera della zona di alloggiamento della lama, e da quel punto in poi tutto il materiale viene eliminato.

Per verificare l'efficacia dell'introduzione del quinto collegamento filettato, è stata condotta nuovamente un'analisi FEM. Dai risultati, illustrati in figura 51, emerge chiaramente che non è più presente alcuno scostamento tra la piastra e il corpo centrale.

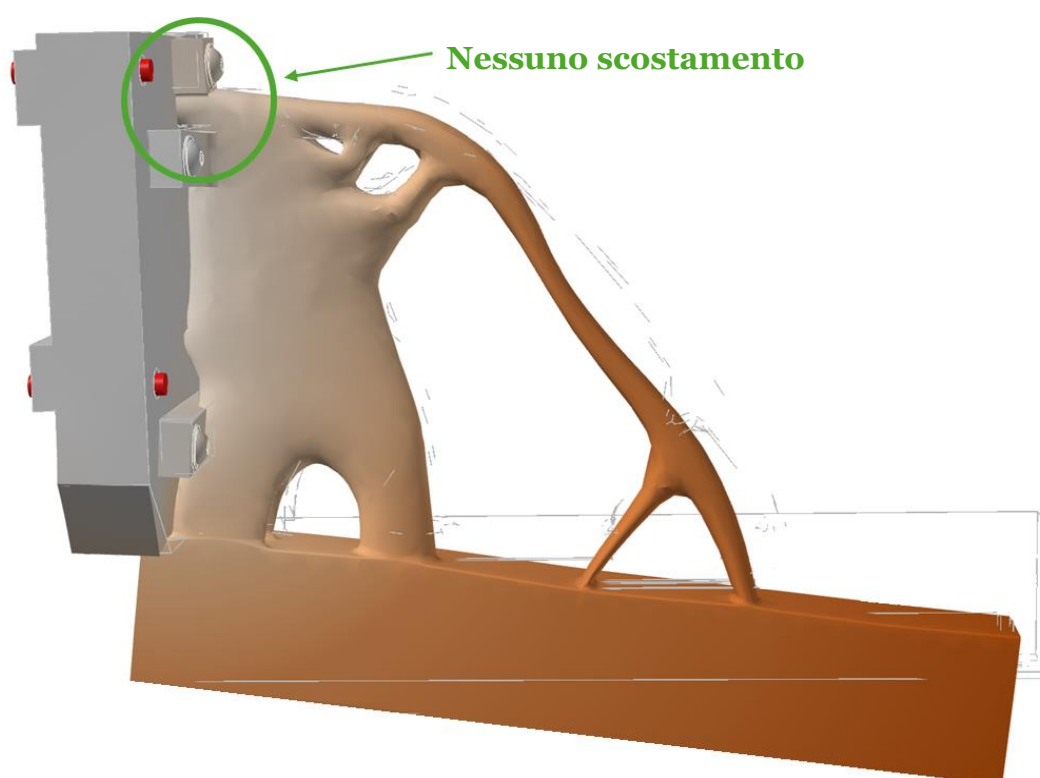


Figura 51 - Deformazioni con due arcate

6.4.3. Singola arcata

Un'ulteriore modifica al CAD è stata realizzata per risolvere il nuovo problema emerso con le due arcate. La geometria di partenza presenta adesso una singola cavità.

Infatti, sia partendo dalla geometria con due cavità che con una, si otterrà comunque una singola arcata. Tuttavia, in questo modo, si riesce ad ottenere un collegamento diretto tra la zona apicale della struttura e l'estremità opposta, come previsto in fase progettuale.

Infine, il quinto collegamento filettato introdotto nel precedente step è stato mantenuto.

Quanto detto è mostrato in figura 52.

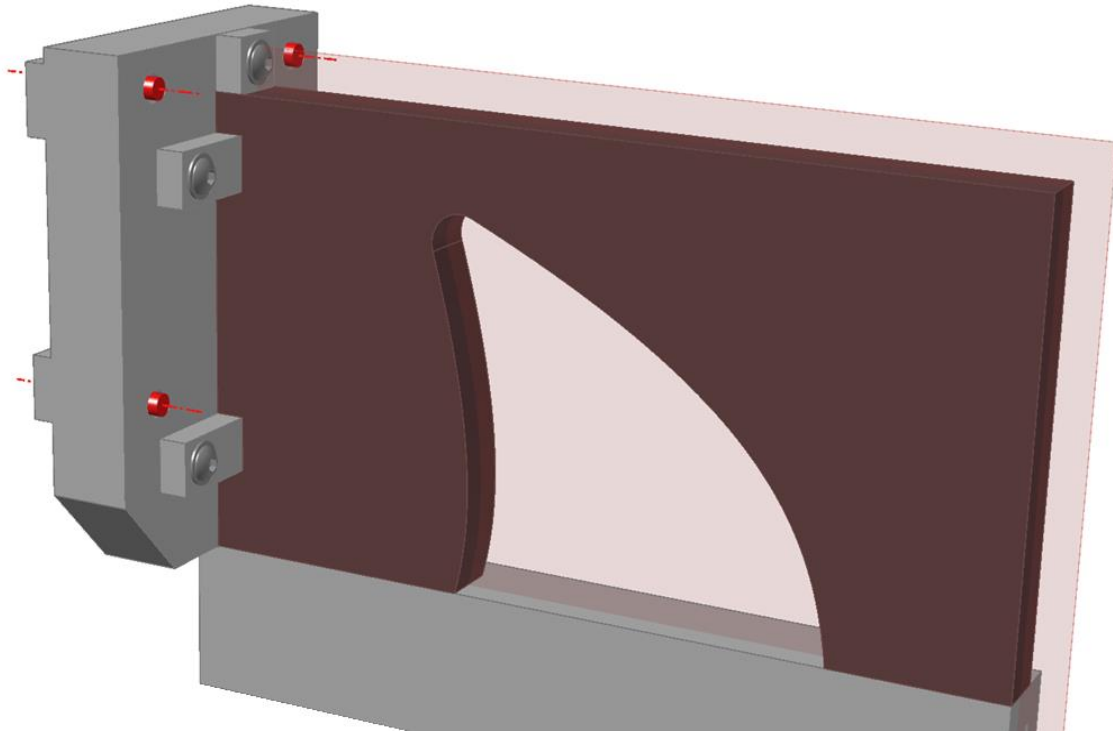


Figura 52 - Cad struttura a singola arcata

Procedendo all’ottimizzazione della struttura si ottengono i risultati mostrati in figura 53.

