

POLITECNICO DI TORINO

Dipartimento di Ingegneria Meccanica e Aerospaziale

Corso di Laurea Magistrale in Ingegneria Meccanica



**Politecnico
di Torino**

Tesi di Laurea Magistrale

Integrazione funzionale e produzione con tecnologia Additive Manufacturing di un articolo di gioielleria

Relatore:

Professore Luca Iuliano

Tutor aziendale:

Ing. Giacomo Mussino

Candidata:

Maria Chiara Marchese

A.A 2021/2022

Sessione di Laurea Dicembre 2022

INDICE

INDICE	3
INDICE DELLE FIGURE	5
INDICE DELLE TABELLE.....	8
ABSTRACT	9
INTRODUZIONE.....	11
CAPITOLO 1- L' ADDITIVE MANUFACTURING	15
1.1 CENNI STORICI	15
1.2 PROCESSO DI PRODUZIONE IN AM.....	17
1.3 CLASSIFICAZIONE DELLE TECNICHE DI AM.....	19
1.3.1 Fused Filament Fabrication	20
1.3.2 Directed Energy Deposition	22
1.3.3 Laser Powder Bed Fusion	23
1.4 MATERIALI PER L' AM	29
1.4.1 Lega Ti6Al4V	29
1.5 DESIGN FOR AM.....	32
1.6 VANTAGGI, SVANTAGGI ED ESEMPI APPLICATIVI.....	34
CAPITOLO 2- STATO DELL' ARTE.....	36
2.1 I "NON-ASSEMBLY MECHANISMS"	36
2.2 ESEMPI APPLICATIVI	38
2.3 CLASSIFICAZIONE DEI MECCANISMI NON ASSEMBLATI	46
CAPITOLO 3- CASE STUDY	49
3.1 L' AM PER LA GIOIELLERIA	49
3.2 STRUMENTI UTILIZZATI	53
3.2.1 Print Genius 250	53
3.2.2 EOS Titanium Ti64.....	54
3.3 PROCESSO DI OTTIMIZZAZIONE DEL DESIGN E DELLA PRODUZIONE	56

3.3.1	Prima iterazione	57
3.3.2	Parametri di processo	82
3.3.3	Seconda iterazione	85
CAPITOLO 4- PRODOTTO FINALE		99
4.1	CONCEPT SELECTION	99
4.2	PRODUZIONE DEL COMPONENTE	103
4.3	ANALISI PRELIMINARE DEI COSTI E CONFRONTO FRA LE TECNOLOGIE	108
CONCLUSIONI.....		112
BIBLIOGRAFIA E SITOGRAFIA.....		116
RINGRAZIAMENTI.....		120

INDICE DELLE FIGURE

Figura 1 : Le quattro rivoluzioni industriali [2].....	11
Figura 2 : Le nove tecnologie abilitanti dell'Industry 4.0 [7]	12
Figura 3 : Steps del processo di produzione per la fabbricazione additiva [15]	17
Figura 4 : Classificazione delle tecniche di fabbricazione additiva	19
Figura 5 : Schema del processo Fused Filament Fabrication[16]	20
Figura 6 : Schema del processo Directed Energy Deposition [17]	22
Figura 7 : Schema del processo Laser Powder Bed Fusion [19]	24
Figura 8 : Parametri di processo per la tecnologia L-PBF [21].....	25
Figura 9 : Influenza degli elementi leganti sulle fasi delle leghe di titanio [25]	30
Figura 10 : Esempi di soluzioni tecnologiche per la produzione di componenti in AM, seguendo le regole del DfAM [20]	33
Figura 11 : Tipologie di giunti prodotti con SLA e SLS [27]	39
Figura 12 : Quattro geometrie di pin joints - (a)tradizionale; (b) bordi smussati; (c) doppio cono; (d) drum-shaped [29]	40
Figura 13 : Influenza dell'orientamento in macchina per la realizzazione di meccanismi non assemblati [30]	42
Figura 14 : Esempio di redesign di un giunto rotazionale [32]	44
Figura 15 : Ottimizzazione per la produzione (in alto) e redesign di un giunto a flessione [33].....	45
Figura 16 : Classificazione dei non-assembly mechanisms [28].....	46
Figura 17 : Esempi di meccanismi Geometry-based [28]	47
Figura 18 : Esempi di meccanismi Material-based [28]	47
Figura 19 : Esempi di meccanismi Pattern-based [28]	48
Figura 20 : Dettaglio di un gioiello prodotto con due tecnologie: direct casting a sinistra e SLM a destra, as built e dopo una fase di post-processing.[36]	50
Figura 21 : Sulla sinistra: "Platinum designs in the Nautilus range by Nuovi Gioielli"; Sulla destra: "Zip bracelet in 18 Kt gold, additively manufactured by Nuovi Gioielli, makes maximum use of the design freedoms offered by the technology" [35].....	51

Figura 22 : “An additively manufactured 18 Kt necklace by Nuovi Gioielli from the ‘Sound of Wings’ collection” [35]	52
Figura 23 : Print Genius 250[37].....	53
Figura 24 : Workflow operativo per il processo di ottimizzazione del design e della produzione [38], [39].....	56
Figura 25 : Progetto Sant’Eligio[50]	57
Figura 26 : Design Concept 1	61
Figura 27 : Design Concept 2.....	63
Figura 28 : Dimensioni critiche	64
Figura 29 : Design Concept 3.....	64
Figura 30 : Design Concept 4.....	65
Figura 31 : Prima iterazione, messa in macchina	67
Figura 32 : Prima iterazione, messa in macchina vista dall’alto.....	68
Figura 33 : Prima iterazione, volume totale del job di stampa.....	69
Figura 34 : Prima iterazione, printer user interface e Part info	70
Figura 35 : Prima iterazione, risultato as built.....	71
Figura 36 : Il processo E-cut.....	72
Figura 37: Macchine di elettroerosione a filo E-Cut40D.....	73
Figura 38 : Pallinatrice Noreblast sd9	74
Figura 39 : Confronto finitura superficiale as-built e dopo pallinatura con sfere di vetro per la prima iterazione.	75
Figura 40 : Asse di riferimento per le prove di misura e dimensioni nominali lungo gli assi X e Y.....	76
Figura 41 : Esempi di sezioni analizzate per la prima iterazione.....	78
Figura 42 : : Misure al microscopio elettronico. Esempi di misure prese per ciascun piano per braccio e sede e sfera e sede.....	78
Figura 43 : Bilancia di Archimede per le prove di densità.....	83
Figura 44 : In primo piano: cubetti selezionati in seguito alle prime prove di densità	84
Figura 45 : Design Concept 5.....	86
Figura 46 : Design Concept 6.....	86
Figura 47 : Design Concept 7.....	87

Figura 48 : Seconda iterazione, messa in macchina dei campioni di design e dei Cubetti per i parametri di processo	89
Figura 49 : Seconda iterazione, messa in macchina vista dall'alto	90
Figura 50 : Seconda iterazione, volume totale del job di stampa	91
Figura 51 : Seconda iterazione, part info e printer user interface	92
Figura 52 : Seconda iterazione, risultato della produzione.....	93
Figura 53 : Concept da 3 a 7 in seguito a pallinatura.....	94
Figura 54 : Risultato dei Concept 3 e 4.....	97
Figura 55 : Valutazione della mobilità del Concept 5, Concept 6 e Concept 7.....	98
Figura 56 : Misure standard per la produzione di un bracciale	100
Figura 57 : Design finale del bracciale.....	101
Figura 58 : Sistema di chiusura	102
Figura 59 : Design finale del bracciale, seconda soluzione	103
Figura 60 : Messa in macchina per il Job di produzione	103
Figura 61 : Supporti del Job di stampa.....	104
Figura 62 : Volume totale di materiale utilizzato per il Job di produzione	104
Figura 63 : Modifica per la produzione	105
Figura 64 : Job di produzione, part info e printer user interface.....	106
Figura 65 : Camera di lavoro con il Job di produzione.....	106
Figura 66 : Risultato finale	107
Figura 67 : Risultato della prova di rugosità.....	107
Figura 68 : Confronto sul costo unitario di produzione	110
Figura 69 : Confronto sul costo totale di produzione	110
Figura 70 : Vista dall'alto dei due design prodotti.....	113

INDICE DELLE TABELLE

Tabella 1 : Composizione chimica della lega Ti6Al4V.....	31
Tabella 2 : Dimensioni delle particelle di polvere EOS Titanium Ti64[26].....	54
Tabella 3 : Valori di rugosità superficiale as built EOS Titanium Ti64[26].....	55
Tabella 4 : Proprietà meccaniche del materiale EOS Titanium Ti64[26]	55
Tabella 5 : Studio sulle forze applicabili a un braccio della maglia.....	62
Tabella 6 : Principali caratteristiche delle quattro prove di design della prima iterazione.....	66
Tabella 7 : Prima iterazione, parametri di produzione.....	69
Tabella 8 : Prove di misura degli ingombri dei risultati della orima iterazione	77
Tabella 9 : Dimensioni nominali dei giunti	79
Tabella 10 : Misure e scostamenti rispetto alle dimensioni nominali dei giunti. In azzurro i valori critici	80
Tabella 11 : Prove per l'analisi dei parametri di processo, variazioni di produttività e densità di energia per unità di volume. Risultati ottenuti in termini di densità.....	82
Tabella 12 : Principali caratteristiche dei quattro Concept di design della seconda iterazione	88
Tabella 13 : Seconda iterazione, parametri di processo.....	91
Tabella 14 : Analisi preliminare dei costi.....	109
Tabella 15 : Parametri utilizzati per il Job di produzione finale	113

ABSTRACT

All'interno della quarta rivoluzione industriale, a cui si sta assistendo in questi anni, una delle tecnologie definita abilitante dell'Industria 4.0 è l'Additive Manufacturing (AM): il processo di produzione per addizione di materiale che, proprio per questa caratteristica, si distingue dai più tradizionali processi sottrattivi.

L'AM offre diversi vantaggi in termini di innovazione dei prodotti, di sostenibilità del processo e di tempi di produzione. Tra questi si ha, sicuramente, il vantaggio di poter realizzare geometrie molto più complesse rispetto alle tecniche tradizionali. L'integrazione geometrica e funzionale di più parti, che si traduce nella realizzazione di assiemi complessi, anche mobili, ne è sicuramente un'espressione.

La riprogettazione per AM di un oggetto assemblato può essere molto complessa. In particolare, quando si tratta di un meccanismo mobile, è necessario un maggiore approfondimento. Negli anni è stata studiata la possibilità di realizzare i cosiddetti "*non-assembly mechanisms*" utilizzando la fabbricazione additiva, dapprima con lo scopo unico della prototipazione rapida, poi con quello di ottenere dei prodotti finiti. In questo progetto di tesi, svolto all'interno della linea pilota del Competence Industry Manufacturing 4.0, una volta analizzato lo stato dell'arte sulla produzione dei meccanismi non assemblati, è stato esaminato un particolare case-study riguardante la realizzazione della maglia di un bracciale in lega di titanio Ti6Al4V, progettato dall'azienda BMC Gioielli.

L'obiettivo principale di questo lavoro è quello di eliminare la fase di assemblaggio tra gli elementi che compongono il gioiello, realizzando la maglia con la tecnologia Laser Powder Bed Fusion (L-PBF). Lo studio ha seguito un workflow operativo che può essere riassunto in alcuni punti fondamentali: dall'analisi dei requisiti funzionali del componente, secondo le indicazioni fornite dal progetto iniziale, si è passati a una fase di re-design dei giunti di accoppiamento degli elementi della maglia, per poi proseguire con una fase di ottimizzazione della produzione. Infine, sono stati analizzati i pro e i contro dell'utilizzo della tecnologia additiva in questo particolare caso applicativo, in termini di costi di produzione e qualità del prodotto finito.

La linea guida adottata le fasi di lavoro è stata quella di permettere la realizzazione del bracciale con la tecnologia L-PBF, una buona mobilità tra gli elementi e un'adeguata qualità finale del prodotto.

INTRODUZIONE

Negli ultimi secoli, l'umanità è stata artefice e spettatrice di sempre più numerose innovazioni nel campo tecnologico. Queste hanno apportato dei cambiamenti che, spesso, sono stati radicali e hanno, di conseguenza, stravolto la società.

È in questi casi che si parla di "punto di non ritorno" e di "Rivoluzione industriale" ovvero la "trasformazione delle strutture produttive e sociali determinata dall'affermazione di nuove tecnologie"[1].

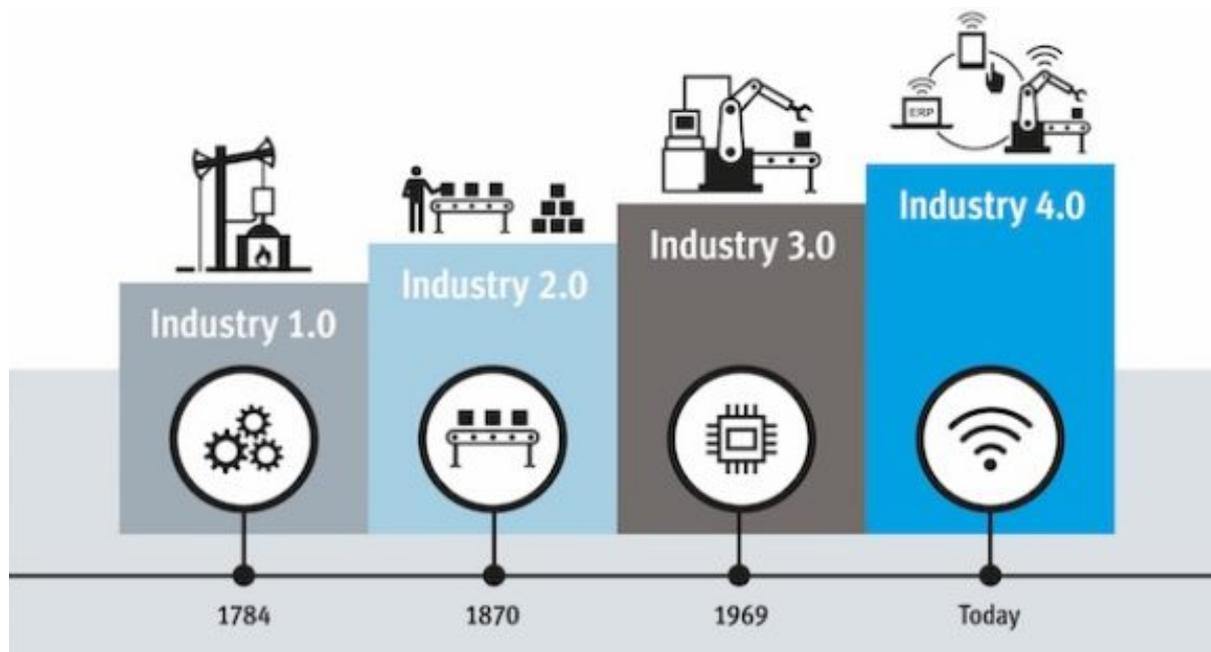


Figura 1 : Le quattro rivoluzioni industriali [2]

Ad oggi è possibile parlare di quattro rivoluzioni industriali. La prima si è sviluppata in Inghilterra tra il XVIII e il XIX secolo. L'invenzione simbolo, in questo caso, è quella della macchina a vapore che ha trovato, come principale applicazione, la realizzazione del telaio meccanico per l'industria tessile, ma ha influenzato anche altri aspetti, come ad esempio i trasporti.

La seconda rivoluzione industriale, risalente alla fine del XIX secolo, ha visto come protagonisti l'elettricità e il petrolio come fonti energetiche alternative al vapore e l'introduzione del concetto di catena di montaggio per l'industria. Il risultato è stato l'inizio della produzione di massa. In questo periodo è stato inventato il motore a

scoppio e da un punto di vista sociale si è iniziato a vedere il fenomeno dell'urbanesimo[3], [4].

La terza rivoluzione industriale può essere collocata verso la metà del '900 e può essere definita "rivoluzione digitale" perché è legata alla nascita dell'informatica. Più in particolare, in questa fase sono nati i primi computer e robot, iniziando così a parlare di automazione.[4] L'evoluzione di questi elementi ha permesso di parlare oggi di quarta rivoluzione industriale.

La definizione "Industry 4.0" prende il nome dal piano industriale del governo tedesco presentato nel 2011 alla fiera di Hannover che prevedeva investimenti in diversi campi con l'obiettivo di rendere moderno e competitivo il sistema produttivo tedesco.[5]

Al modello tedesco, visti i risultati ottenuti, hanno fatto riferimento molti paesi facendo sì che da un piano industriale di una nazione si passasse a una vera e propria rivoluzione riguardante gli aspetti produttivi, economici e sociali.