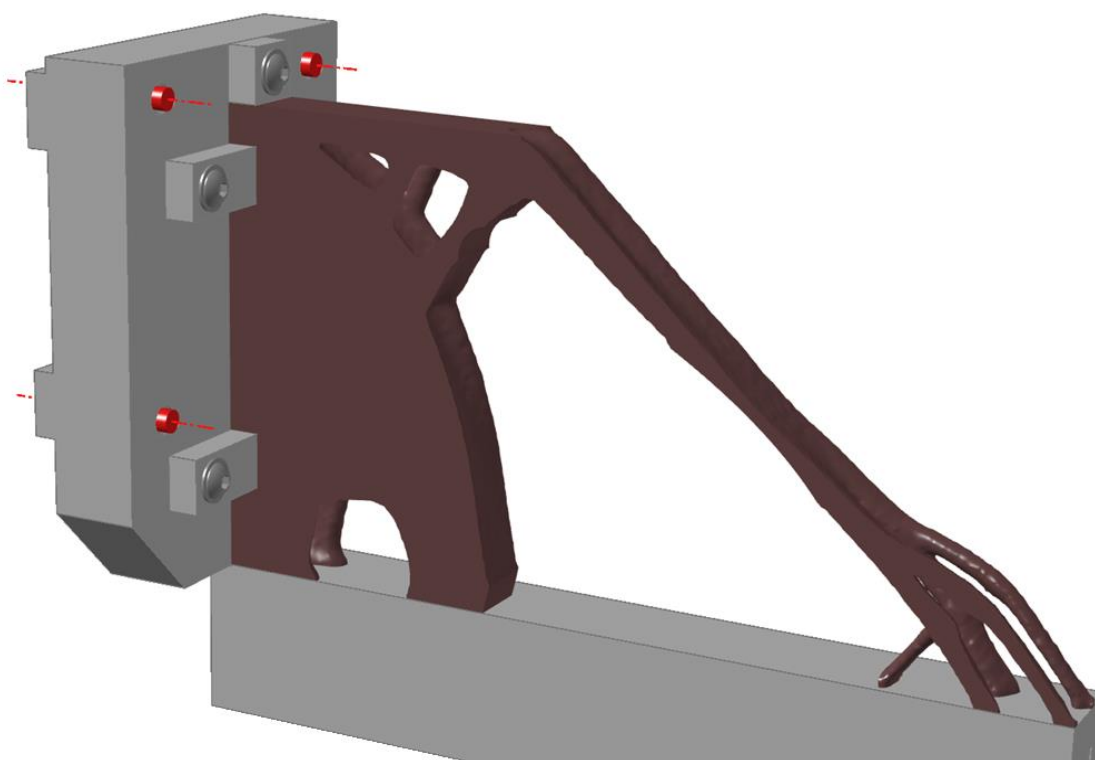


Figura 53 - Risultati ottimizzazione con singola arcata

Tale geometria di partenza permette quindi di ovviare a tutte le problematiche insorte. Si riesce infatti ad avere una buona quantità di materiale nella zona in prossimità della piastra, garantendo un contatto uniforme lungo tutta l'altezza. Inoltre, si ha anche un collegamento diretto tra la zona apicale della struttura e l'estremità opposta della zona dell'alloggiamento della lama.

Tali risultati sono ritenuti soddisfacenti, pertanto si procede adesso con gli step successivi per definire il componente.

6.5. Creazione CAD

Facendo riferimento ai risultati ottenuti dall'ultima simulazione di ottimizzazione, è ora necessario definire la struttura del componente. Non è possibile semplicemente convertire la struttura ottimizzata in un modello CAD. Al contrario, è essenziale modificare i risultati per adattarli a diverse esigenze tecniche. Tra queste:

- Eliminare punti angolosi e ottenere geometrie raccordate per evitare concentrazioni di stress;
- Ridurre le geometrie che richiedono supporti durante la stampa per ottimizzare il processo di produzione;

- Adattare e/o eliminare le zone che ostacolano la rimozione della polvere o dei supporti;
- Adattare la geometria alle specifiche funzionali e operative del componente.

Seguendo tali principi, è stata modellata la struttura mostrata in figura 54 e in figura 55.

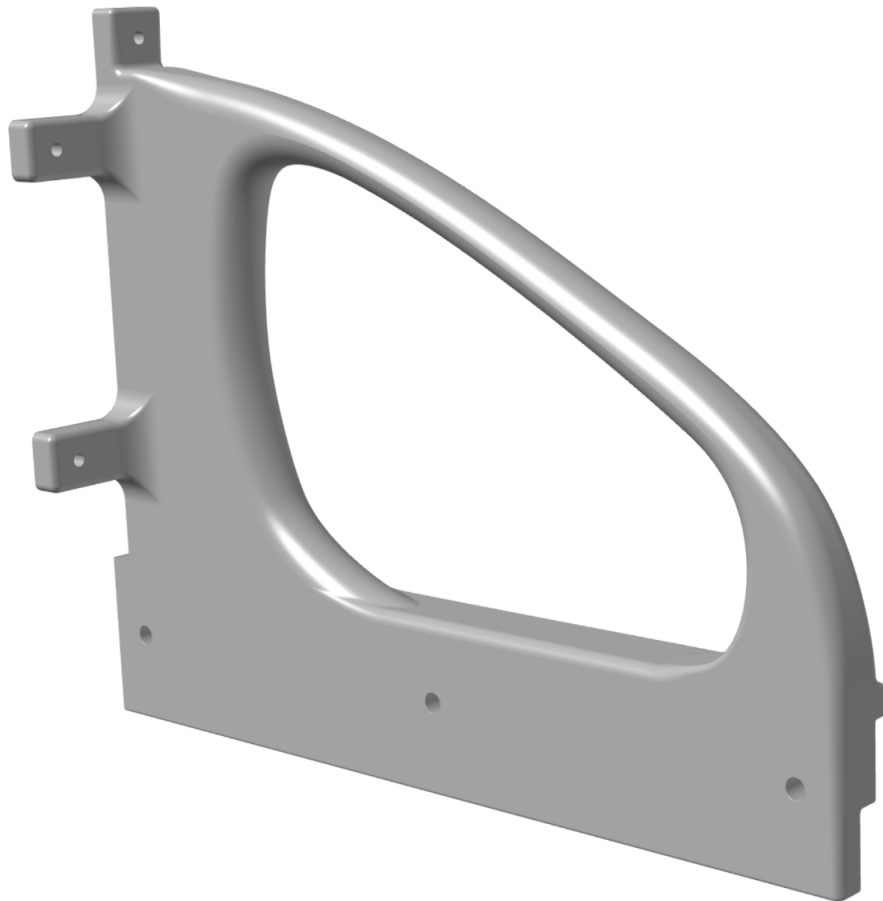


Figura 54 - Struttura finale, vista da sinistra

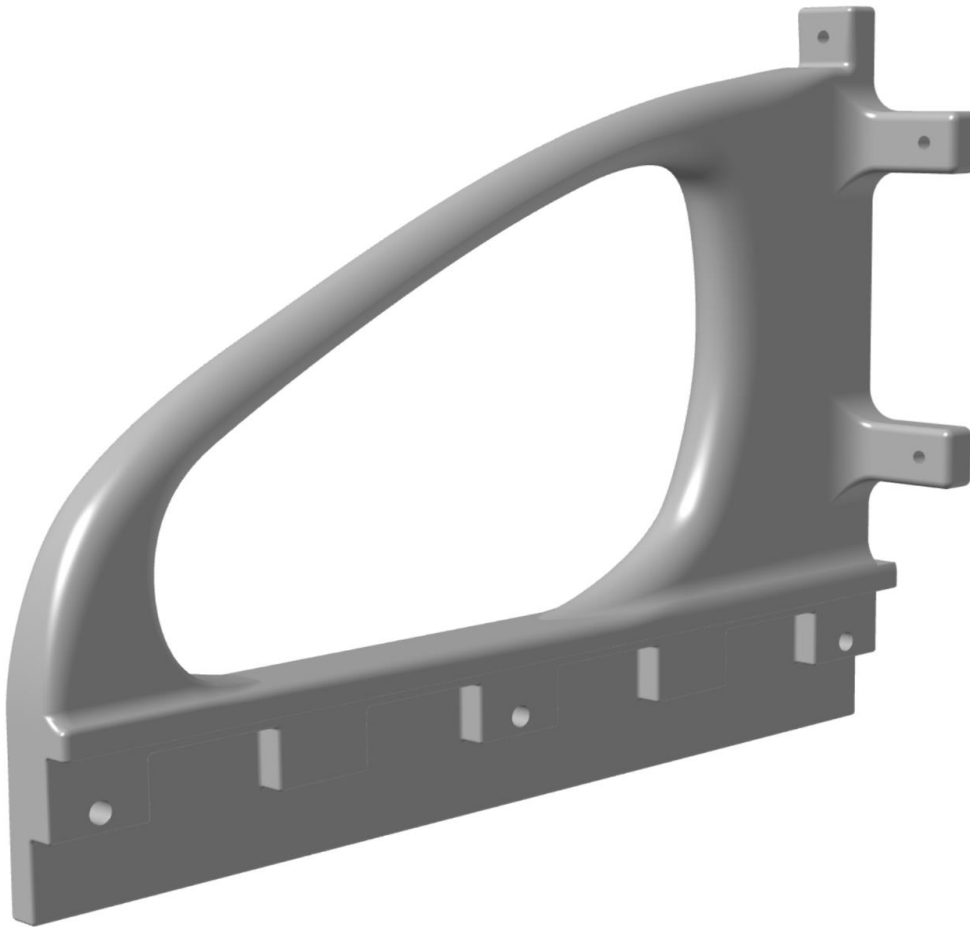


Figura 55 - Struttura finale, vista da destra

Per evidenziare le differenze tra i risultati dell’ottimizzazione e il CAD modellato, in figura 56 vengono confrontate le due versioni, mettendo in risalto le modifiche apportate.

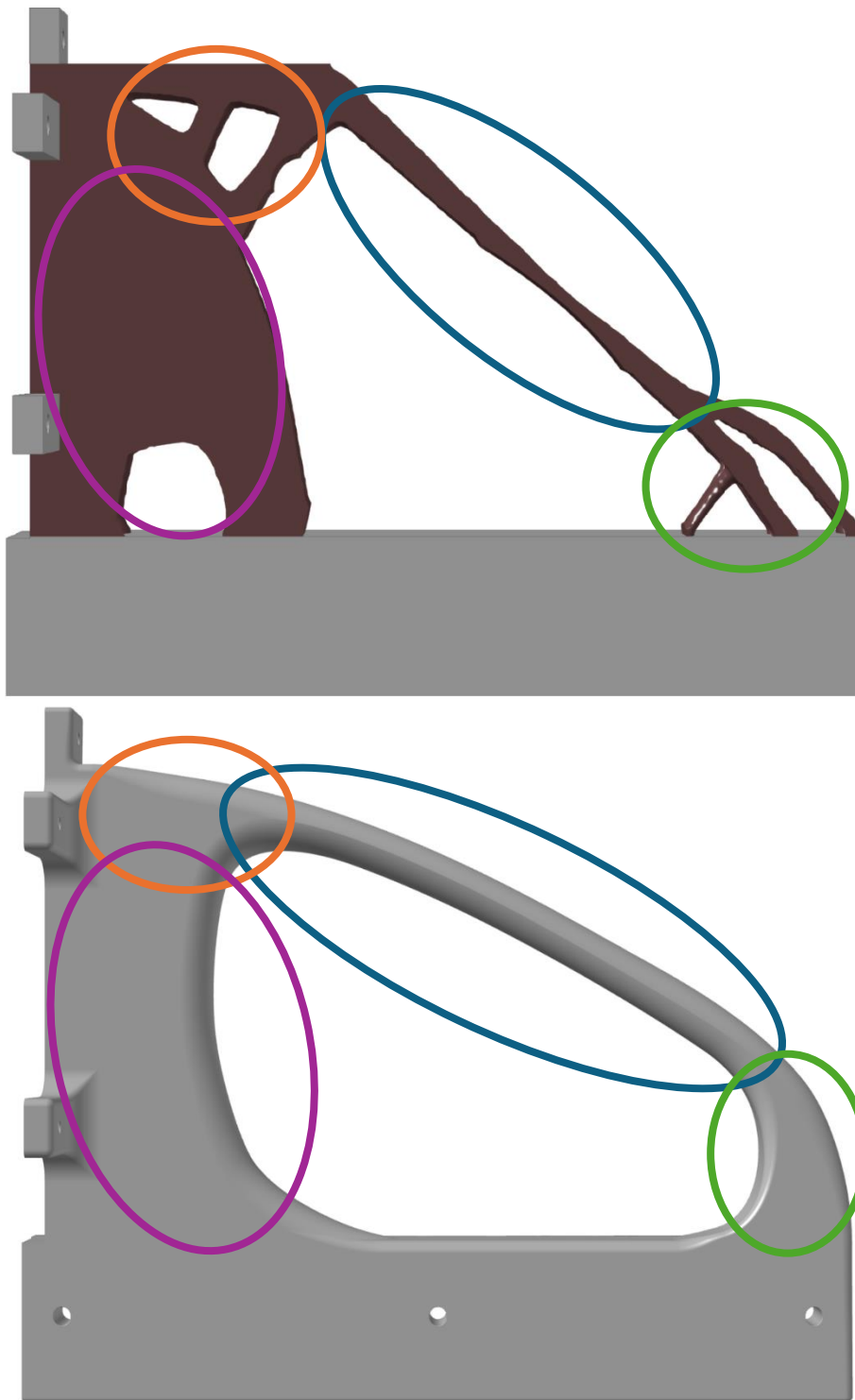


Figura 56 - Confronto risultati ottimizzazione-CAD definitivo

Con riferimento alla figura 56, si analizzano le principali modifiche apportate:

- Nella zona apicale, evidenziata in arancione, sono stati eliminati i due fori. Questa modifica evita l'uso di supporti durante la stampa, il che è

vantaggioso sia per il risparmio di materiale sia per la riduzione delle problematiche legate alla rimozione dei supporti.