Un'impresa per essere considerata innovativa dal punto di vista dell'industria 4.0 deve avere determinati requisiti ovvero le "tecnologie abilitanti". Queste sono i pilastri su cui si basa l'Industria 4.0 e sono state definite dopo uno studio realizzato dalla società di consulenza Boston Consulting Group.[6]

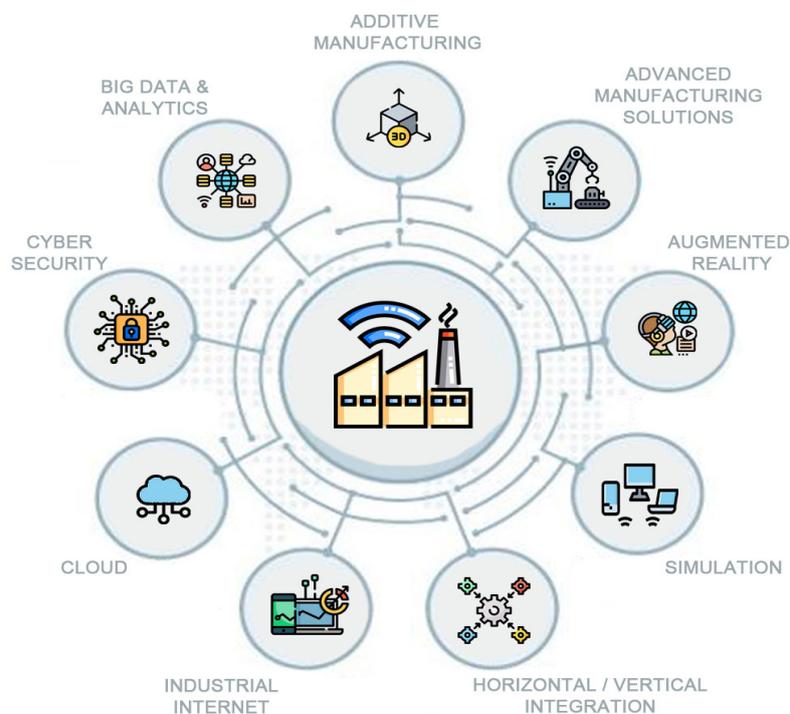


Figura 2 : Le nove tecnologie abilitanti dell'Industry 4.0 [7]

Nell'immagine rappresentata in *Figura 2* è possibile distinguere le nove tecnologie che sono:

- Advanced manufacturing solution, ovvero l'utilizzo dei Cobot, dei robot collaborativi capaci di lavorare in ambienti in cui sono presenti esseri umani e, quindi, di cooperare con loro in totale sicurezza.
- Additive manufacturing, la tecnologia abilitante oggetto di questa tesi e che verrà trattato, in dettaglio, nel *Capitolo 1*.
- Augmented reality, la realtà aumentata che permette, attraverso l'utilizzo di dispositivi quali i visori, di entrare virtualmente in qualunque ambiente, interagendo con esso.
- Simulation, utilizzata per effettuare dei test di prova e di ottimizzazione del processo, valutando diverse possibili combinazioni di fattori e riducendo i tempi di studio e poi produzione.
- Horizontal e vertical integration che va in contrapposizione al più tradizionale sistema a piramide. In questo modo si ha la comunicazione tra i diversi elementi che costituiscono l'intero sistema produttivo al fine di avere un maggiore scambio di dati. In particolare, la vertical integration identifica lo scambio di informazioni che va dal cliente al fornitore, mentre si parla di horizontal integration se i dati scambiati sono quelli tra aziende che operano allo stesso livello della filiera. [8]
- Industrial internet or Internet of things, ovvero il collegamento, la connessione degli elementi fisici e dei sistemi informatici.
- Cloud, che permette di condividere dati facilmente ed è dunque il mezzo migliore per far collaborare più settori o aziende possibili.
- Cyber security, è l'altro lato della medaglia dei benefici forniti dalla connessione. Un attacco informatico ai dati potrebbe essere un grave rischio per i beni di un sistema di produzione. È necessario, dunque, che ci sia un adeguato sistema di sicurezza non solo più fisico, ma anche informatico.
- Big Data Analytics, ovvero l'analisi di un'enorme quantità di dati, in modo tale da ottimizzare l'intero sistema di produzione.

Implementando sempre di più le tecnologie è possibile raggiungere un maggior valore sia per i clienti che per le aziende, ottenendo risultati di qualità superiore, prodotti con

tecnologie smart, riducendo gli scarti e i consumi energetici e aumentando la sostenibilità. [9]

Anche l'Italia ha investito in questo campo sviluppando, nel 2016, il Piano nazionale industria 4.0.

All'interno di questo contesto rivoluzionario si colloca il CIM 4.0 un centro di competenza ad alta specializzazione. Una definizione dei centri di competenza la si trova nel sito del ministero: *"I centri di competenza sono partenariati pubblico-privati il cui compito è quello di svolgere attività di orientamento e formazione alle imprese su tematiche Industria 4.0 nonché di supporto nell'attuazione di progetti di innovazione, ricerca industriale e sviluppo sperimentale finalizzati alla realizzazione, da parte delle imprese fruitrici, in particolare delle Pmi, di nuovi prodotti, processi o servizi (o al loro miglioramento) tramite tecnologie avanzate in ambito Industria 4.0"*. [10]

In particolare, il CIM 4.0 è costituito dal Politecnico e dall'Università di Torino e da aziende partner, ed è il polo di riferimento nazionale per il trasferimento tecnologico e per la diffusione di competenze legate all'industria manifatturiera e di servizi. L'obiettivo di CIM 4.0 è quello di supportare le aziende nel processo di transizione e di creare un ecosistema di Smart Factory. [11]

All'interno del competence center sono presenti due linee pilota: la prima dedicata alla digital factory e la seconda all'additive manufacturing.

È proprio all'interno della linea additive del CIM 4.0 che è stato sviluppato questo progetto di tesi, che ha come scopo quello di utilizzare la tecnologia Laser powder bed fusion per la produzione di componenti articolati assemblati direttamente in macchina. In particolare, è stato sviluppato un caso di studio nel campo della gioielleria, sulla realizzazione della maglia di un bracciale in titanio per il quale si vuole eliminare la fase di assemblaggio.

CAPITOLO 1 - L' ADDITIVE MANUFACTURING

1.1 Cenni storici

L' Additive Manufacturing (AM) è un sistema di produzione che si basa sulla generazione di componenti per addizione di materiale, in contrapposizione a quelli tradizionali che si basano sulla sottrazione di materiale. Una definizione è data dall'organismo di normazione statunitense ASTM International che lo descrive come *“a process of joining materials to make objects from 3D model data, usually layer upon layer, as opposed to subtractive manufacturing methodologies”*[12].

La necessità che ha portato a sviluppare questo sistema di produzione era quella di avere dei prototipi da testare nel minor tempo possibile, prima della produzione in serie. Questo è il motivo per cui, inizialmente, prendeva il nome di Rapid Prototyping. Storicamente la nascita dell'AM è associata a Charles Hull che, nel 1984, brevettò la stereolitografia, una tecnologia che permette di realizzare oggetti solidi utilizzando una sorgente laser su una vasca di resina fotopolimerica.

Nel 1986, si è sviluppata la tecnologia SLS (*Selective Laser Sintering*), processo di sinterizzazione selettiva tramite fascio laser di un letto di polvere polimerica, strato per strato. Di questa tecnologia venne sviluppata una variante, nel 1995, per la produzione di componenti a partire dalle polveri metalliche. Questa è la L-PBF (*Laser Powder Bed Fusion*), sviluppata da EOS, che consiste in un letto di polveri metalliche fuse selettivamente da un fascio laser in ambiente controllato.

A seguire, nel 1989, è stata brevettata la tecnologia FDM (*Fused Deposition Modeling*) ovvero la deposizione di un filamento di materiale polimerico fuso, depositato attraverso un ugello mobile sulla piattaforma.

Nel 1993 è stata brevettata una delle ultime tecnologie: EBM (*Electron Beam Melting*). Questa è sempre una tecnologia a letto di polvere metallica come L-PBF, ma, in questo caso, la polvere viene fusa mediante un fascio di elettroni.[13] Come appena accennato, l'utilizzo che ha portato allo sviluppo di queste tecnologie era quello di avere dei

prototipi da testare prima della produzione. Nelle fasi di sviluppo di un prodotto è possibile distinguere diverse tipologie di prototipi in base allo scopo che hanno [14]. Si possono avere:

- **Prototipi concettuali** che hanno come obiettivo la valutazione delle geometrie complessive del componente, degli ingombri globali e delle difficoltà tecnologiche. Su questi prototipi non è necessario utilizzare il materiale e la tecnologia di fabbricazione del prodotto finale, dal momento che la valutazione che si effettua è una valutazione di massima.
- **Prototipi funzionali** che hanno l'obiettivo di valutare le prestazioni del componente. È necessario, prima di produrre, capire se ciò che è stato progettato abbia le caratteristiche funzionali volute. In questo caso è meglio utilizzare un materiale simile a quello finale.
- **Prototipi tecnici** il cui obiettivo è la valutazione delle prestazioni e del ciclo di fabbricazione del prodotto, per capire quale è meglio utilizzare o meno. Il materiale e la tecnologia di produzione, in questo caso, devono essere molto simili a quelli definitivi per avere una panoramica più completa.
- **Prototipi preserie** il cui obiettivo è la valutazione finale del prodotto. In seguito a questo saranno ammesse solo poche modifiche del tutto marginali

I prototipi si distinguono per i loro obiettivi, il materiale utilizzato e la tecnologia impiegata. [14]

La realizzazione di tutti questi è un processo molto dispendioso in termini di tempi e costi e per questo si è cercato di trovare una soluzione al problema tramite l'AM. Con la fabbricazione additiva si ha la possibilità di sviluppare nuovi prototipi in tempi sempre minori e, di conseguenza, di rimanere al passo con la continua richiesta di novità da parte del mercato.

Ci sono voluti diversi anni per passare dal Rapid Prototyping a vedere nell'AM una realtà produttiva.

I primi passi sono stati fatti nel campo della fonderia, dove è stata sfruttata la fabbricazione additiva per la produzione di anime per la fonderia in sabbia (Rapid Casting). Successivamente, anche per quella degli inserti per stampi, si è vista la stessa potenzialità (Rapid Tooling). Oggi l'AM è utilizzato per la produzione di componenti per piccole serie.

1.2 Processo di produzione in AM

Per capire come intraprendere un percorso di produzione con la fabbricazione additiva, è utile approfondire gli steps necessari per lo sviluppo del prodotto.

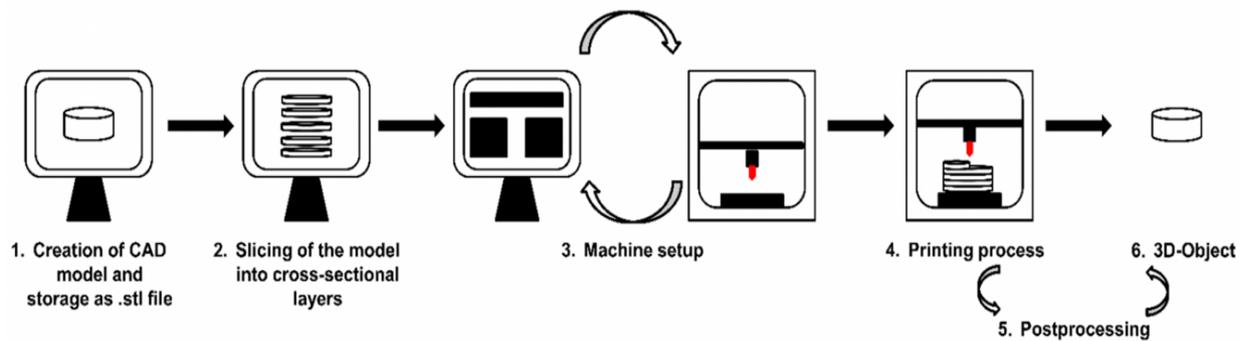


Figura 3 : Steps del processo di produzione per la fabbricazione additiva [15]

Il processo, rappresentato nell' immagine in *Figura 3* ha, come base di partenza, la realizzazione di un modello matematico su un software CAD 3D. Da questo vengono estrapolati tutti i dati necessari per arrivare alla produzione.

Il modello viene convertito nel formato STL (Standard Triangulation Language) "file format for 3D model data used by machines to build physical parts; STL is the de facto standard interface for additive manufacturing systems"[12]. Questo tipo di file discretizza la superficie di un solido in triangoli: i vertici sono descritti dalle coordinate x , y e z ; un vettore indica la direzione della normale alla superficie. La dimensione dei triangoli varia in base alla precisione che si vuole ottenere in fase di produzione. Più la mesh è fitta più il componente sarà preciso, anche se i tempi computazionali saranno nettamente più lunghi. È necessario, infatti, trovare il giusto compromesso tra precisione e tempi.

La creazione del file STL porta con sé, talvolta, alcuni errori. Sarà poi necessario correggerli con l' utilizzo di software dedicati. Tra gli errori che si possono presentare ci sono: le normali invertite, le intersezioni o i gaps tra i triangoli.

Nella generazione della mesh è necessario, quindi, valutare eventuali errori e correggerli prima di continuare il processo di produzione.

Una volta ottenuto il file che descrive la geometria del componente, è necessario inserirlo all'interno della macchina e orientarlo nel modo migliore, in relazione alle esigenze volute.

A questo punto è possibile generare i supporti. Questi hanno funzioni ben precise nel processo di stampa che sono:

- Ancorare il modello alla piattaforma di lavoro
- Proteggere il componente laddove potrebbe essere danneggiato durante la costruzione
- Supportare le parti sporgenti
- Favorire lo scambio di calore tra il componente e la piattaforma.

Questo passaggio è molto importante per la produzione. Ciascuna tecnologia segue diversi criteri per la generazione dei supporti, così come ciascun materiale. Alla fine, verranno rimossi dal componente. In alcune tecnologie è possibile avere dei supporti in materiali diversi da quello di costruzione di componente. Utilizzando un materiale meno resistente, o solubile in acqua, si avrà maggiore facilità nella rimozione.

A questo punto, generato il componente e i suoi supporti, si deve effettuare quello che viene definito "slicing". Lo slicing è la suddivisione in strati del componente, orientato nel modo desiderato, e dei suoi supporti. La costruzione avverrà lungo l'asse z della macchina. Ogni strato avrà una dimensione che si può definire come Δz .

Lo slicing può essere costante, quando il Δz è fisso, oppure adattativo, quando il Δz varia per ottimizzare al meglio la geometria del componente.

Il file viene mandato alla macchina e costruito. In seguito alla fase di produzione vera e propria è quasi sempre necessaria un'azione di post-processo e di finitura. Queste variano per ciascuna tecnologia, per l'applicazione del componente e per le caratteristiche volute. Alcuni esempi sono l'aspirazione della polvere, i trattamenti termici, finiture superficiali, verniciature, lucidature...

1.3 Classificazione delle tecniche di AM

Dal primo brevetto del 1984 ad oggi, l'Additive manufacturing ha visto un enorme sviluppo. Capite le potenzialità, infatti, si sono sviluppate sempre di più le tecnologie e i materiali a disposizione.

Per cercare di mettere ordine all'attuale mondo delle tecnologie esistenti, è possibile classificarle sulla base del materiale e dello stato di partenza in cui esso si trova. Si distinguono le tecnologie per materiali di partenza allo stato liquido, solido o in polvere, come è possibile osservare nello schema in *Figura 4*.