- Poiché i fori sono stati rimossi, il braccio centrale, evidenziato in blu, è stato riadattato. La parte orizzontale è stata convertita in una forma più raccordata e priva di spigolosità. Inoltre, considerando che la struttura viene afferrata proprio dal braccio quando viene maneggiata da un operatore, è stato inspessito per renderlo più resistente.
- La zona estrema del braccio, evidenziata in verde, è stata modificata eliminando la struttura colonnare e sostituendola con un pieno. Nella simulazione di ottimizzazione è stato infatti considerato unicamente l'attrito con il letto di polvere. Tuttavia, come descritto in letteratura [29], [43], [44], [45], a causa del fenomeno della “super elevazione”, porzioni di materiale solidificato possono sollevarsi e posizionarsi al di sopra del letto di polvere. Tale condizione determina urti con la lama o con la struttura del recoater.

Alcune macchine PBF/LB-M sono dotate di sensori di forza per monitorare l'avanzamento del recoater. In tal modo, è possibile rilevare variazioni nella forza necessaria alla movimentazione del recoater, che potrebbero indicare irregolarità nel letto di polvere o ostruzioni (come la ‘super elevazione’). In casi estremi, il sistema di controllo interrompe il processo di stampa, richiedendo interventi manuali per correggere il problema. La macchina in considerazione, tuttavia, non è dotata di tale sensore di forza. Di conseguenza, nel caso in cui il recoater dovesse entrare a contatto con una porzione della parte in costruzione, cercherà comunque di avanzare, venendo bloccato. Tale condizione può innescare vibrazioni che potrebbero essere amplificate proprio dalla geometria risultante dall'ottimizzatore. Per tale motivo è stata effettuata la variazione di geometria descritta.

- Nella zona alla radice, evidenziata in viola, il foro è stato eliminato per gli stessi motivi dei fori nella zona arancione. Questa porzione è stata meglio raccordata alla parte inferiore della struttura e modellata in modo da ottenere una forma più regolare e smussata.

6.6. Risultati finali

Definita la struttura, si passa ora ad analizzare i risultati ottenuti.

Cominciando dalla massa, si è avuto un netto miglioramento rispetto alla struttura originale. La porzione che è stata riprogettata comprende il corpo centrale, l'elemento laterale e il blocchetto, i quali sono stati sostituiti con la nuova struttura e il nuovo portalama. La tabella 4 riporta la massa di ogni elemento.

Struttura originale		Post riprogettazione	
Corpo centrale	0.92 kg	Nuova struttura	1.31kg
Elemento laterale	1.74 kg	Elemento 1 portalama	0.25 kg
Blocchetto	0.81 kg	Elemento 2 portalama	0.05 kg
Totale	3.47 kg	Totale	1.61 kg

Tabella 4 - Confronto massa elementi

Trascurando la piastra posteriore di fissaggio, che non è stata oggetto di riprogettazione, si è passati dai 3.47 *kg* iniziali ai 1.61 *kg* finali, con una riduzione di massa di quasi il 54%.

Si procede adesso ad analizzare le deformazioni della struttura. Eseguendo un’analisi FEM sulla nuova struttura riprogettata si ottengono i risultati evidenziati in figura 57.

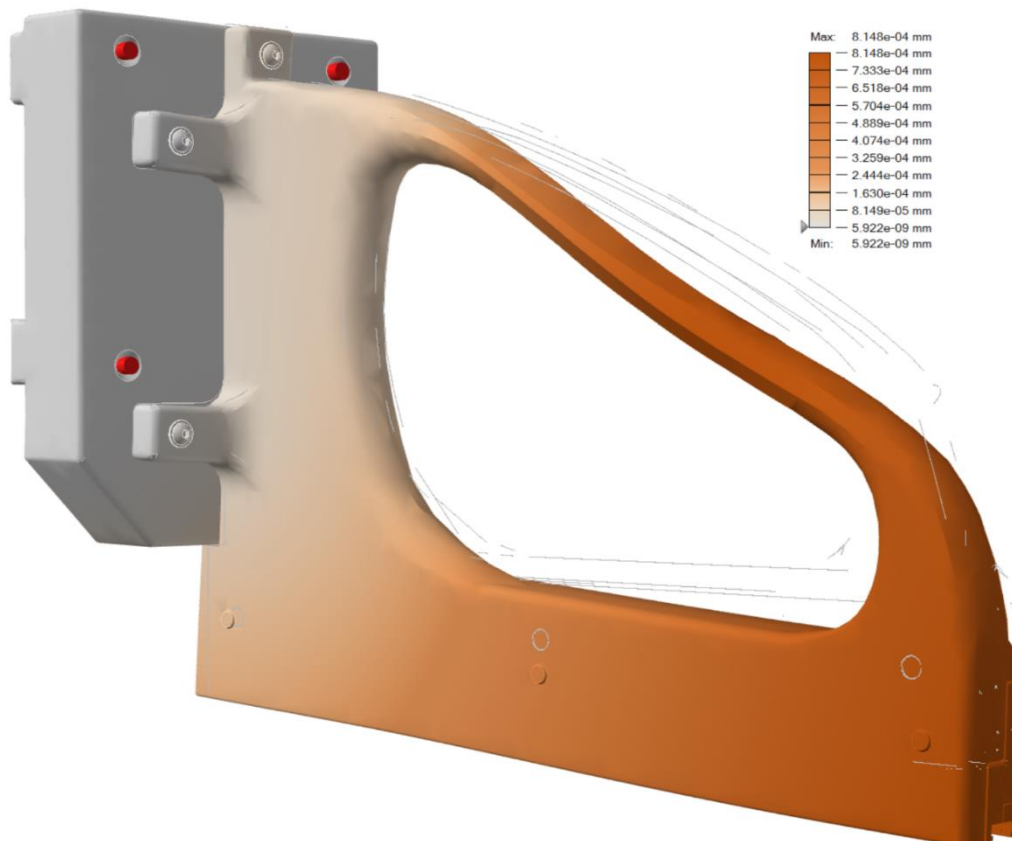


Figura 57 - Spostamenti struttura

L’inflessione massima che presenta la struttura è di $8.148 \times 10^{-4} \text{ mm}$, a fronte dei $2.012 \times 10^{-2} \text{ mm}$ della struttura originale. Si è dunque avuta una riduzione di due

ordini di grandezza, pari a quasi il 96%. Tale risultato è stato reso possibile sia dall'importante riduzione della massa, sia da un design della struttura che permette di ottimizzare e massimizzare la rigidezza.

Un altro aspetto emerso durante l'analisi preliminare, seppur di secondaria importanza, era legato alla deformazione asimmetrica della struttura osservata da una vista frontale. La struttura si deformava in maniera evidente nel verso opposto rispetto alla direzione di applicazione della forza resistente. Il nuovo design della struttura riduce significativamente questo fenomeno. Grazie alla distribuzione simmetrica del materiale, si osserva solo una minima deformazione, totalmente trascurabile, nella stessa direzione di applicazione della forza resistente, come evidenziato in figura 58.

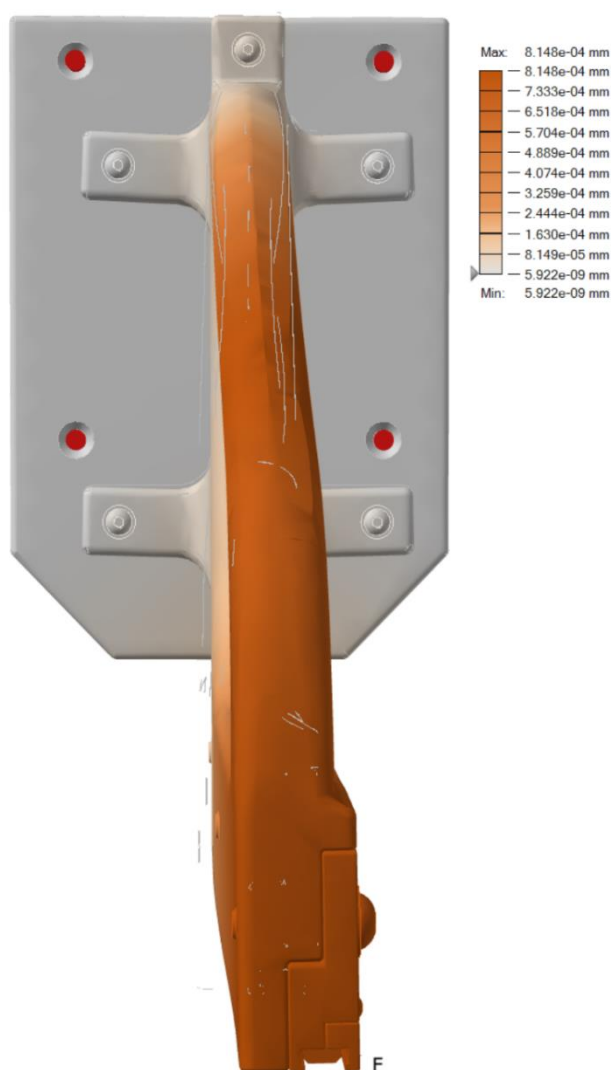


Figura 58 - Spostamenti struttura, vista frontale

7. Conclusioni

Il lavoro di questa tesi si è concentrato sulla riprogettazione del recoater blade di una macchina PBF-LB/M, affrontando diversi problemi di progettazione che influivano negativamente sulla qualità dei pezzi realizzati. In particolare, la polvere metallica si infilava all’interno della slitta, creando attrito intorno ai microinterruttori, e l’eccessivo peso del recoater peggiorava il problema. Inoltre, durante la stesura della polvere, la forza di attrito tra la lama e gli strati fusi generava vibrazioni che si ripercuotevano sull’intero sistema, portando a una stesura non corretta della polvere e, di conseguenza, a difettosità nei pezzi realizzati.

Per affrontare questi problemi, è stato seguito un approccio suddiviso in due fasi principali:

1. Analisi preliminare:

- È stata determinata la capacità del motore lineare di sorreggere e movimentare il recoater.
- È stata condotta un’analisi agli elementi finiti (FEM) per valutare le deformazioni strutturali sotto carico, rivelando che il peso eccessivo della struttura causava un’eccessiva inflessione, direttamente collegata alle vibrazioni osservate.

2. Riprogettazione della struttura:

- Utilizzando tecniche di ottimizzazione topologica, sono state identificate le aree ottimali in cui disporre il materiale.
- La nuova struttura è stata progettata per rispondere a varie esigenze tecniche e funzionali, nonché per essere idonea sia alla produzione con tecnologie tradizionali ad asportazione di truciolo, sia con tecnologie di additive manufacturing, riducendo così il materiale di scarto.

I risultati ottenuti sono stati significativi: la nuova struttura è risultata molto più leggera e rigida rispetto all’originale, con una riduzione della massa di circa il 54% e delle inflessioni di circa il 96%. Questi miglioramenti hanno portato a una maggiore stabilità del recoater, riducendo le vibrazioni durante l’esercizio e migliorando significativamente la qualità del processo di copertura della polvere. Inoltre, il nuovo design ha permesso di migliorare anche la facilità d’uso del portalama, semplificando sia l’inserimento che la rimozione della lama.

Come messo in evidenza dai risultati intermedi ottenuti con le simulazioni di ottimizzazione topologica, nonostante questa tecnica produca spesso design più

accattivanti e in linea con l’idea di “additive manufacturing”, non sempre questi sono la scelta ottimale. In molti casi, come quello in analisi, è necessario adottare design più convenzionali per garantire la funzionalità del prodotto.

Un possibile miglioramento del lavoro svolto potrebbe essere ottenuto svolgendo una campagna sperimentale preliminare per determinare la frequenza e l’ampiezza delle vibrazioni. In tal modo, sarebbe possibile ottimizzare la struttura anche in funzione di tale parametro.

In conclusione, la riprogettazione del recoater blade ha portato a significativi miglioramenti in termini di stabilità e qualità del processo di stesura della polvere. Inoltre, questo lavoro contribuisce a una maggiore sostenibilità del processo di produzione e, parallelamente, offre spunti per lavori futuri.