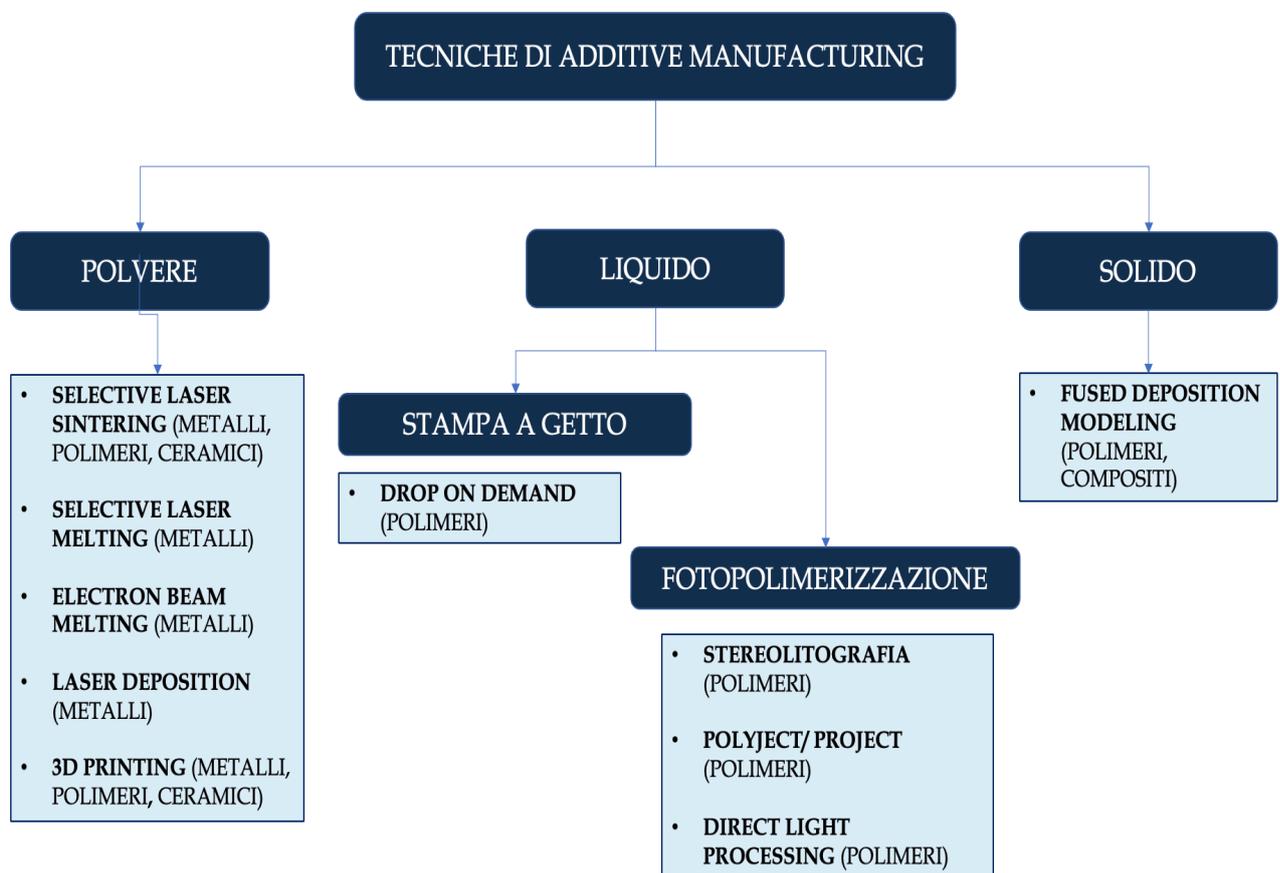


Figura 4 : Classificazione delle tecniche di fabbricazione additiva

All'interno di queste macroaree è possibile poi distinguere le tecniche per materiali metallici, polimerici, ceramici e compositi. O ancora, come per le tecniche disponibili

per lo stato liquido, è possibile distinguere in base al sistema di produzione, se il liquido si trova all'interno di una vasca su cui agisce una sorgente luminosa o se si ha la deposizione di gocce di materiale.

Tra le tecnologie esistenti e rappresentate nello schema precedente, si vuole fare una breve descrizione delle tecnologie presenti all'interno della linea pilota del CIM 4.0 per poter contestualizzare meglio l'ambiente di lavoro all'interno del quale è stato sviluppato il progetto di tesi. Nei laboratori del CIM 4.0 sono presenti tre diverse tecnologie, due per materiali metallici e una per materiali polimerici. Queste, in particolare, sono: Fused Filament Fabrication, Directed Energy Deposition e Laser Powder Bed Fusion.

1.3.1 Fused Filament Fabrication

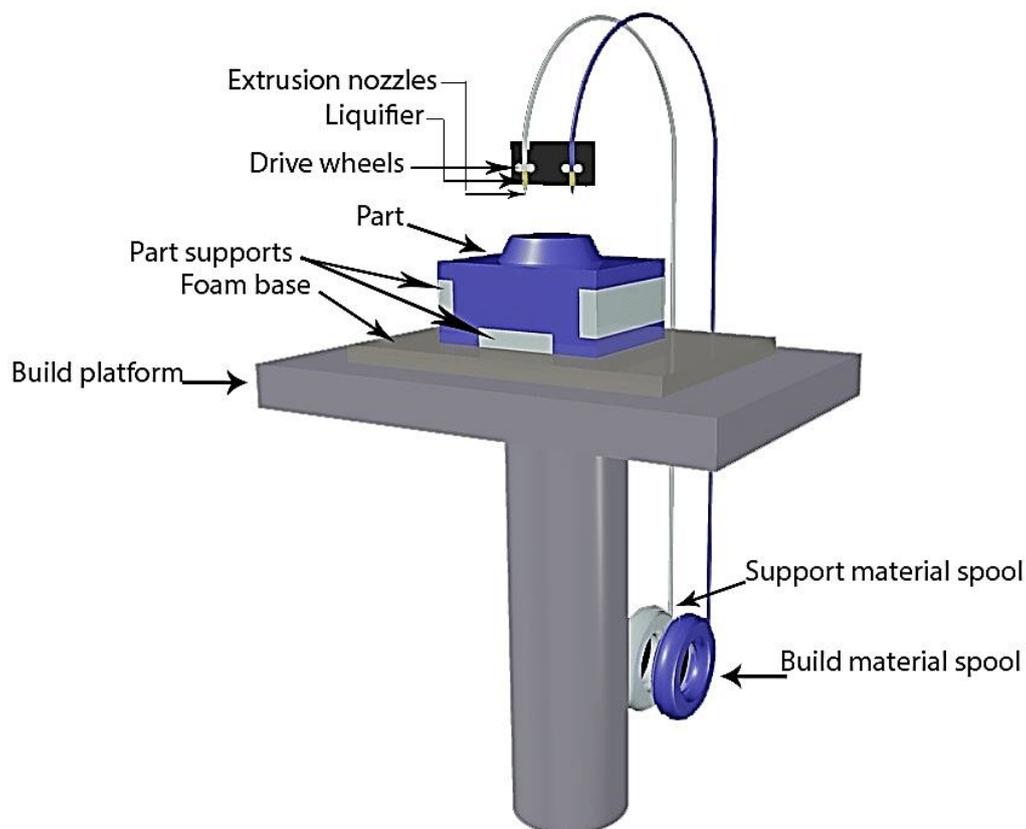


Figura 5 : Schema del processo Fused Filament Fabrication[16]

Secondo ASTM International la definizione di fused deposition modeling (FDM®) è: *“a material extrusion process used to make thermoplastic parts through heated extrusion and deposition of materials layer by layer; term denotes machines built by Stratasys, Inc”* [12]. La definizione riguarda la tecnologia brevettata da Stratasys. Esistono comunque diverse tecnologie simili che si possono definire Fused Filament Fabrication di cui è riportato uno schema in *Figura 5*.

Come si evince dalla definizione, questa tecnica di produzione processa polimeri termoplastici o compositi (polimeri caricati con altri materiali per ottenere maggiori prestazioni). Il processo si basa sull' estrusione di un filamento di materiale, che in partenza si presenta avvolto in bobine, su una piattaforma che si può muovere lungo l'asse z.

Gli ugelli che estrudono il materiale si possono muovere lungo i tre assi x, y e z.

Con questa tecnologia c'è la possibilità di costruire il componente con più materiali o di avere diversi materiali per il pezzo e per il supporto, grazie alla presenza di più ugelli estrusori. I supporti sono necessari per la costruzione strato per strato del componente e possono essere rimossi meccanicamente. Nel caso di stampa multimateriale, è possibile utilizzare per la realizzazione dei supporti un materiale solubile in acqua, in modo tale da rimuoverli più facilmente a fine lavorazione.

È uno dei sistemi più diffusi, soprattutto nelle sue versioni non industriali per la produzione casalinga di componenti, questo perché non ci sono molti vincoli per l'installazione ed è un processo semplice rispetto ad altre tecniche. È sempre necessario però avere un modello matematico di partenza da processare.

I volumi di lavoro variano molto da macchina a macchina, ma sono sempre limitati alle dimensioni della piattaforma di costruzione.

Il principale utilizzo di questa tecnica è la prototipazione rapida, in particolare per la produzione di prototipi funzionali. È però possibile realizzare anche parti definitive o stampi di preserie. [14]

Con l'FDM si hanno delle buone prestazioni per quanto riguarda le tolleranze dimensionali e rugosità superficiali, stando però attenti allo staircase effect che si può creare.

1.3.2 Directed Energy Deposition

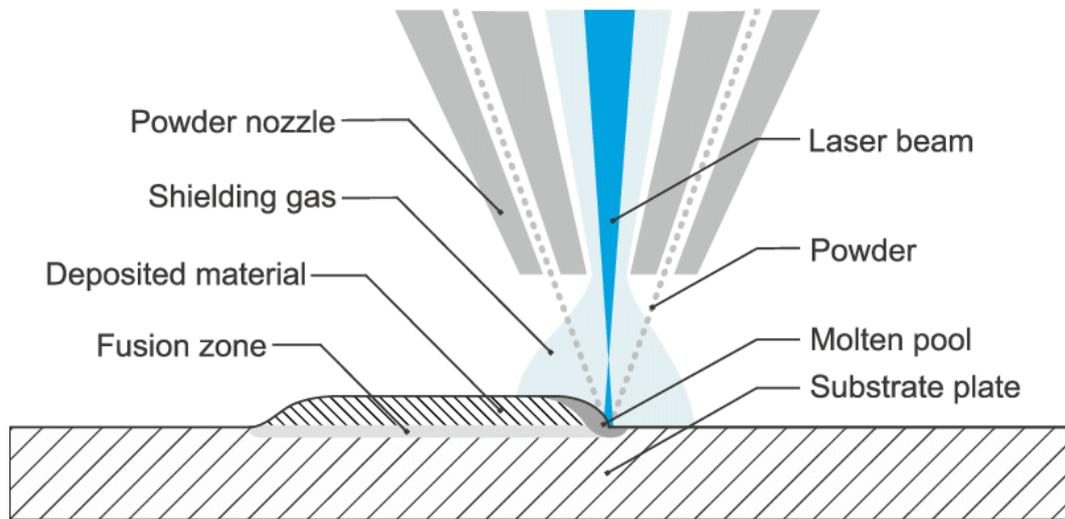


Figura 6 : Schema del processo Directed Energy Deposition [17]

Anche in questo caso, è possibile sfruttare la definizione data da ASTM International che definisce il processo di directed energy deposition “*an additive manufacturing process in which focused thermal energy is used to fuse materials by melting as they are being deposited*”[12].

Il processo, riportato schematicamente in *Figura 6*, avviene per deposizione di polvere metallica, fusa da una sorgente laser. Per far ciò è necessario che la testa di deposizione abbia, oltre all’ugello per la polvere metallica, anche la possibilità di iniettare un gas di copertura per evitare che il materiale si ossidi durante il processo.

La macchina funziona su cinque assi e viene messa in funzione da un codice CAM per la produzione.

Il risultato che si ottiene è un componente dalla finitura non ottimale rispetto ai processi a letto di polvere, ma che non ha limitazioni dal punto di vista delle dimensioni poiché deposizione e fusione sono localizzate. Dei limiti si hanno dal punto di vista delle geometrie che possono essere realizzate, al momento molto più semplici rispetto ad altre tecnologie, e della finitura superficiale.

Il principale campo applicativo di questa tecnologia, al momento, è il processo di repairing.

1.3.3 Laser Powder Bed Fusion

Tra le tecniche elencate precedentemente, si vuole porre particolare attenzione su quella utilizzata per lo sviluppo di questo progetto di tesi.

Si parla della tecnologia *Laser Powder Bed Fusion* (LPBF), anche chiamata *Selective Laser Melting* (SLM).

Il laser viene indirizzato sul letto di polvere per fondere uno strato di materiale che rappresenta la sezione trasversale di un modello CAD e, di conseguenza, del componente da realizzare. Una volta fuso uno strato, si ristende la polvere per rigenerare il letto e permettere la fusione dello strato successivo tramite una lama che può essere in gomma o in metallo, e che è chiamata *recoater*. [18]

La polvere fusa sarà sicuramente molto minore rispetto a quella stesa per la generazione del letto e per questo, al termine del processo, è presente una grande quantità di polvere non fusa che dovrà essere aspirata e che potrà essere riutilizzata per i job successivi.

Si ha la completa fusione del materiale e, se il processo si svolge correttamente, si avrà una densità prossima al 100%.

Il processo si svolge all'interno di una camera chiusa con atmosfera inerte. Si ha un leggero vuoto dell'ordine di 10^{-1} MPa e si insuffla gas inerte come azoto o argon.

Con questa tecnica di produzione sono necessari i supporti sia per ancorare i componenti alla piattaforma che per sviluppare il prodotto in altezza. I supporti sono poi rimossi meccanicamente.

I volumi di lavoro di questa tecnologia sono legati alle dimensioni della camera. Via via si vanno sviluppando macchine più grandi ma in generale si considerano delle dimensioni di 500x500x500 mm.

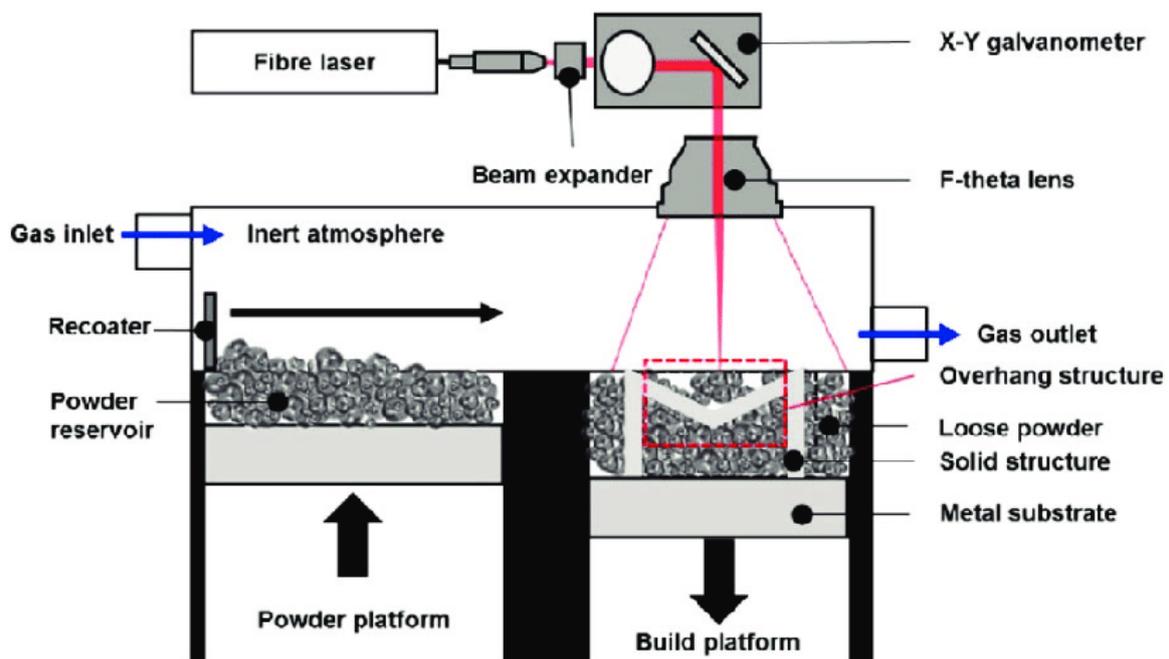


Figura 7 : Schema del processo Laser Powder Bed Fusion [19]

Il processo si può dividere in cinque fasi [20]

- Fase 1: abbassare la piattaforma modulare dello spessore impostato come input iniziale per la creazione dello strato successivo. In questa fase, si abbassa anche la piattaforma di dosaggio in modo tale che il *recoater* non incontri ostacoli fino alla fine della sua corsa.
- Fase 2: spostamento dell'applicatore per prepararlo alla stesura della polvere. Talvolta questa fase non c'è poiché la macchina ha due serbatoi di polvere presenti sia a sinistra che a destra della piattaforma e di conseguenza ha la possibilità di stendere sia da sinistra che da destra. Eliminando questa fase si eliminano dei tempi morti del processo poiché l'applicatore non ha bisogno di tornare indietro.
- Fase 3: è la fase di preparazione della polvere, ovvero la fase in cui la piattaforma di dosaggio si solleva per mettere a disposizione la quantità necessaria di polveri per stendere lo strato successivo. La quantità di polvere è un altro dei parametri di input che si impostano in fase di processo.

- Fase 4: stesura dello strato. L'applicatore si sposta e durante la corsa stende lo strato di polvere per la creazione dello strato da fondere. La polvere in eccesso viene spostata in questa fase in un contenitore presente all'interno della camera.
- Fase 5: esposizione. È la fase di produzione vera e propria. Lo scanner guida il raggio laser sulle zone da fondere seguendo delle traiettorie prestabilite. Il laser fornisce alla polvere con cui viene a contatto dell'energia data dall'assorbimento della radiazione che permetta la fusione del materiale. La polvere fusa si solidifica e si lega alle aree sottostanti del componente che già erano solidificate.