Bibliografia

- [1] 3D Systems, «3D Systems storia». [Online]. Disponibile su: <https://it.3dsystems.com/our-story>
- [2] J.-P. Kruth, M. C. Leu, e T. Nakagawa, «Progress in Additive Manufacturing and Rapid Prototyping», *CIRP Ann.*, vol. 47, fasc. 2, pp. 525–540, gen. 1998, doi: 10.1016/S0007-8506(07)63240-5.
- [3] M. Jiménez, L. Romero, I. A. Domínguez, M. del M. Espinosa, e M. Domínguez, «Additive Manufacturing Technologies: An Overview about 3D Printing Methods and Future Prospects», *Complexity*, vol. 2019, fasc. 1, p. 9656938, 2019, doi: <https://doi.org/10.1155/2019/9656938>.
- [4] K. V. Wong e A. Hernandez, «A Review of Additive Manufacturing», *Int. Sch. Res. Not.*, vol. 2012, fasc. 1, p. 208760, 2012, doi: <https://doi.org/10.5402/2012/208760>.
- [5] F. Calignano, «Investigation of the accuracy and roughness in the laser powder bed fusion process», *Virtual Phys. Prototyp.*, vol. 13, fasc. 2, pp. 97–104, 2018, doi: 10.1080/17452759.2018.1426368.
- [6] W. Zha e S. Anand, «Geometric approaches to input file modification for part quality improvement in additive manufacturing», *J. Manuf. Process.*, vol. 20, pp. 465–477, 2015, doi: <https://doi.org/10.1016/j.jmapro.2015.06.021>.
- [7] F. Calignano *et al.*, «Investigation of accuracy and dimensional limits of part produced in aluminum alloy by selective laser melting», *Int. J. Adv. Manuf. Technol.*, vol. 88, fasc. 1, pp. 451–458, gen. 2017, doi: 10.1007/s00170-016-8788-9.
- [8] K. S. Prakash, T. Nancharaih, e V. V. S. Rao, «Additive Manufacturing Techniques in Manufacturing -An Overview», *Mater. Today Proc.*, vol. 5, fasc. 2, Part 1, pp. 3873–3882, 2018, doi: <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2017.11.642>.
- [9] Stavropoulos, Panagiotis e Foteinopoulos, Panagis, «Modelling of additive manufacturing processes: a review and classification», *Manuf. Rev.*, vol. 5, p. 2, 2018, doi: 10.1051/mfreview/2017014.
- [10] F. Zhang *et al.*, «The recent development of vat photopolymerization: A review», *Addit. Manuf.*, vol. 48, p. 102423, 2021, doi: <https://doi.org/10.1016/j.addma.2021.102423>.
- [11] M. Pagac *et al.*, «A Review of Vat Photopolymerization Technology: Materials, Applications, Challenges, and Future Trends of 3D Printing», *Polymers*, vol. 13, fasc. 4, 2021, doi: 10.3390/polym13040598.

- [12] D. D. Singh, T. Mahender, e A. R. Reddy, «Powder bed fusion process: A brief review», *Mater. Today Proc.*, vol. 46, pp. 350–355, 2021, doi: <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2020.08.415>.
- [13] D.-G. Ahn, «Directed Energy Deposition (DED) Process: State of the Art», *Int. J. Precis. Eng. Manuf.-Green Technol.*, vol. 8, fasc. 2, pp. 703–742, mar. 2021, doi: [10.1007/s40684-020-00302-7](https://doi.org/10.1007/s40684-020-00302-7).
- [14] A. Mostafaei *et al.*, «Binder jet 3D printing—Process parameters, materials, properties, modeling, and challenges», *Prog. Mater. Sci.*, vol. 119, p. 100707, 2021, doi: <https://doi.org/10.1016/j.pmatsci.2020.100707>.
- [15] I. J. Solomon, P. Sevel, e J. Gunasekaran, «A review on the various processing parameters in FDM», *Mater. Today Proc.*, vol. 37, pp. 509–514, 2021, doi: <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2020.05.484>.
- [16] O. Gülcan, K. Günaydın, e A. Tamer, «The State of the Art of Material Jetting—A Critical Review», *Polymers*, vol. 13, fasc. 16, 2021, doi: [10.3390/polym13162829](https://doi.org/10.3390/polym13162829).
- [17] I. Gibson, D. Rosen, e B. Stucker, «Sheet Lamination Processes», in *Additive Manufacturing Technologies: 3D Printing, Rapid Prototyping, and Direct Digital Manufacturing*, New York, NY: Springer New York, 2015, pp. 219–244. doi: [10.1007/978-1-4939-2113-3_9](https://doi.org/10.1007/978-1-4939-2113-3_9).
- [18] A. ISO, «ISO/ASTM 52900: 2015 additive manufacturing—general principles—terminology», *ASTM F2792-10e1*, vol. 1, pp. 1–19, 2015.
- [19] F. Huber, M. Rasch, e M. Schmidt, «Laser Powder Bed Fusion (PBF-LB/M) Process Strategies for In-Situ Alloy Formation with High-Melting Elements», *Metals*, vol. 11, fasc. 2, 2021, doi: [10.3390/met11020336](https://doi.org/10.3390/met11020336).
- [20] E. Fereiduni, A. Ghasemi, e M. Elbestawi, «Selective Laser Melting of Aluminum and Titanium Matrix Composites: Recent Progress and Potential Applications in the Aerospace Industry», *Aerospace*, vol. 7, fasc. 6, 2020, doi: [10.3390/aerospace7060077](https://doi.org/10.3390/aerospace7060077).
- [21] J. C. Vasco, «Chapter 16 - Additive manufacturing for the automotive industry», in *Additive Manufacturing*, J. Pou, A. Riveiro, e J. P. Davim, A c. di, in *Handbooks in Advanced Manufacturing*, Elsevier, 2021, pp. 505–530. doi: <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-818411-0.00010-0>.
- [22] A. Vogelpoth, J. H. Schleifenbaum, e S. Rittinghaus, *Laser Additive Manufacturing of Titanium Aluminides for Turbomachinery Applications*, vol. Volume 6: Ceramics; Controls, Diagnostics, and Instrumentation; Education; Manufacturing Materials and Metallurgy. in *Turbo Expo: Power for Land, Sea, and Air*, vol. Volume 6: Ceramics; Controls, Diagnostics, and Instrumentation;

Education; Manufacturing Materials and Metallurgy. 2019. doi: 10.1115/GT2019-90947.

[23] F. Trevisan *et al.*, «Additive manufacturing of titanium alloys in the biomedical field: processes, properties and applications», *J. Appl. Biomater. Funct. Mater.*, vol. 16, fasc. 2, pp. 57–67, 2018, doi: 10.5301/jabfm.5000371.

[24] D. Zito, A. Carlotto, A. Loggi, P. Sbornicchia, D. Maggian, e S. Progold, «Optimization of SLM technology main parameters in the production of gold and platinum jewelry», presentato al The Santa Fe Symposium on Jewelry Manufacturing Technology 2014, Met-Chem Research Albuquerque, New Mexico, USA, 2014, pp. 439–470.

[25] E. M. Sefene, «State-of-the-art of selective laser melting process: A comprehensive review», *J. Manuf. Syst.*, vol. 63, pp. 250–274, 2022, doi: <https://doi.org/10.1016/j.jmsy.2022.04.002>.

[26] D. Herzog, V. Seyda, E. Wycisk, e C. Emmelmann, «Additive manufacturing of metals», *Acta Mater.*, vol. 117, pp. 371–392, 2016, doi: <https://doi.org/10.1016/j.actamat.2016.07.019>.

[27] Md. H. Ali, N. Sabyrov, e E. Shehab, «Powder bed fusion–laser melting (PBF–LM) process: latest review of materials, process parameter optimization, application, and up-to-date innovative technologies», *Prog. Addit. Manuf.*, vol. 7, fasc. 6, pp. 1395–1422, dic. 2022, doi: 10.1007/s40964-022-00311-9.

[28] M. X. Gan e C. H. Wong, «Practical support structures for selective laser melting», *J. Mater. Process. Technol.*, vol. 238, pp. 474–484, 2016, doi: <https://doi.org/10.1016/j.jmatprotec.2016.08.006>.

[29] F. Calignano, «Design optimization of supports for overhanging structures in aluminum and titanium alloys by selective laser melting», *Mater. Des.*, vol. 64, pp. 203–213, 2014, doi: <https://doi.org/10.1016/j.matdes.2014.07.043>.

[30] K. Kempen, B. Vrancken, L. Thijs, S. Bols, J. Van Humbeeck, e J.-P. Kruth, «Lowering thermal gradients in selective laser melting by pre-heating the baseplate», presentato al Solid Freeform Fabrication Symposium Proceedings, 2013.

[31] F. Trevisan *et al.*, «On the Selective Laser Melting (SLM) of the AlSi10Mg Alloy: Process, Microstructure, and Mechanical Properties», *Materials*, vol. 10, fasc. 1, 2017, doi: 10.3390/ma10010076.

[32] L. W. Hunter, D. Brackett, N. Brierley, J. Yang, e M. M. Attallah, «Assessment of trapped powder removal and inspection strategies for powder bed

fusion techniques», *Int. J. Adv. Manuf. Technol.*, vol. 106, fasc. 9, pp. 4521–4532, feb. 2020, doi: 10.1007/s00170-020-04930-w.

[33] J. Ge, S. Pillay, e H. Ning, «Post-Process Treatments for Additive-Manufactured Metallic Structures: A Comprehensive Review», *J. Mater. Eng. Perform.*, vol. 32, fasc. 16, pp. 7073–7122, ago. 2023, doi: 10.1007/s11665-023-08051-9.

[34] «Strutture di supporto». [Online]. Disponibile su: <https://3dprintingindustry.com/news/slm-solutions-3d-prints-porsche-e-drive-housing-on-nxg-x11-600-181483/>

[35] Q. Cao, Y. Bai, J. Zhang, Z. Shi, J. Y. H. Fuh, e H. Wang, «Removability of 316L stainless steel cone and block support structures fabricated by Selective Laser Melting (SLM)», *Mater. Des.*, vol. 191, p. 108691, 2020, doi: <https://doi.org/10.1016/j.matdes.2020.108691>.

[36] S. H. Lee e X. P. Li, «Study of the effect of machining parameters on the machining characteristics in electrical discharge machining of tungsten carbide», *J. Mater. Process. Technol.*, vol. 115, fasc. 3, pp. 344–358, 2001, doi: [https://doi.org/10.1016/S0924-0136\(01\)00992-X](https://doi.org/10.1016/S0924-0136(01)00992-X).

[37] V. V. Popov *et al.*, «Powder Bed Fusion Additive Manufacturing Using Critical Raw Materials: A Review», *Materials*, vol. 14, fasc. 4, 2021, doi: 10.3390/ma14040909.

[38] EOS, «Use-Cases of different Recoater Configurations for Direct Metal Laser Sintering (DMLS)». [Online]. Disponibile su: <https://www.eos.info/content/blog/recoater-configurations-for-dmls>

[39] EOS, «EOS HSS Recoater Blade». [Online]. Disponibile su: <https://store.eos.info/products/hss-recoater-blade-1>

[40] Nikon SLM SOLUTIONS, «SLM®280 2.0». [Online]. Disponibile su: <https://nikon-slm-solutions.com/slm-systems/slm280-2-0/#benefits>

[41] B. Neirinck, X. Li, e M. Hick, «Powder Deposition Systems Used in Powder Bed-Based Multimetal Additive Manufacturing», *Acc. Mater. Res.*, vol. 2, fasc. 6, pp. 387–393, giu. 2021, doi: 10.1021/accounts.1c00030.

[42] C. Andriani, C. Chua, Z. H. Liu, D. Q. Zhang, e S. L. Sing, «Review on Melting of Multiple Metal Materials in Additive Manufacturing», presentato al Proceedings of the 1st International Conference on Progress in Additive Manufacturing (Pro-AM 2014), 2014. doi: 10.3850/978-981-09-0446-3_134.

[43] N. C. Levkulich, S. L. Semiatin, J. E. Gockel, J. R. Middendorf, A. T. DeWald, e N. W. Klingbeil, «The effect of process parameters on residual stress

evolution and distortion in the laser powder bed fusion of Ti-6Al-4V», *Addit. Manuf.*, vol. 28, pp. 475–484, 2019, doi: <https://doi.org/10.1016/j.addma.2019.05.015>.

[44] S. Brenner, M. Moser, L. Strauß, V. Nedeljkovic-Groha, e G. Löwisch, «Recoater crashes during powder bed fusion of metal with laser beam: simulative prediction of interference and experimental evaluation of resulting part quality», *Prog. Addit. Manuf.*, vol. 8, fasc. 4, pp. 759–768, ago. 2023, doi: 10.1007/s40964-023-00471-2.

[45] Md. H. Kobir *et al.*, «Prediction of recoater crash in laser powder bed fusion additive manufacturing using graph theory thermomechanical modeling», *Prog. Addit. Manuf.*, vol. 8, fasc. 3, pp. 355–380, giu. 2023, doi: 10.1007/s40964-022-00331-5.

[46] J. Reijonen, A. Revuelta, S. Metsä-Kortelainen, e A. Salminen, «Effect of hard and soft re-coater blade on porosity and processability of thin walls and overhangs in laser powder bed fusion additive manufacturing», *Int. J. Adv. Manuf. Technol.*, vol. 130, fasc. 5, pp. 2283–2296, gen. 2024, doi: 10.1007/s00170-023-12853-5.

[47] F. Calignano, D. Manfredi, E. P. Ambrosio, L. Iuliano, e P. Fino, «Influence of process parameters on surface roughness of aluminum parts produced by DMLS», *Int. J. Adv. Manuf. Technol.*, vol. 67, fasc. 9, pp. 2743–2751, ago. 2013, doi: 10.1007/s00170-012-4688-9.