Parametri di processo

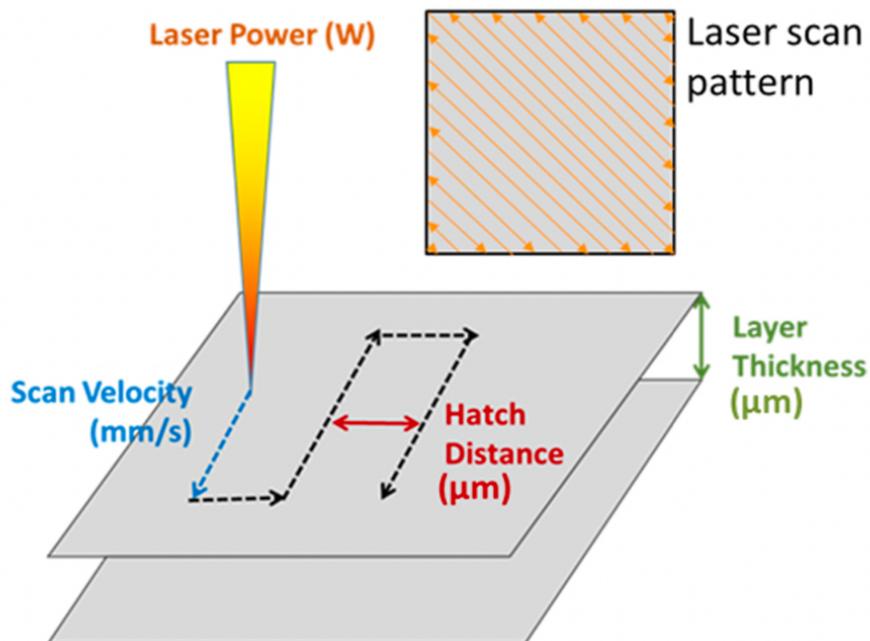


Figura 8 : Parametri di processo per la tecnologia L-PBF [21]

I principali parametri che è possibile regolare sono:

- La potenza del laser (W)
- La velocità di scansione (mm/s) che è strettamente legata al tempo di esposizione: maggiore è la velocità, minore è il tempo di esposizione e, dunque, la potenza termica fornita al materiale.
- L'hatch distance (μm) è la distanza tra due scansioni adiacenti della sorgente laser. Determina il grado di sovrapposizione delle passate e di conseguenza influenza la microstruttura finale del pezzo.[22]

- Point distance (μm) rappresenta la distanza tra due spot impulsivi del laser che, in realtà, non è continuo, ma è il risultato di impulsi successivi. È la distanza perpendicolare all'hatch distance.
- Layer thickness (μm) è lo spessore dello strato di polvere che viene steso dalla lama per la produzione. Ogni strato costruito avrà uno spessore preimpostato in fase di preparazione del job. Il Layer thickness può essere costante per tutto il job oppure adattativo, ovvero può variare in base alla geometria del componente lungo l'asse z.
- Scanning strategies sono tutte le strategie possibili da impostare per il percorso che deve effettuare il laser. In base alla strategia di scansione utilizzata, infatti, si possono avere risultati molto diversi dal punto di vista del raffreddamento del componente in produzione e, dunque, della microstruttura finale.

I parametri elencati, concorrono insieme alla definizione di due parametri indicativi della produzione:

- **Volumetric Energy Density** espressa in J/mm^3 , indica l'energia per unità di volume e correla la potenza della sorgente in W , con la velocità di scansione in mm/s , l'hatch distance in μm e il layer thickness in μm , secondo l'espressione che data da Singla et al. 2021 [23]

$$VED = \frac{Power}{Scan\ speed \times Hatch\ distance \times Layer\ thickness}$$

Sempre nello stesso studio si definiscono le variabili che entrano in gioco nella definizione di questo parametro come quelle usate come indici per identificare la presenza di difetti. L'obiettivo è quello di ottenere un componente più denso possibile, modulando al meglio i parametri.

- **Produttività** espressa in cm^3/h indica il volume prodotto in un'ora di lavoro e dipende dalla velocità di scansione, dall'hatch distance e dallo spessore del layer. Il valore si può calcolare con l'espressione

$$Productivity = 3,6 \times Scan\ speed \times Hatch\ distance \times Layer\ thickness$$

Con questo parametro è possibile avere un'idea preliminare sul costo del processo in termini di tempo.

Questi due parametri sono stati utilizzati nello sviluppo di questa tesi per valutare i migliori parametri da adottare per la produzione del componente del case-study.

Come detto da Oliveira et al. 2020, questi parametri fanno sì che ci siano infinite possibilità di combinazioni per la costruzione di ogni parte. In questo studio si è messo in evidenza il fatto che, molto spesso, si individua un set di parametri per ciascun materiale e non si tiene in considerazione il fatto che ogni componente possa avere delle esigenze di produzione diversa. Di conseguenza, non è ottimale avere un set di parametri ottimizzati al meglio per ciascuna features (come, ad esempio, pareti sottili o sezioni più spesse), per ciascuna performance o produttività richiesta.[21]

Nello studio si identifica, quindi, l'effetto che ha ciascun parametro sulla possibilità di avere difetti nel componente e come è possibile ottenere i risultati richiesti variando i parametri.

Prima di vedere questo, però, si vuole fare una panoramica dei possibili difetti che si possono trovare in un componente prodotto in AM con tecnologia LPBF.

Difetti

Come tutti i processi, la tecnologia SLM non è esente dai difetti di produzione. Una raccolta dei principali difetti che si possono incontrare in un componente stampato con tecnologia LPBF la forniscono Singla et al. nello studio *Selective laser melting of Ti6Al4V alloy: Process parameters, defects and post-treatments* del 2021 [23]. Questi sono:

- **Lack of fusion:** sono delle zone non fuse all'interno del componente. Si verificano principalmente nell'adesione tra uno strato e l'altro. Questa tipologia di difetti influenza la vita a fatica del componente poiché, come tutte le porosità che si generano nel processo, possono essere l'inizio dello sviluppo di cricche.
- **Gas Pores o Keyhole effect:** gas intrappolato nel processo di fusione, individuabile facilmente perché presenta una forma sferica
- **Staircase effect:** effetto scala che si può osservare sulla superficie laterale del pezzo. È il risultato della deposizione strato per strato lungo l'asse di costruzione. Questo

può causare anisotropia e delaminazione. La rappresenta il comportamento meccanico disomogeneo lungo gli assi. La seconda rappresenta il distacco degli strati che non si sono perfettamente saldati tra loro.

- **Non-equilibrium microstructure:** visti i gap termici a cui è sottoposto il materiale, si possono formare diverse fasi non stabili.
- **Balling phenomenon:** è la formazione di gocce sferiche di metallo che non si fondono con lo strato sottostante. È causato dalla scarsa bagnabilità del materiale e genera una superficie non omogenea e una conseguente cattiva deposizione degli strati di polvere successiva.
- **Evaporazione degli elementi in lega:** questo fenomeno può avvenire se l'energia fornita è troppo elevata per alcuni degli elementi presenti nella lega in fase di produzione.
- **Stress residui, distorsioni:** la tecnologia LPBF è una tecnologia a freddo. Per questo motivo si ha un gap termico molto repentino che può portare alla generazione di un componente con forti stress residui. La presenza di questi ultimi può essere un problema perché si possono generare distorsioni, delaminazioni, cricche.

Le distorsioni fanno sì che in molti casi il componente non sia valido rispetto alle tolleranze dimensionali richieste o che ci siano problemi per le lavorazioni successive o gli assemblaggi. La delaminazione è il fenomeno del distacco di strati successivi. Nel caso di una non perfetta fusione o di elevati stress residui si può manifestare.

1.4 Materiali per l'AM

Lo sviluppo delle tecnologie è seguito di pari passo dallo sviluppo di nuovi materiali. Dall'utilizzo di soli materiali polimerici si è passati alla produzione di materiali ad hoc per l'AM.

Le tecniche ad oggi esistenti permettono la lavorazione di una grande varietà di materiali differenti, processabili con tecnologie diverse.

Possiamo dividere i materiali in quattro famiglie principali:

- Materiali metallici, più in particolare leghe di alluminio, leghe ferrose, leghe nichel, leghe cobalto-cromo e leghe di titanio, che sono quello oggetto di questa tesi e che verranno trattate in modo più approfondito. I materiali metallici si possono trovare sotto forma di polveri prodotte per atomizzazione (solitamente a gas o al plasma) o in altre forme che non verranno trattate in questa tesi (fili, lamine sottili...).
- Materiali compositi che possono essere applicati in molti settori anche perché le loro caratteristiche sono modificabili in base alle esigenze necessarie. Sono formati da una base che può essere metallica o polimerica e da una seconda fase con proprietà molto diverse, sia fisiche che meccaniche, che solitamente è ceramica.
- Polimeri, possono essere sia termoplastici che resine termoindurenti e più in particolare fotopolimeri. Ciascuna tecnologia ha la possibilità di lavorare una certa tipologia di materiali
- Ceramici. Per questi materiali si parla più che di additive manufacturing, di 3D printing, ovvero un processo di formatura che non permette di ottenere un oggetto finito, ma che ha bisogno di una seconda fase di produzione. In questo caso è la fase di espulsione del legante e di sinterizzazione delle polveri.

1.4.1 Lega Ti6Al4V

Si vuole parlare nel dettaglio della lega utilizzata nel caso studio di questa tesi, per fornire alcune indicazioni sulle principali caratteristiche.

La lega Ti6Al4V è una lega di titanio molto diffusa e utilizzata nel campo dell'additive manufacturing. In generale, le leghe di titanio sono estremamente performanti e allo

stesso tempo hanno una densità bassa. Il titanio, inoltre, è un materiale biocompatibile e, infatti, si è fatto spazio in campo biomedico dove, in particolare la lega Ti6Al4V, ha trovato successo nella produzione di componenti di varia natura.

Le proprietà specifiche del titanio sono molto apprezzate, ma, la difficoltà nella lavorazione di queste leghe ha fatto sì che non venissero sfruttate al massimo con i processi di produzione tradizionali.

Il costo di estrazione e lavorazione non giustificava la scelta di tale materiale di circa un ordine di grandezza più costoso rispetto alle leghe metalliche più utilizzate. Questo è dovuto al fatto che, da un lato il titanio è un materiale molto plastico, ma, dall'altro, è molto resistente e duro e, di conseguenza, con gli utensili da taglio si riescono ad asportare solo poche quantità di materiale. In questo modo i tempi di produzione si allungano enormemente. [22]

In generale, il titanio è un materiale che si può presentare in due fasi diverse una dall'altra:

- Una fase α esagonale compatta
- Una fase β cubica a corpo centrato

La trasformazione tra la due fasi avviene a 885°C [24].

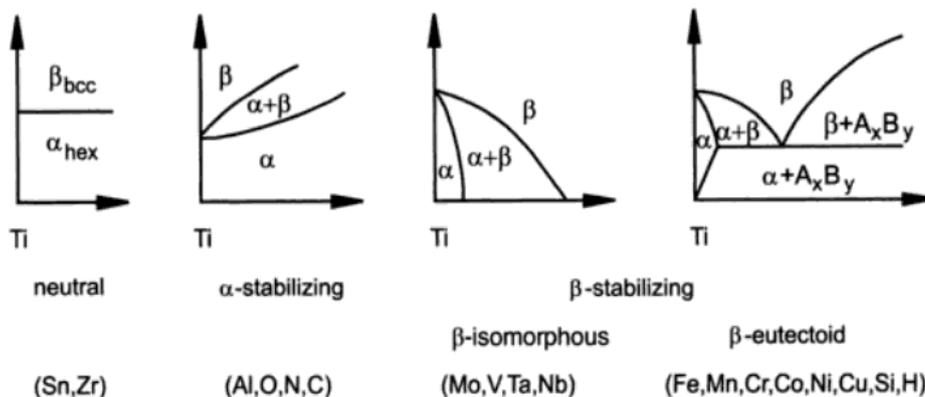


Figura 9 : Influenza degli elementi leganti sulle fasi delle leghe di titanio [25]

La Figura 9 è tratta dal libro "Titanium and Titanium Alloys: Fundamentals and Applications". È possibile osservare l'effetto degli elementi leganti nelle leghe in esame. Le leghe di titanio possono avere quantità differenti delle due fasi. Le leghe con maggior quantità di fase β hanno alta resistenza meccanica e bassa duttilità. Ad alte temperature però sono facilmente deformabili e sono trattabili termicamente.

Le leghe con maggior quantità di α non hanno una buona saldabilità ed è molto difficile trattarle termicamente, lavorano molto bene ad alta temperatura e hanno una buona resistenza alla corrosione, tuttavia, non hanno un'ottima resistenza meccanica. Esistono degli elementi che, in lega con il titanio, riescono a stabilizzare una fase rispetto all'altra. In base poi alla velocità di raffreddamento, le leghe possono avere quantità variabili di α e β . Gli elementi in lega e le velocità permettono, quindi, di avere proprietà modulabili.

Con l'additive manufacturing, e in particolare con la tecnologia L-PBF, la velocità di raffreddamento è molto elevata perché si passa da una temperatura di fusione attorno ai 2000°C a quella della camera che è di circa 200°C in questo modo le fasi non hanno tempo di formarsi ma si cristallizza immediatamente la condizione di alta temperatura. Si ottiene quindi una struttura molto fine con prevalenza di β . [22]

La lega Ti6Al4V è una lega di titanio leggera caratterizzata dall'aver delle eccellenti proprietà meccaniche e un'ottima resistenza alla corrosione, combinata a un basso peso specifico. Gli elementi in lega presenti sono l'alluminio e il vanadio. In particolare, il primo è α stabilizzante e il secondo è β stabilizzante. Le fasi presenti nel componente dipenderanno quindi dalla velocità di raffreddamento.

La composizione della lega è riportata nella *Tabella 1*. I dati sono stati ricavati dal datasheet fornito dall'azienda EOS [26]. È stata riportata questa composizione della polvere poiché è quella della polvere utilizzata per il case study.

Elemento	Min	Max
Al	5,5	6,75
V	3,5	4,5
O	-	0,2
N	-	0,05
C	-	0,08
H	-	0,015
Fe	-	0,3
Y	-	0,005
Other elements	-	0,4

Tabella 1 : Composizione chimica della lega Ti6Al4V

1.5 Design for AM

A questo punto, una volta viste le principali tecnologie e i materiali utilizzati nell'AM, fatto particolare attenzione sulla tecnologia L-PBF e sulla lega di titanio utilizzata, si vogliono introdurre i criteri fondamentali per la corretta progettazione di un componente da realizzare con l'utilizzo della fabbricazione additiva.

Lo sviluppo di un prodotto per AM ha delle forti differenze rispetto ai metodi tradizionali. I canoni di progettazione classica, infatti, vengono stravolti. I limiti al design sono pochi in questo caso, poiché sono pochi i limiti tecnologici.

È possibile basarsi su delle linee guida per la progettazione che sono, allo stesso tempo, sia gli obiettivi da perseguire, che le possibilità che si hanno a disposizione. Bisogna tenere a mente che, con le tecnologie di AM, è possibile ridurre il peso del materiale, riuscendo a posizionarlo solo dove è necessario. Per far ciò è necessario uno studio preventivo dei carichi in gioco, sia in termini di entità, che di direzioni. Sia per quanto riguarda la progettazione da zero che per l'ottimizzazione, si riescono ad ottenere oggetti snelli e funzionali.

Allo stesso modo, è possibile ottenere degli oggetti personalizzati, realizzati ad hoc per l'*end user*. Questo può essere un grande vantaggio in tanti campi. Si pensi alla produzione di protesi che si adattano perfettamente all'esigenza richiesta, o ancora la possibilità di creare oggetti unici, che si differenziano uno con l'altro, in un unico job. E così si possono realizzare componenti di qualunque tipo, come oggetti dalla porosità controllata, canali conformali per gli stampi, scambiatori di calore compatti, elementi articolati.

Proprio per quest'ultimo caso si hanno due possibilità: realizzare delle parti funzionali ripensando e ottimizzando la geometria del componente, oppure eliminare, o quantomeno ridurre, la fase di assemblaggio.

Si vogliono ora fornire delle regole di design da seguire quando si progetta per la tecnologia a letto di polvere, al momento che è la tecnologia utilizzata per la produzione del case study. [20]

È stato necessario, per un corretto studio del design, seguire alcune indicazioni dei produttori della macchina di seguito riportate.

Bisogna considerare, intanto, che questa tecnologia necessita l'uso dei supporti perché la polvere metallica non fornisce un sotto-strato sufficientemente resistente. Laddove si hanno superfici inclinate, è preferibile renderle auto-supportanti. In base al materiale che si utilizza ci sarà un angolo limite oltre il quale si avrà il collasso della parete o una superficie con una rugosità troppo elevata.

Lo stesso problema si presenta nella realizzazione dei fori. In base al materiale si avrà un'ampiezza del diametro limite, oltre la quale sarà necessario l'utilizzo dei supporti o la variazione della geometria del foro, in modo tale da rendere la parte superiore auto-supportante (forma a goccia).

Ogni qual volta si inseriscono i supporti è comunque fondamentale capire come questi vanno generati, dove vanno posizionati, quale tipologia utilizzare. Questo perché, una cattiva progettazione dei supporti può rendere la fase di post-processing troppo onerosa. È necessario ricordare che questi limiti possono essere aggirati, riflettendo sulla funzionalità degli elementi. Un esempio è fornito in *Figura 10*.

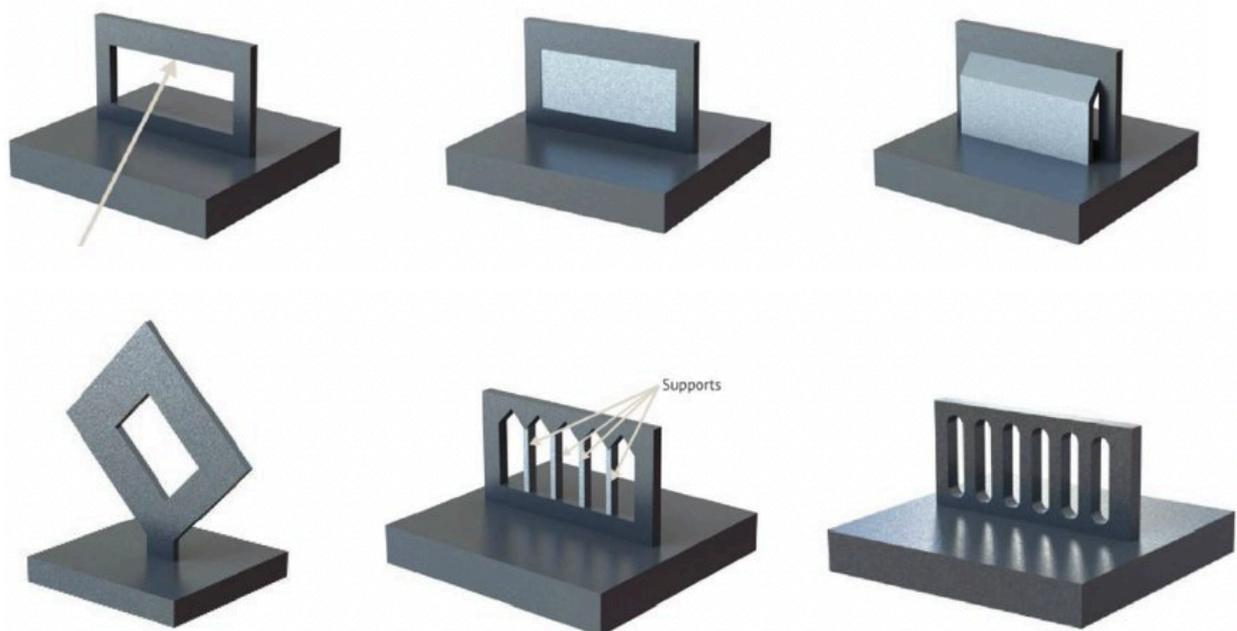


Figura 10 : Esempi di soluzioni tecnologiche per la produzione di componenti in AM, seguendo le regole del DfAM [20]

Il foro in questo caso può prevedere i supporti o essere modificato in modo tale da non renderli necessari.

1.6 Vantaggi, svantaggi ed esempi applicativi

I campi applicativi dell'additive manufacturing sono di giorno in giorno sempre maggiori. A partire dalla prototipazione rapida, come visto in precedenza, si è arrivati a vedere l'additive come un vero e proprio sistema di produzione per ottenere componenti finiti o semi finiti.

L'AM viene scelto da chi vuole realizzare un componente dalle geometrie complesse, laddove, quindi, i metodi tradizionali supererebbero per costi e tempi di produzione la fabbricazione additiva.

Un vantaggio che l'AM offre è sicuramente la variabilità che si può avere in pochissimo tempo, anche all'interno di uno stesso job di produzione. Questo permette a chi lo utilizza di produrre solo ciò che serve, quando serve, evitando quindi di avere eccessi di produzione e dunque una saturazione del magazzino.

In questo senso due mondi che da subito hanno saputo sfruttare le potenzialità dell'AM sono sicuramente il settore aerospaziale e quello biomedico: in campo aerospaziale la leggerezza data dalle nuove geometrie, e la possibilità di utilizzare materiali con resistenza elevata, sia meccanica, che termica, che alla corrosione, sono stati dei fattori molto influenti. Nel settore biomedico sono spesso richieste determinate caratteristiche che con l'additive manufacturing, specialmente utilizzando laser o la fusione dei metalli con fascio di elettroni (EBM), è possibile accontentare. Un esempio è la realizzazione di strutture ossee. Queste strutture sono in grado di emulare la rigidità delle ossa e di sopportare i livelli di stress a cui sono sottoposte. È possibile far fronte alla crescita e al cambiamento della struttura ossea.

Questi sono solo due esempi, ma ad oggi sono moltissime le applicazioni. Il mondo dell'automotive ne è sicuramente un ulteriore esempio: dall'utilizzo solo nel motorsport oggi ci sono sempre più esempi di component "stampati" in AM.

L'additive, inoltre, sta trovando grande spazio nell'ottimizzazione dello scambio termico. Esempi li si possono trovare nella produzione di scambiatori di calore dove, sfruttando la complessità geometrica, è possibile aumentare le superfici di scambio termico rendendo comunque lo scambiatore molto performante. Un ragionamento simile lo si può fare parlando di canali conformali negli stampi: la fabbricazione additiva permette di realizzare canali interni agli stampi delle geometrie più

complesse. In questo modo si efficientano al massimo lo scambio termico e i tempi di produzione.

Le potenzialità dell'additive manufacturing vengono di giorno in giorno implementate, aprendo le porte a molteplici produzioni. Questo è perché nell'AM vengono visti diversi vantaggi come la libertà di progettazione, la possibilità di avere strutture leggere, il fatto che è un processo quasi del tutto automatico e che i tempi e i costi sono legati più alla dimensione che alla complessità del prodotto.

Un altro grande vantaggio dell'additive manufacturing è la possibilità di realizzare componenti eliminando o, quantomeno, riducendo la fase di assemblaggio.

Di contro, ci sono alcuni aspetti da considerare. I volumi di lavoro sono limitati alle dimensioni della macchina; la finitura superficiale, soprattutto per quanto riguarda le tecnologie metalliche, non è ottima, e in base alle necessità si deve ricorrere a una fase di post-processing; i materiali commerciali attualmente disponibili non sono tanti quanti quelli per le tecnologie tradizionali; la conoscenza del processo non è ancora così approfondita da conoscerne ogni sua sfaccettatura. Spesso si hanno degli intoppi dovuti al fatto che il know-how necessario è piuttosto elevato.

Sicuramente, ad oggi, tra le tecniche di produzione tradizionali, l'AM si sta ponendo come un buon sostituto del casting. Le caratteristiche del prodotto finito sono assimilabili tra le due tecnologie messe a confronto.

Tra i vantaggi dell'AM sicuramente c'è sicuramente la customizzazione dei componenti. Anche per questo motivo, uno dei campi emergenti in cui si sta facendo spazio la produzione è quello della gioielleria. Inizialmente utilizzate per la produzione di modelli a perdere e di stampi. Oggi, invece, si stanno facendo degli studi per la produzione con tecnologie con materiali metallici.

CAPITOLO 2 - STATO DELL'ARTE

2.1 I “*non-assembly mechanisms*”

Messe in luce le principali caratteristiche del mondo dell'additive manufacturing, si vuole ora spostare l'attenzione su alcuni punti in particolare.

L'oggetto di questa tesi è, infatti, la produzione di un “*non-assembly mechanism*”. Un vantaggio dell'additive manufacturing è quello di poter realizzare un componente eliminando la fase dell'assemblaggio. Questo significherebbe evitare uno step produttivo che, in alcuni casi, può essere molto dispendioso in termini di tempi e costi. In questo capitolo si vuole esaminare lo stato dell'arte della produzione di *non-assembly mechanisms* con l'utilizzo delle tecnologie additive in modo da poter inserire il case-study esaminato all'interno del contesto attuale.

La definizione di “*non-assembly mechanism*” è stata introdotta da Mavroidis et al. nel 2001 nello studio dal titolo “*Fabrication of Non-Assembly Mechanisms and Robotic Systems Using Rapid Prototyping*” [27]. In esso si utilizza questo termine per definire meccanismi e sistemi robotici la cui struttura articolata è costruita in un solo step, grazie all'utilizzo della prototipazione rapida. Lo studio tratta, dunque, la possibilità di costruire prototipi funzionali con l'utilizzo di tecnologie quali la Stereolitografia (SLA) e la Selective Laser Sintering (SLS) e, quindi, in polimero.

Nell'articolo proposto, l'iter operativo necessario per ottenere un meccanismo completo, ha visto, inizialmente, lo studio delle diverse tipologie di giunti singolarmente, in modo tale da valutarne la processabilità e la mobilità.

Da questo primo esempio, sono state colte le potenzialità dell'additive manufacturing in questo settore e sono stati studiati i possibili utilizzi.

Come si è visto nel primo capitolo, la prototipazione rapida, storicamente, è stata una fase molto importante nello sviluppo dell'AM. Anche in questo particolare caso, infatti, l'obiettivo principale, inizialmente, era quello di poter avere prototipi fisici e valutare la funzionalità dei componenti assemblati. La produzione di sistemi robotici è stata una delle principali applicazioni iniziali dei *non-assembly mechanisms*, poiché era possibile, in pochissimo tempo, provare diversi design e valutare diversi aspetti

come l'area di lavoro occupata, l'interferenza tra i collegamenti e i limiti del giunto [27].

Così come è successo più in generale per l'intero sistema di produzione, anche in questo caso, si è passati, dall'utilizzo dell'AM per la sola prototipazione rapida, alla volontà di realizzare produzioni vere e proprie. L'eliminazione di un passaggio nella linea di produzione, infatti, rende l'AM molto competitivo.

Definito che cos'è un non-assembly mechanism, si vuole proporre una possibile classificazione di questi, utilizzando quella fornita da Lussenburg et al. nello studio "*Design of non-assembly mechanisms: A state-of-the-art review*" [28]. In esso si ha dapprima una distinzione tra strutture rigide e meccanismi e poi una classificazione di questi ultimi in diverse sottocategorie in base alla produzione.

Per le strutture rigide si può parlare principalmente di *part consolidation* ovvero passare dall'avere più componenti a uno dalla geometria più complessa che abbia la stessa funzione.

I meccanismi mobili, invece, richiedono la fase di assemblaggio, dal momento che le diverse parti compiono dei movimenti relativi tra loro.

Le tre modalità di produzione di un componente articolato con tecnologie additive, descritte nello studio sono:

- *Traditional approach* ovvero la produzione dei pezzi separatamente e il successivo assemblaggio di questi in un meccanismo;
- *Embedded assembly*: più componenti vengono incorporati all'interno di oggetti 3D durante la fase di produzione;
- *Fully functional assemblies*: componenti prodotti in un singolo step di produzione, eliminando del tutto la fase di assemblaggio.

È evidente osservare come il primo caso non apporti molti miglioramenti se non un'eventuale riduzione del *lead time*. Un *traditional approach*, però, non rende il sistema di produzione competitivo poiché non ne vengono sfruttate a pieno le potenzialità.

In quest'analisi, infatti, ci si vuole concentrare principalmente sulle altre due modalità di produzione.

Il caso studio analizzato, nel campo della gioielleria, appartiene alla categoria dei meccanismi mobili Fully Functional assemblies. Il componente è semi-finito appena uscito dalla macchina.

Ciò che viene sottolineato da Lussenburg et al. è che la funzionalità di un meccanismo mobile può essere raggiunta in diversi modi: ottimizzando la geometria del sistema di giunzione, sfruttando le caratteristiche del materiale, o basandosi su dei pattern ripetuti più volte. L'importante è avere chiaro qual è l'obiettivo da perseguire nel processo di re-design: la funzionalità del meccanismo.

2.2 Esempi applicativi

In letteratura sono presenti molti esempi di casi di re-design for additive manufacturing per *non-assembly components*. Si vogliono riportare alcuni esempi per analizzare i pro e i contro di questo metodo di produzione.

La ricerca bibliografica è stata fatta utilizzando prevalentemente le risorse online presenti nella raccolta della biblioteca del Politecnico di Torino. Alcune fonti, invece, sono state reperite in rete.

Proseguendo in linea temporale, vengono riportati alcuni studi fatti in questo campo in modo tale da avere una panoramica dell'evoluzione delle tecnologie e dei metodi di produzione applicati.

Come già anticipato, il primo utilizzo della realizzazione di un componente, abolendo la fase di assemblaggio, è stato fatto per poter realizzare prototipi in tempi rapidi di elementi robotici [27]. Mavroidis et al., utilizzando un processo trial and error, ha realizzato diverse tipologie di giunti utilizzando la SLA e la SLS, valutando alcune tra le più importanti caratteristiche che il giunto deve avere: il gioco dell'accoppiamento, le dimensioni del giunto, le strutture di supporto necessarie per la produzione con la tecnologia utilizzata. In *Figura 11* è possibile osservare le diverse tipologie di giunti che sono state analizzate nello studio, avendo anche un'idea delle dimensioni raggiunte utilizzando materiali polimerici e tecnologie che permettono una buona qualità del prodotto finito.

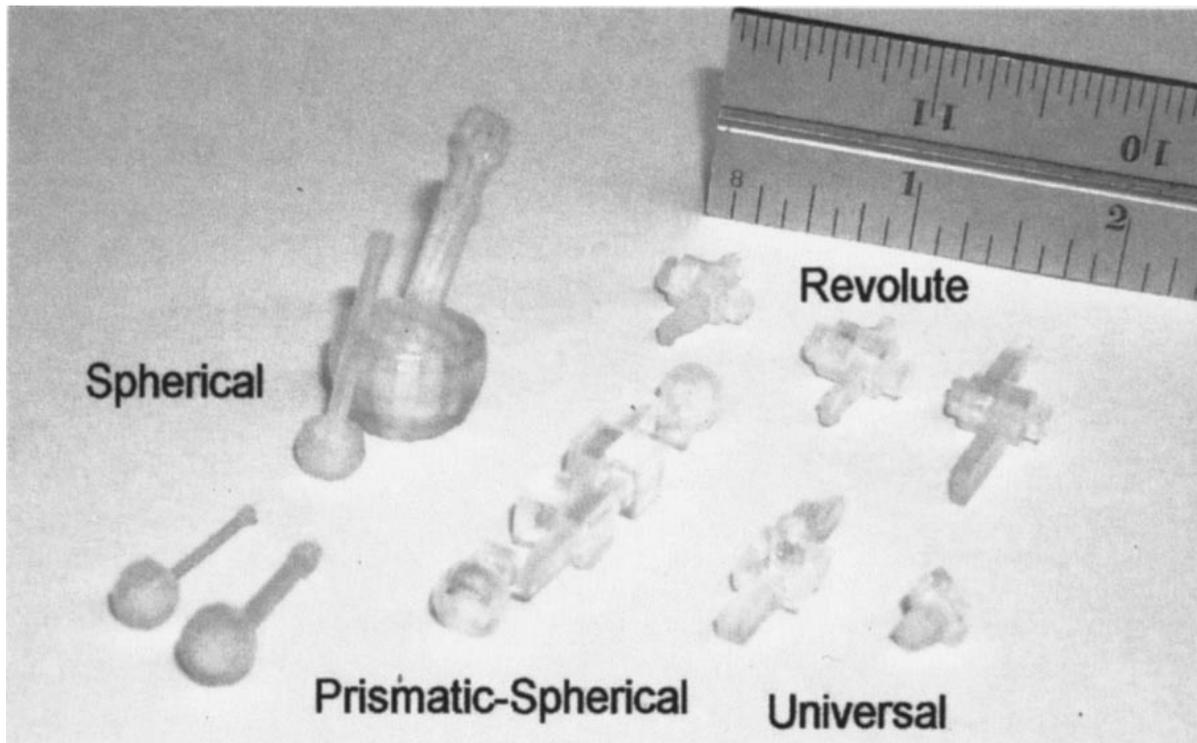


Figura 11 : Tipologie di giunti prodotti con SLA e SLS [27]

Nell'analisi di meccanismi articolati, un fattore molto importante è dunque quello del gioco tra gli elementi. In base alle applicazioni è necessario che questo sia ben definito in base alla funzionalità del meccanismo.

Per la produzione in AM, però, a seconda della tecnologia utilizzata, il processo può essere più o meno preciso e di conseguenza è difficile stabilire un valore di gioco minimo che vada bene sempre.