[48] D. S. Nasato, H. Briesen, e T. Pöschel, «Influence of vibrating recoating mechanism for the deposition of powders in additive manufacturing: Discrete element simulations of polyamide 12», *Addit. Manuf.*, vol. 48, p. 102248, 2021, doi: <https://doi.org/10.1016/j.addma.2021.102248>.

[49] T. Abu-Lebdeh, R. Dampney, V. Lamberti, e S. Hamoush, «Powder Packing Density and Its Impact on SLM-Based Additive Manufacturing», in *TMS 2019 148th Annual Meeting & Exhibition Supplemental Proceedings*, Cham: Springer International Publishing, 2019, pp. 355–367.

[50] R. McCann *et al.*, «In-situ sensing, process monitoring and machine control in Laser Powder Bed Fusion: A review», *Addit. Manuf.*, vol. 45, p. 102058, 2021, doi: <https://doi.org/10.1016/j.addma.2021.102058>.

[51] T. G. Spears e S. A. Gold, «In-process sensing in selective laser melting (SLM) additive manufacturing», *Integrating Mater. Manuf. Innov.*, vol. 5, fasc. 1, pp. 16–40, dic. 2016, doi: 10.1186/s40192-016-0045-4.

- [52] S. Kleszczynski, J. Zur Jacobsmühlen, J. Sehart, e G. Witt, «Error detection in laser beam melting systems by high resolution imaging», 2012, [Online]. Disponibile su: <https://hdl.handle.net/2152/88467>
- [53] T. Craeghs, S. Clijsters, E. Yasa, e J.-P. Kruth, «Online quality control of selective laser melting», 2011, [Online]. Disponibile su: <https://hdl.handle.net/2152/88350>
- [54] Nicem S.p.A., «BA 65 HT scheda tecnica». [Online]. Disponibile su: <https://www.nicem.it/wp-content/uploads/2024/01/BA-65-HT-LIGHT-BLUE-azzurra.pdf>
- [55] TOYO, «ECB14». [Online]. Disponibile su: <https://www.toyorobot.com/Product/Series/ECB14>
- [56] TOYO, «ECB14 scheda tecnica». [Online]. Disponibile su: https://www.toyorobot.com/File/Fsrv_NoAuthority_Download/f24062716491876?Idx=1
- [57] Trevigiana metalli, «Scheda tecnica Alluminio EN 6082». [Online]. Disponibile su: <https://trevigianametalli.it/wp-content/uploads/pdf/scheda-tecnica-6082-anticorodal.pdf>
- [58] J. ZHU, H. ZHOU, C. WANG, L. ZHOU, S. YUAN, e W. ZHANG, «A review of topology optimization for additive manufacturing: Status and challenges», *Chin. J. Aeronaut.*, vol. 34, fasc. 1, pp. 91–110, 2021, doi: <https://doi.org/10.1016/j.cja.2020.09.020>.
- [59] J. Liu *et al.*, «Current and future trends in topology optimization for additive manufacturing», *Struct. Multidiscip. Optim.*, vol. 57, fasc. 6, pp. 2457–2483, giu. 2018, doi: [10.1007/s00158-018-1994-3](https://doi.org/10.1007/s00158-018-1994-3).
- [60] Materialise, «AlSi10Mg scheda tecnica». [Online]. Disponibile su: <https://www.materialise.com/it/industriale/materiali-stampa-3d/Alluminio>

Ringraziamenti

Vorrei infine dedicare uno spazio a tutti coloro i quali mi hanno supportato durante il percorso e reso possibile il raggiungimento di questo traguardo.

Innanzitutto, vorrei ringraziare il Prof. Luca Iuliano per avermi dato l'opportunità di intraprendere questo progetto di tesi. Vorrei anche esprimere la mia profonda gratitudine alla Prof.ssa Flaviana Calignano, il cui costante supporto, guida e preziosi consigli sono stati fondamentali per la realizzazione di questo lavoro. La sua dedizione e pazienza mi hanno permesso di superare le sfide e di crescere sia a livello accademico che personale.

Un ringraziamento va anche ai tecnici, Giovanni Marchiandi, Emanuele Massè e Matteo Perrone, per i loro preziosi consigli, disponibilità e gentilezza.

Desidero dedicare un ringraziamento speciale ai miei genitori, il cui infinito amore e supporto mi hanno accompagnato durante questo percorso lontano da casa. Grazie per avere assecondato ogni mia scelta e per aver sempre creduto in me. Senza di voi tutto ciò non sarebbe stato possibile.

Un sentito ringraziamento a tutta la mia famiglia: agli zii, Pino e Pina, Maria, Corinzia e Leo, e ai cugini, Sebastiano, Noemi, Ilenia, Vincenzo, Alberto e Marco. Grazie per il vostro affetto, sostegno e incoraggiamento.

Un ringraziamento speciale va ai miei coinquilini, Santo e Salvatore, che sono stati come una seconda famiglia per me. Grazie alla vostra amicizia e al vostro supporto, non mi sono mai sentito solo. Abbiamo condiviso questo viaggio insieme, e ogni vostro consiglio mi ha aiutato a crescere e a diventare una persona migliore. Grazie per aver reso la convivenza un'esperienza piacevole e divertente, e per aver condiviso con me momenti indimenticabili durante questo percorso. Siete come due fratelli.

Un grazie anche ad Irene, che è entrata a far parte di questa nuova famiglia torinese. Grazie per la gentilezza, la simpatia e la gioia che hai portato (...e sì, anche per i muffin al cioccolato). Hai reso questo percorso ancora più piacevole.

Un caloroso ringraziamento a Marco, per la tua amicizia sincera, per essere sempre al mio fianco e per il supporto incondizionato. Grazie per aver condiviso con me momenti di gioia e di difficoltà, per ogni tuo aiuto e consiglio e per aver sempre creduto in me. ocrAM eizarG.

Vorrei dedicare un ringraziamento speciale a Diletta, per la tua costante presenza e per il suo sostegno, per essere diventata un punto di riferimento. Grazie per essere sempre stata al mio fianco e per ogni consiglio, sei stata veramente importante in questo percorso.

Un sincero ringraziamento a Marta, per tutto quello che sei stata in questi anni, una presenza costante e insostituibile. Grazie per ogni momento passato insieme, arricchito dalla tua allegria e solarità, che ha reso tutto migliore. Sei come una sorella.

Vorrei ringraziare tutti gli amici che sono stati presenti durante questi anni: Alessia, Claudio, Edoardo, Flavia, Giorgia, Giorgio, Giuseppe Di Venuta, Giuseppe Minneci, Giusi, Luciano, Marco Vinci, Mirco, Umberto. Ognuno di voi ha contribuito a creare la persona che sono oggi.

Infine, desidero ringraziare tutti coloro che, in modi diversi, hanno contribuito a rendere possibile questo traguardo. La vostra presenza e il vostro supporto sono stati fondamentali e vi sarò sempre grato.