Il gioco, inoltre, dipende dall'orientamento del componente all'interno della macchina. In alcuni casi, laddove sono necessari i supporti, nonostante si possa raggiungere un valore minimo molto basso, questo va poi aumentato per permettere la rimozione del materiale di scarto.

Come affermato da Chen et al. 2011, la mobilità del giunto è fortemente dipendente dal gioco assegnato: un gioco piccolo potrebbe non permettere la mobilità voluta, ma un gioco troppo grande potrebbe causare vibrazioni e instabilità. [29] Nello studio *Minimise joint clearance in rapid fabrication of non-assembly mechanisms* viene proposto un metodo per cercare di ridurre il gioco, mantenendo allo stesso tempo la mobilità del giunto prodotto in AM. Lo studio prevede l'analisi di *pin joints* dove il gioco è definito dalla differenza tra il raggio esterno e il raggio interno:

$$\Delta R = R_e - R_i$$

Per metter in relazione la forza di contatto del giunto e il gioco, viene utilizzato il modello di Hertz che calcola lo spostamento dovuto al contatto definito dall'equazione:

$$\delta = \frac{2 P}{\pi E^*} \left\{ \ln \left(\frac{\pi E^* \Delta R}{P} \right) - 1 \right\}$$

Supponendo la forza di contatto costante, il δ dipende non linearmente dall'aumento del gioco che, dunque, dovrebbe essere ridotto al valore minore.

L'obiettivo è quindi quello di minimizzare il gioco del giunto, utilizzando una tecnologia adatta al *rapid prototyping*.

Il processo di selezione del gioco minimo che è stato applicato, anche in questo caso, è un processo *trial and error* partito da un valore di ΔR di 1 mm e diminuendo di 0,1 mm in ciascuna prova successiva finché non era più permessa la mobilità. A quel punto hanno proceduto aumentando il gioco di 0,05 mm alla volta fino a ottenere la mobilità voluta.

Lo studio, in particolare, è stato testato utilizzando come tecnologia il Poliject e provando quattro diverse geometrie di pin che si differenziano in termini di tensioni a cui sono sottoposti. I pin proposti sono visibili in *Figura 12*.

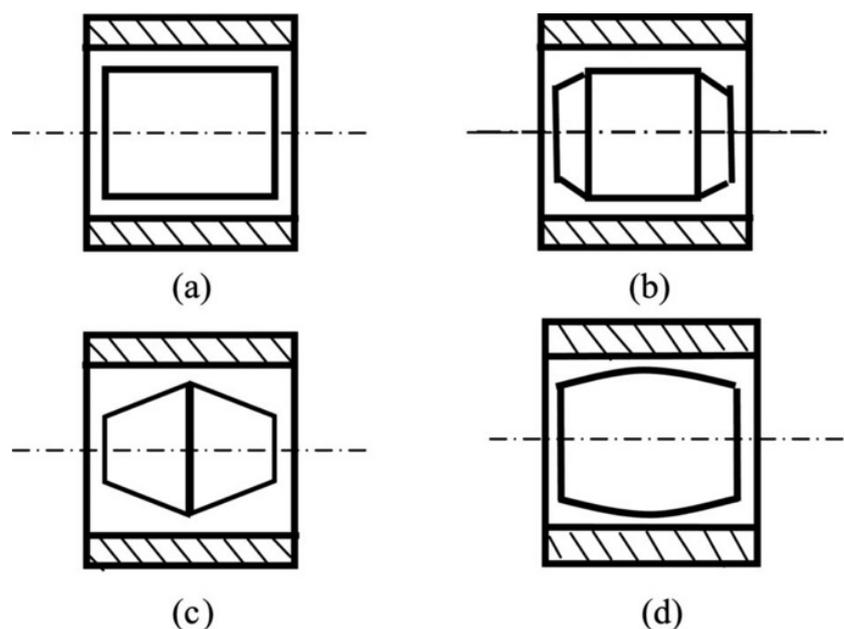


Figura 12 : Quattro geometrie di pin joints - (a)tradizionale; (b) bordi smussati; (c) doppio cono; (d) drum-shaped [29]

Tra le quattro geometrie proposte, si è visto che, quella che permette di ottenere un gioco minimo e una buona distribuzione dei carichi è la forma a tamburo. È stato selezionato questo come il miglior compromesso tra mobilità e resistenza del giunto.

Determinare le dimensioni dei giochi è uno dei fattori principali per la progettazione di un meccanismo costituito da più elementi assemblati tra loro.

Oltre a questo fattore, un altro che va considerato è quello dei supporti: bisogna prevederne la modalità di rimozione quando il gioco è piccolo.

Di questo argomento tratta l'articolo *Direct fabrication of joints based on direct metal laser sintering in aluminum and titanium alloys* di Calignano et al. 2014, che mette in risalto il fattore dell'orientamento del componente in macchina per una buona resa del prodotto finito.[30]

Nello studio vengono realizzati dei meccanismi in lega di titanio e in lega di alluminio con L-PBF. L'obiettivo è quello di trovare delle soluzioni per avere un gioco piccolo, mantenendo la mobilità dei meccanismi e quindi cercando di eliminare il materiale che si interporrebbe all'interno del giunto. In particolare, sono stati realizzati due componenti:

- Un pin convesso con una sede concava in lega di titanio
- Un rotismo semplice in lega di alluminio

Entrambi sono stati realizzati considerando diversi valori di gioco, variabili tra 0,12 mm e 0,08 mm scendendo via via di 0,02 mm.

Gli esempi sono visibili in figura insieme all'orientazione utilizzata per realizzarli e i supporti che ne conseguono

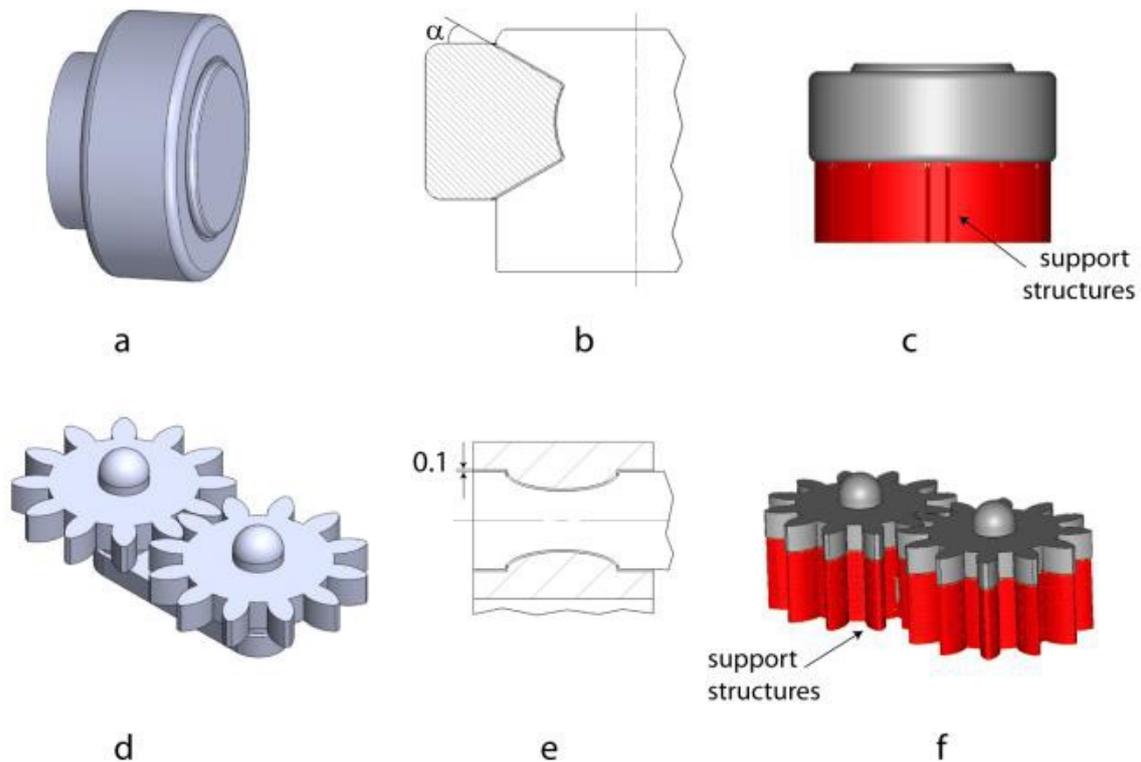


Figura 13 : Influenza dell'orientamento in macchina per la realizzazione di meccanismi non assemblati [30]

Da questo studio è emerso che la mobilità e la stabilità del giunto dipende fortemente dal gioco assegnato. Inoltre, si nota una differenza tra le leghe utilizzate in merito alla rugosità superficiale: le leghe di titanio hanno una superficie meno rugosa delle leghe di alluminio.

Un'altra importante differenza è il ritiro volumetrico. Di conseguenza è difficile assegnare un gioco esatto. In titanio si ha una maggiore definizione che permette un movimento più fluido tra le parti. Il gioco con l'alluminio tende a incrementare durante l'uso per un maggiore deterioramento del metallo e di conseguenza il giunto potrebbe diventare instabile.

Un problema della realizzazione di componenti assemblati con fabbricazione additiva messo in luce in questo studio è che non è possibile separare le parti e fare un post-processing sulla superficie; il risultato di rugosità superficiale sarà quindi quello *as-built* e si avrà la cosiddetta *friction* tra le superfici. Questo è sicuramente uno dei maggiori limiti di questa applicazione: spesso è richiesta una mobilità ben precisa e, una superficie così irregolare potrebbe non soddisfare i requisiti funzionali del componente.

La possibilità di realizzare componenti multiarticolati ha scaturito l'interesse di sempre più gruppi di ricerca.

Nello studio di Cuellar et al. 2018 viene presentata una panoramica dell'applicazione delle tecnologie di additive manufacturing nella fabbricazione di "*non-assembly multi-articulated mechanisms*" analizzandone vantaggi e svantaggi. [31] Lo studio presenta una spiegazione sui giunti rigidi, sui *compliant joints* e sugli *embedded assembly*, presentando diverse possibili applicazioni e per ciascuno di questi i limiti della produzione con processi AM.

In particolare, in merito alla produzione a letto di polvere metallica, si mettono in luce quali sono le principali problematiche, evidenziando che i parametri di processo influiscono sulla produzione.

La velocità di scansione, per esempio, è direttamente correlata all'energia impiegata nella fusione e, qualora fosse eccessiva, si avrebbe una fusione della polvere del gioco. Si pone dunque l'attenzione sul fatto che il gioco minimo ottenibile dipende dalla dimensione delle particelle di polvere e dalla VED utilizzata per la produzione del job. In più, come visto in precedenza, c'è il fattore dell'orientazione del componente in macchina. Come detto, all'interno dello studio, oltre ai giunti rigidi, vengono trattati anche i *compliant joints*, ovvero i giunti mobili tramite deformazione elastica dei componenti e gli *embedded assembly*, ovvero quei meccanismi all'interno dei quali, durante la produzione, vengono inseriti altri componenti quali sensori, o altre parti funzionali.

La conclusione a cui si giunge è comunque che la produzione in un solo step, utilizzando le tecnologie AM, presentano diversi risultati in base al tipo di tecnologia utilizzata. La scarsa conoscenza dei risultati in termini di proprietà e di precisione, sono dei fattori fondamentali, risolti i quali si potrà sicuramente produrre con maggior successo un oggetto articolato.

In alternativa, utilizzare nuovi design innovativi potrebbe stravolgere totalmente la visione dei meccanismi e riuscire a ottenere gli stessi movimenti con geometrie impensabili da realizzare con i sistemi tradizionali.

Degli esempi sono riportati nell'elaborato *3D printing of twisting and rotational bistable structures with tuning elements*, studio nel quale vengono ridisegnati dei giunti rotazionali in polimero sfruttando l'elasticità del materiale per raggiungere i requisiti funzionali. [32] In *Figura 14* è riportato un esempio dei componenti realizzati.

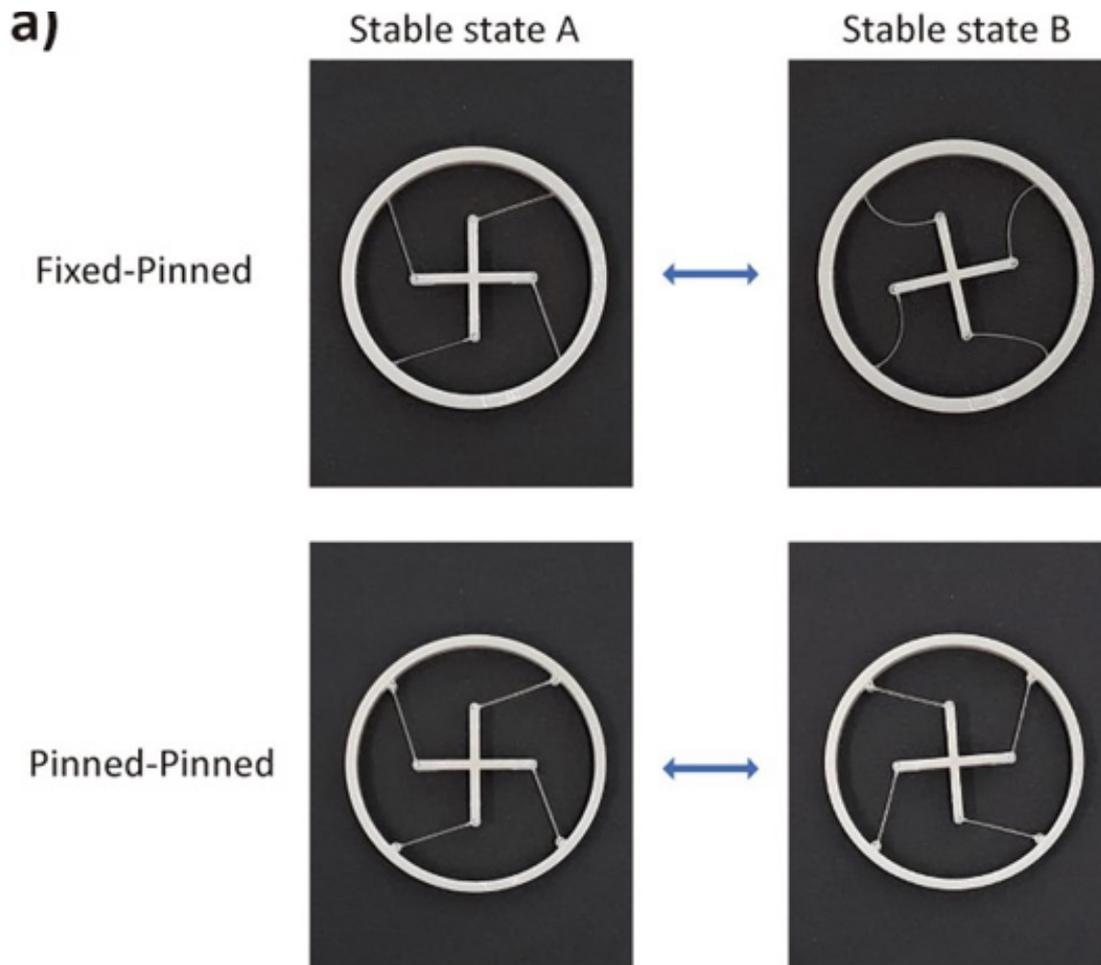


Figura 14 : Esempio di redesign di un giunto rotazionale [32]

Un ulteriore esempio di cosa si può fare sfruttando l'AM come tecnica di produzione è riportato nello studio di Ercolini et al. 2021 nel quale è stato riprogettato un giunto cantilever. [33] Il giunto è stato in questo caso riprogettato per essere prodotto in L-PBF. Un primo esempio è stato fatto ottimizzando il giunto per la tecnologia in esame, per poi ridisegnare completamente il componente preservando solo la funzionalità di quello originale. Nel primo caso è stata semplicemente rimossa la fase di assemblaggio, nel secondo caso è stato possibile sviluppare il componente come un pezzo unico, alleggerendolo del 40 % rispetto all' originale.

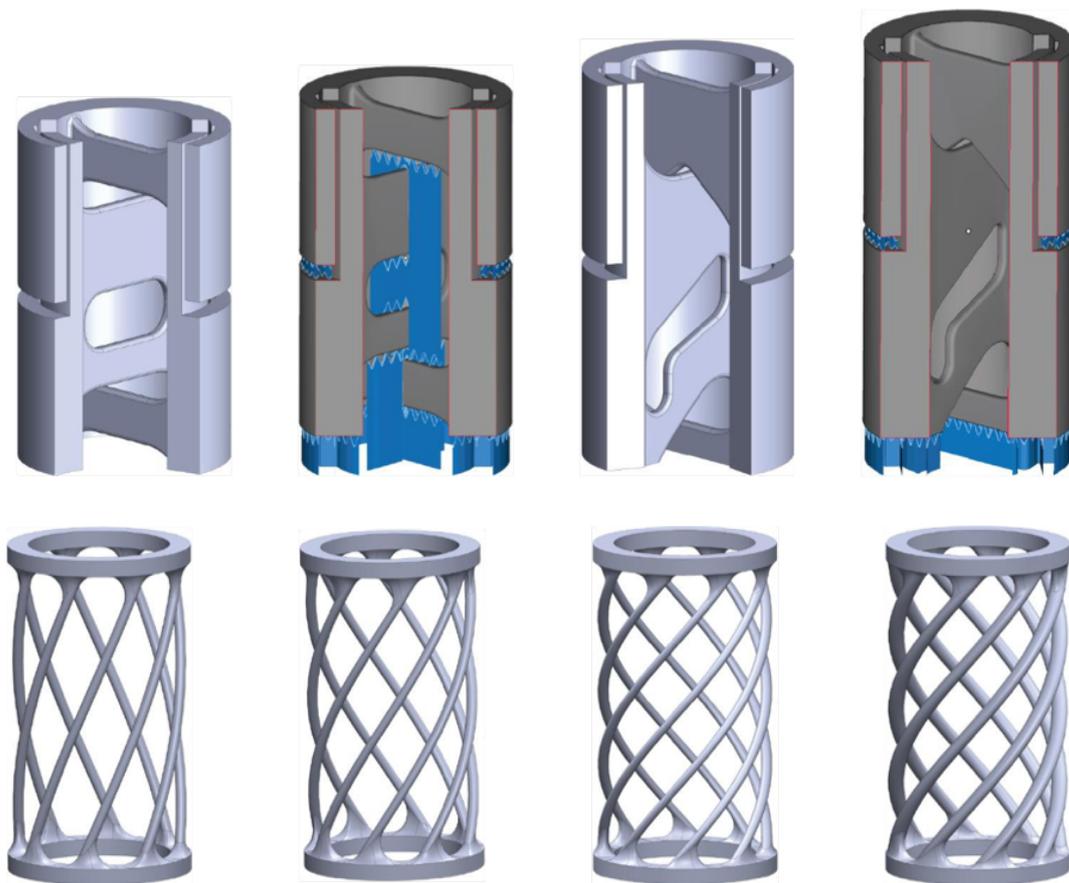


Figura 15 : Ottimizzazione per la produzione (in alto) e redesign di un giunto a flessione [33]

2.3 Classificazione dei meccanismi non assemblati

Per concludere la valutazione del panorama in cui è inserito il caso studio oggetto di questa tesi, si vuole riportare la classificazione dei *non-assembly mechanisms* fornita da Lussenburg et al. e riportata nel diagramma di *Figura 16*.

Una classificazione riassuntiva dei meccanismi esaminati può essere fatta andando a valutare i mezzi attraverso i quali si raggiunge la funzionalità voluta del componente.

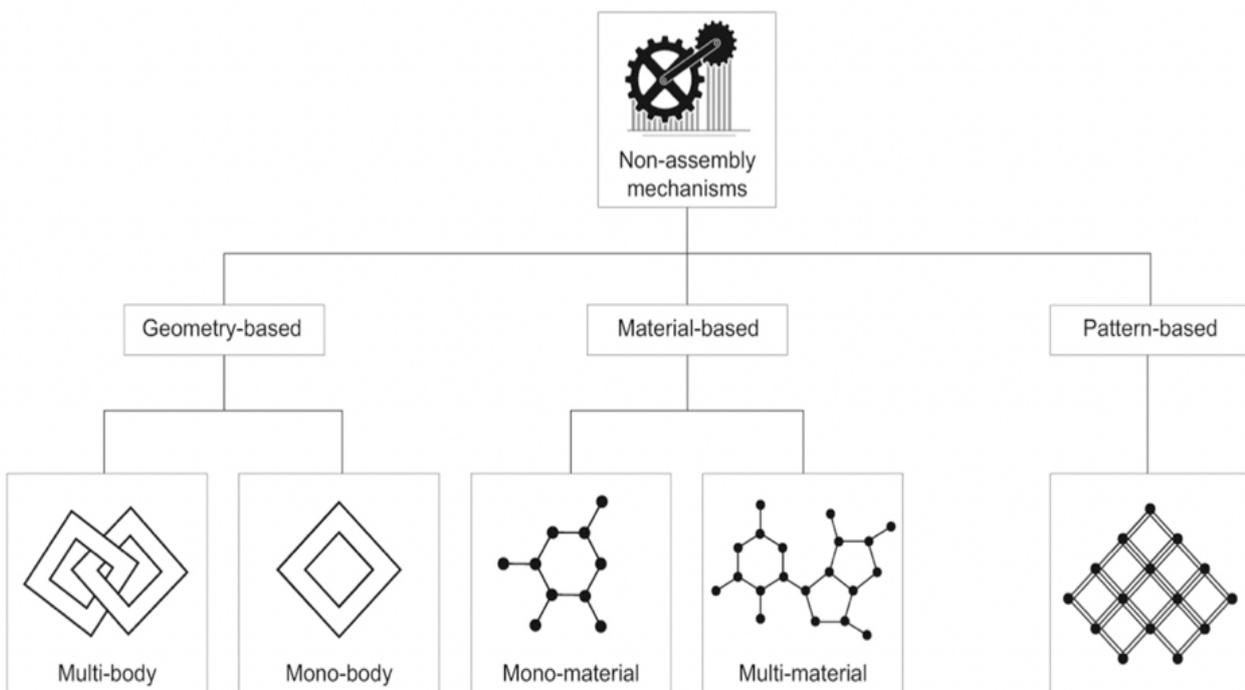


Figura 16 : Classificazione dei non-assembly mechanisms [28]

I meccanismi *Geometry-based* sono quelli la cui funzionalità si basa principalmente sulla geometria del giunto, che può essere formato da un solo corpo o da più corpi combinati fra loro. In *Figura 17* si riportano degli esempi:

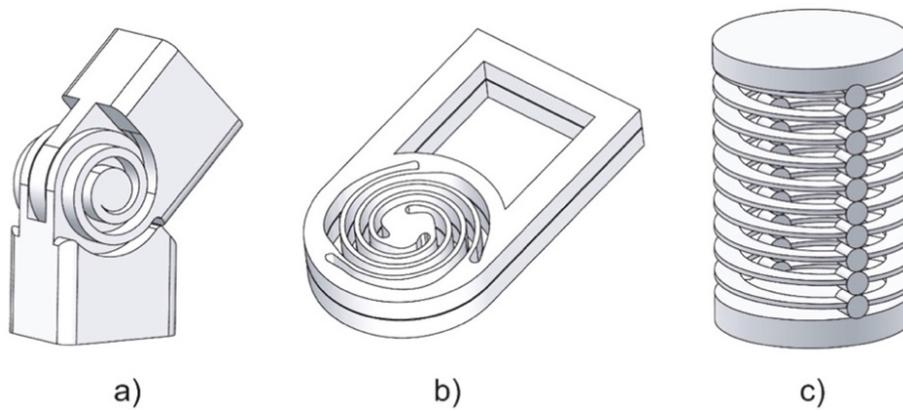


Figura 17 : Esempi di meccanismi *Geometry-based* [28]

I *Material-based mechanism* sono quei giunti nei quali il materiale è il principale responsabile per la funzionalità. Questo si può raggiungere sfruttando la flessibilità di un solo materiale o combinando più materiali fra loro, rigidi e flessibili.

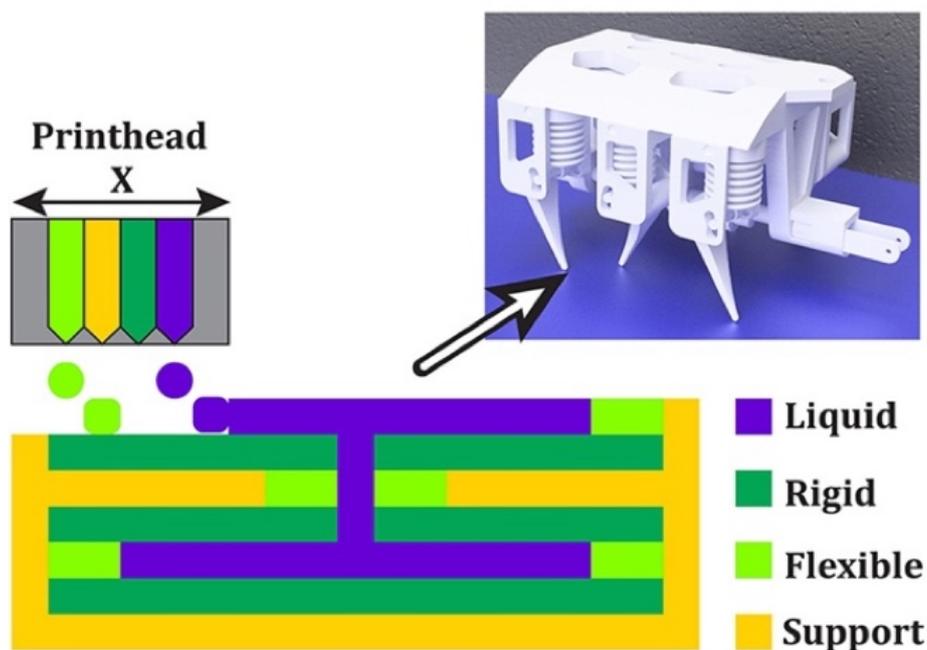


Figura 18 : Esempi di meccanismi *Material-based* [28]

I *Pattern-based mechanisms* sono quei componenti nei quali si ripete una singola geometria base, responsabile della funzionalità del componente.



Figura 19 : Esempi di meccanismi Pattern-based [28]

L'oggetto di questa tesi può essere considerato un *Fully-functional assemblies, geometry-based*. Il bracciale esaminato, infatti, è stato ridisegnato per essere prodotto in un singolo step di produzione, già assemblato. La sua funzionalità, inoltre, è data dalla geometria dei giunti studiati per avere la mobilità voluta.

CAPITOLO 3 - CASE STUDY

3.1 L'AM per la gioielleria

A questo punto, dopo aver esposto le principali caratteristiche dell'Additive manufacturing e aver evidenziato i principali aspetti della produzione di componenti articolati, sono state applicate le considerazioni sviluppate in un particolare caso studio.

Come accennato nel primo capitolo, uno dei campi in cui può essere applicato l'AM, è quello della gioielleria. Non avere limiti dal punto di vista del design e la possibilità di customizzare ogni prodotto, sono due dei vantaggi di questo sistema di produzione che si sposano perfettamente con le esigenze di questo mondo.

Diversi sono gli esempi di studi fatti sulla produzione di gioielli con differenti tecnologie additive.

Come primo esempio non può che essere riportato il caso della produzione di forme complesse in polimero per la generazione degli stampi in gesso. Di questo si parla nell'articolo "*Design and manufacturing titanium jewellery through additive and conversion technologies*" dove, un file CAD 3D viene prodotto in Stereolitografia per avere il prototipo iniziale del gioiello che si vuole ottenere. [34] Questo viene poi utilizzato per realizzare uno stampo in alluminio per la produzione delle cere del gioiello. A loro volta le cere vengono montate su un albero per la creazione della forma in gesso, e di seguito eliminate per avere la forma per la fusione del titanio.

Il vantaggio dell'additive manufacturing in questo caso sta nella velocità di produzione del modello iniziale, che può essere trasformato in poco tempo da un file CAD 3D a un oggetto reale.

È possibile, però, utilizzare l'AM non solo per la produzione del modello per lo stampo, ma direttamente per il gioiello finale. Nella rivista Metal AM viene introdotto questo argomento. Attraverso degli esempi di produttori di gioielli che si sono affacciati all'AM, in questo articolo vengono messo in luce le potenzialità e le limitazioni dell'utilizzo dell'AM.[35]

A esporre la questione sono i produttori stessi. Nell'articolo viene intervistato Ivano Torresan, CEO di Nuovi Gioielli che dice che non è importante cambiare interamente

i sistemi di produzione, ma, andare ad analizzare dove conviene e dove no. Non sempre, infatti, spostarsi sull'AM è la scelta vincente. Non risulta conveniente laddove i componenti possono essere perfettamente prodotti con le tecniche tradizionali. Va considerata, invece, quando diventa un mezzo per permettere ai designers di realizzare qualcosa di non realizzabile con altre tecnologie.

La tesi viene poi confermata anche da Damiano Zito, CEO di Progold S.p.A, che aggiunge che una potenzialità riguarda anche i materiali utilizzabili. Talvolta, ciò che è molto difficile da processare con le tecniche tradizionali, come il platino o il titanio, in AM risulta più semplice.

All'interno dell'articolo emerge anche il principale problema attualmente presente per l'utilizzo dell'AM per la produzione di gioielli, ovvero la qualità superficiale ottenibile, considerata ancora troppo bassa per questo tipo di applicazione.

Una vera e propria analisi di produzione è stata fatta da Bulgari nel 2016.[36] Lo studio portato avanti ha visto l'SLM come tecnica da esaminare per gioielli in materiali preziosi, confrontandola con una tecnica più nota quale il *direct casting*. Un esempio è riportato in *Figura 20*.



Figura 20 : Dettaglio di un gioiello prodotto con due tecnologie: direct casting a sinistra e SLM a destra, as built e dopo una fase di post-processing.[36]

La conclusione che ha seguito lo studio di questo benchmark è stata che la tecnologia è pronta e utile per la produzione di prototipi e piccole produzioni, ma che per la messa in serie è necessario un maggiore controllo e maggiore ripetibilità del processo. Per raggiungere questo risultato, ciò che loro hanno evidenziato come strumento utile

è quello della simulazione. Poter simulare il processo, così come per gli altri sistemi di produzione, permette di evitare alti costi per la fase di *testing*.

Sono molte le aziende di questo settore che stanno esplorando l'utilizzo dell'additive manufacturing nella loro produzione. Come si è visto, è stata individuata l'SLM come una promettente tecnologia per processare i materiali metallici, anche pregiati. Questo ha dei motivi che rientrano nelle peculiarità di questo sistema di produzione.

SLM è più precisa di altre tecnologie, la rugosità superficiale tipica, che varia in base al materiale utilizzato e ai parametri di processo applicati, può essere nell'intorno di 5-15 μm .

Alcuni esempi di gioielli prodotti in AM sono riportati in *Figura 21 e Figura 22* in riferimento all'articolo presente sulla rivista Metal AM.



Figura 21 : Sulla sinistra: "Platinum designs in the Nautilus range by Nuovi Gioielli"; Sulla destra: "Zip bracelet in 18 Kt gold, additively manufactured by Nuovi Gioielli, makes maximum use of the design freedoms offered by the technology" [35]



Figura 22 : "An additively manufactured 18 Kt necklace by Nuovi Gioielli from the 'Sound of Wings' collection" [35]

Tra le industrie che si stanno affacciando alla possibilità di produrre gioielli con LPBF si trova anche BMC S.p.A., un'azienda nata nel 2001, con sede a Valenza (AL) che opera nel campo della gioielleria.

BMC S.p.A. si è rivolta al CIM4.0 per valutare la possibilità di intraprendere il percorso della produzione di alcuni componenti con tecnologie additive. Tra questi era presente la maglia di un bracciale da realizzare in lega di titanio. La richiesta era quella di stampare dei prototipi che permettessero di poter fare una valutazione funzionale ed economica e valutarne la resa estetica.

3.2 Strumenti utilizzati

Per esaminare questo caso studio, sono state messi a disposizione dal CIM4.0 tutti gli strumenti necessari, in particolare è stata utilizzata una macchina con tecnologia L-PBF e una polvere di lega di titanio Ti6Al4V di cui di seguito sono riportate le caratteristiche tecniche.

3.2.1 Print Genius 250

La tecnologia è la Laser Powder Bed Fusion. In particolare, per questo caso di studio è stata utilizzata, come macchina, la Print Genius 250 fornita al CIM4.0 dalla sezione dell'azienda italiana Prima Industrie, Prima Additive riportata in *Figura 23*.



Figura 23 : Print Genius 250[37]

Di seguito vengono elencate le principali caratteristiche della macchina: [37]

- volume di costruzione di 258x258x350 mm
- due laser fibra single mode in IR con potenza di 500 W che lavorano simultaneamente sulla stessa area di lavoro
- è possibile ottenere una singola larghezza di linea di 0,1 mm e
- è possibile ottenere uno spessore minimo dello strato di 0,02 mm e massimo 0.1 mm

- si ha una velocità di costruzione di 25 - 50 cm³/h in base al materiale utilizzato e alla geometria dei pezzi.
- I materiali processabili con questa macchina sono diversi: acciaio inossidabile, acciaio maraging, lega a base di nichel per alte temperature (Inconel), lega di titanio, lega di cromo cobalto, lega di alluminio, acciaio ad alta resistenza, lega di rame.
- Il gas inerte utilizzato è l'Argon

3.2.2 EOS Titanium Ti64

Per questa applicazione, l'idea era quella di riuscire a realizzare una componente leggero e resistente che facesse da struttura per il gioiello. Come verrà spiegato nel paragrafo di analisi del componente, questa struttura è la base su cui vengono incastonate le pietre del gioiello.

È per questo motivo che è stata scelta una lega di titanio e, in particolare, la Ti6Al4V prodotta da EOS. Inoltre, la difficile processabilità del materiale con le tecnologie tradizionali trova nell'AM un perfetto concorrente.

Di seguito vengono riportate le principali caratteristiche della lega EOS Titanium Ti64, prese dal fornitore della polvere: [26]

- Densità 4.41 g/cm³
- Distribuzione della dimensione delle polveri riportata in *Tabella 2*

Property	Test method	Units	Result
Particle size analysis			
d10	Laser diffraction acc. to ISO 13320, using Microtrac S3500 laser sizer	µm	28.08
d50		µm	38.41
d90		µm	54.58
Weight fraction > 63 µm	Sieve analysis acc. to ASTM B214*	wt. %	0.0

Tabella 2 : Dimensioni delle particelle di polvere EOS Titanium Ti64[26]

- Rugosità superficiale, variabile in base ai parametri di processo, riportata in *Tabella 3*

Ti64 Performance (30 μm)	Ra 9 - 12 μm , Rz 40 - 80 μm Ra 0.36 - 0.47 x 10 ⁻³ inch, Rz 1.6 - 3.2 x 10 ⁻³ inch
Ti64 Speed (60 μm)	Ra 6 - 10 μm , Rz 35 - 40 μm Ra 0.23 - 0.39 x 10 ⁻³ inch, Rz 1.37 - 1.57 x 10 ⁻³ inch

Tabella 3 : Valori di rugosità superficiale as built EOS Titanium Ti64[26]

- Proprietà meccaniche fornite sia per i componenti as built, che per quelli trattati termicamente, variabili in base alla direzione di costruzione. I dati del datasheet sono presenti in *Tabella 4*

	As built	Heat treated [6]
Tensile strength [5]		
- in horizontal direction (XY)	typ. 1290 \pm 50 MPa typ. 187 \pm 7 ksi	min. 930 MPa (134.8 ksi) typ. 1100 \pm 40 MPa (160 \pm 6 ksi)
- in vertical direction (Z)	typ. 1240 \pm 50 MPa typ. 187 \pm 7 ksi	min. 930 MPa (134.8 ksi) typ. 1100 \pm 40 MPa (160 \pm 6 ksi)
Yield strength (R_{p0.2}) [5]		
- in horizontal direction (XY)	typ. 1140 \pm 50 MPa typ. 165 \pm 7 ksi	min. 860 MPa (124.7 ksi) typ. 1000 \pm 50 MPa (145 \pm 7 ksi)
- in vertical direction (Z)	typ. 1120 \pm 80 MPa typ. 162 \pm 12 ksi	min. 860 MPa (124.7 ksi) typ. 1000 \pm 60 MPa (145 \pm 9 ksi)
Elongation at break [5]		
- in horizontal direction (XY)	typ. (7 \pm 3) %	min. 10 % typ. (13.5 \pm 2) %
- in vertical direction (Z)	typ. (10 \pm 3) %	min. 10 % typ. (14.5 \pm 2) %
Modulus of elasticity [5]		
- in horizontal direction (XY)	typ. 110 \pm 15 GPa typ. 16 \pm 2 Msi	typ. 110 \pm 15 GPa typ. 16 \pm 2 Msi
- in vertical direction (Z)	typ. 110 \pm 15 GPa typ. 16 \pm 2 Msi	typ. 110 \pm 15 GPa typ. 16 \pm 2 Msi
Hardness [7]	typ. 320 \pm 12 HV5	

Tabella 4 : Proprietà meccaniche del materiale EOS Titanium Ti64[26]

3.3 Processo di ottimizzazione del design e della produzione

Il processo di sviluppo del caso in esame ha seguito un workflow ben preciso. A partire dagli input iniziali, sono state fatte delle considerazioni per lo sviluppo di un nuovo design, utilizzando i drivers del DFAM.

Una volta realizzato il design ottimale, si è passati alla fase di data preparation, nel quale sono stati inseriti i parametri di produzione, è stata valutata la necessità o meno di realizzare delle strutture di supporto ed è stato valutato l'orientamento ottimale per la produzione. Effettuata la messa in macchina del componente, è stato avviato il processo di produzione. Questo comprende, la fase di lavorazione in macchina, la fase di rimozione del componente dalla piattaforma e la fase di post-processing.

A questo punto, ottenuto l'oggetto finito, sono stati analizzati i risultati della produzione, in modo tale da avere un output di dati e, in caso di esito negativo, ricominciare dal primo step.

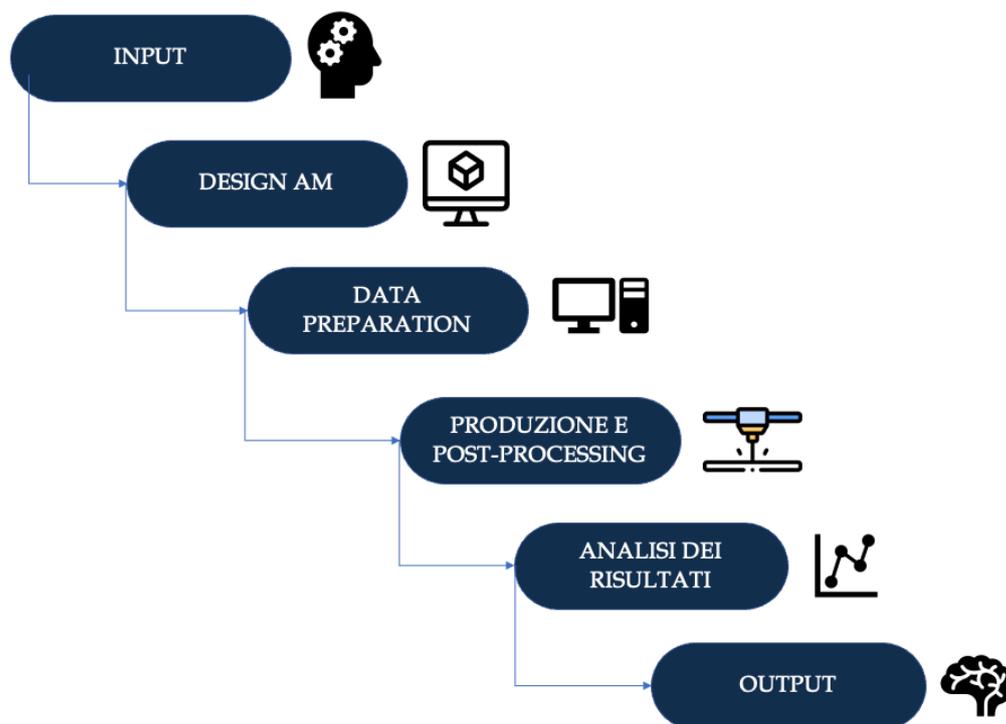
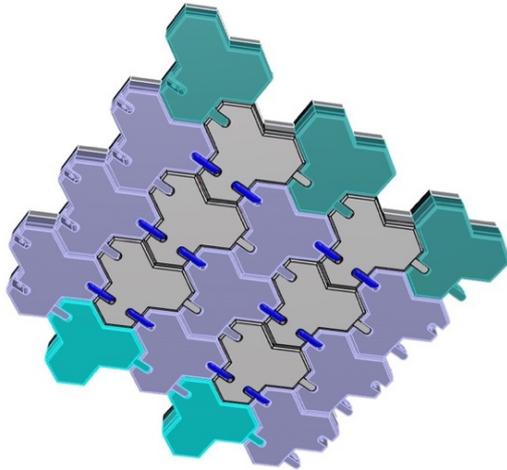


Figura 24 : Workflow operativo per il processo di ottimizzazione del design e della produzione [38], [39]

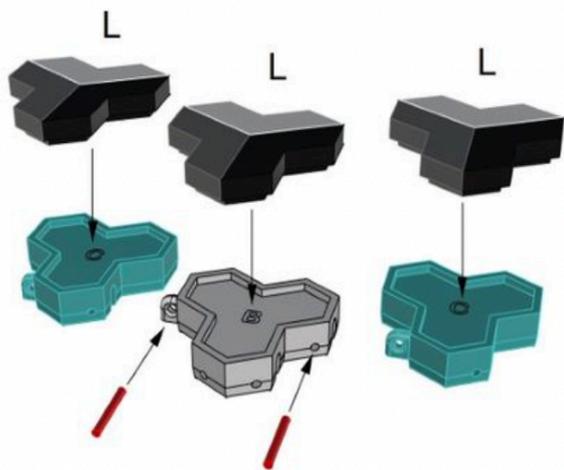
3.3.1 Prima iterazione

INPUT



L'input della prima iterazione è stato fornito dall'azienda. Il progetto di partenza, dal nome "Sant'Eligio", che è riportato in *Figura 25*, è il punto da cui si è partiti per l'ottimizzazione del design e per gli step successivi.

Come si può osservare, la maglia è composta da quattro diverse tipologie di elementi collegati uno con l'altro per



perni al Ø0.50

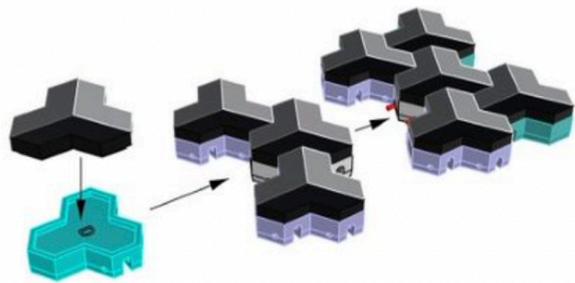
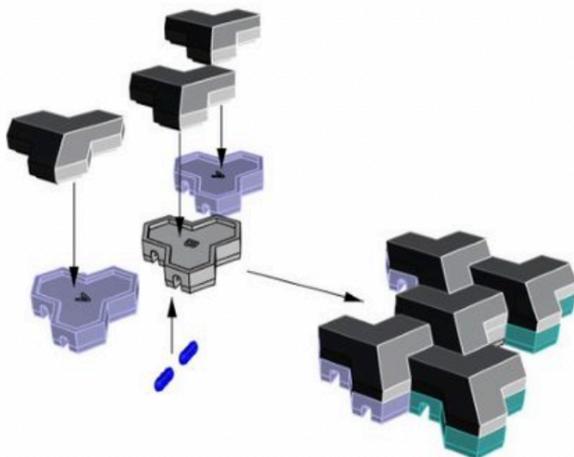
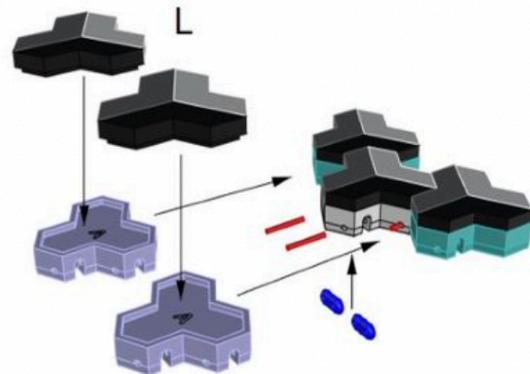


Figura 25 : Progetto Sant'Eligio[50]

mezzo di perni. In particolare, gli elementi si differenziano per il tipo di assemblaggio che permettono; facendo riferimento alla Figura 25, è possibile distinguere:

- Elementi verdi superiori: hanno una sede e un occhiello. Le zone di assemblaggio sono tutte posizionate nella zona inferiore dell'elemento poiché è uno degli elementi perimetrali.
- Elementi verdi inferiori: il concetto è lo stesso dell'elemento precedente con una sede e un occhiello, solo che in questo caso, essendo l'elemento sempre perimetrale, ma inferiore, la zona di assemblaggio si trova sulla parte superiore.
- Elementi centrali: hanno, sia quelli viola, che quelli grigi, tre sedi e un occhiello. La differenza risiede nell'occhiello che, una volta si trova nella zona superiore, e un'altra in quello inferiore. Questo permette di assemblare la maglia e avere gli elementi sfalsati tra loro.

È possibile distinguere due tipologie di perni per l'accoppiamento degli elementi.

In rosso si hanno dei perni di rotazione. L'asse di questi è l'asse di rotazione attorno al quale si ha un grado di libertà del sistema. Questo serve per far sì che la maglia si avvolga attorno al polso;

In blu si hanno dei perni di fissaggio, utilizzati per evitare che gli elementi che compongono la maglia si separino.

Sulla base del progetto fornito sono state fatte delle considerazioni iniziali per valutare la funzionalità del componente e la "stampabilità" in additive manufacturing.

La prima considerazione è stata fatta sul sistema di componenti presentato. Il sistema è composto da 16 elementi, 16 perni di rotazione 12 perni di fissaggio. In questo modo, processando il progetto così come è stato presentato, sarebbe stato necessario stampare 44 elementi da assemblare. Considerando che questa è solo una porzione del bracciale, il lavoro va poi moltiplicato in base alla taglia che si vuole avere. Il numero di pezzi da assemblare è già abbastanza grande per la sola porzione di maglia.

È questo il motivo principale per cui è stata sviluppata l'idea di intraprendere questo caso di studio. L'idea era quella di realizzare un componente che uscisse dalla macchina semi-finito, abolendo del tutto la fase di assemblaggio.

I vincoli principali che sono stati forniti in fase di presentazione del progetto sono:

- La necessità di lasciare inalterate la parte superiore degli elementi della maglia, poiché questa è solo lo scheletro del bracciale. Nelle sedi della zona superiore sarà prevista poi la presenza di una pietra incastonata nella sede. La geometria generale dell'elemento non è modificabile, poiché frutto di uno studio sul design del gioiello. Ciò che può essere cambiato è l'accoppiamento che permette agli elementi di realizzare la maglia.
- Essendo un bracciale, è necessario che questo abbia un raggio di curvatura tale da permettere alla maglia di avvolgersi attorno a un polso. I perni, dunque, rappresentano gli assi attorno al quale ciascun elemento deve ruotare. Non sono state date, invece, delle indicazioni di altri movimenti relativi. La rotazione attorno all'asse è l'unico grado di libertà tra gli elementi che deve necessariamente non essere vincolato.
- Altro vincolo si ha sulle dimensioni. Il pezzo è stato presentato con uno spessore di 2 mm. È stata data la possibilità di aumentarlo fino a un massimo di 2,5 mm. Questo spessore è stato fissato, oltre che per motivi estetici, anche per motivi funzionali. Degli elementi troppo spessi andrebbero presto in battuta tra loro e, di conseguenza, la rotazione attorno all'asse concessa sarebbe minore.

DESIGN

Individuate le principali caratteristiche richieste per la produzione del bracciale sono state fatte delle considerazioni per ottimizzare il design per la produzione in additive manufacturing. Essendo una nuova sfida dal punto di vista tecnologico, si è deciso di svolgere diverse prove di design al fine di riuscire a trovare quello ottimale.

La progettazione delle diverse prove si è basata principalmente su quattro punti (di seguito verranno definiti come indici di progettazione o IDP) che sono qui descritti:

1. **Gradi di libertà:** come già accennato precedentemente, il principale grado di libertà voluto è la rotazione attorno ai perni. Inoltre, avere un bracciale estremamente rigido per quanto riguarda tutti gli altri movimenti, può essere o meno un valore aggiunto. È per questo motivo che le diverse tipologie di giunti realizzati presentavano diverse possibilità di movimento.

2. **Dimensioni caratteristiche:** le dimensioni necessarie affinché il giunto abbia una resistenza alle sollecitazioni a cui è sottoposto
3. **Luce tra gli elementi:** per permettere una corretta rotazione degli elementi attorno al giunto, è necessario prevedere uno spazio libero tra gli elementi per evitare che questi vadano in battuta tra loro e quindi di limitare la corsa.
4. **Gioco dell'accoppiamento:** la mobilità è influenzata dal gioco dell'accoppiamento, così come visto in letteratura. Inoltre, è stato necessario valutare il gioco minimo per non avere la fusione tra gli elementi.

Per tutti i nuovi design i principali obiettivi da perseguire sono:

- Buona mobilità degli elementi.
- Resistenza del giunto.
- Assenza o limitata presenza di supporti.
- Eliminazione della fase di assemblaggio.

Nella prima iterazione sono stati realizzati quattro diversi design. Ciascuno di essi presenta delle diverse caratteristiche dal punto di vista dei IDP appena descritti. Di seguito se ne elencano le proprietà.

Concept 1

Per il primo concept, a partire dai principali obiettivi da perseguire, è stato stravolto totalmente l'accoppiamento del progetto iniziale. Per eliminare la fase di assemblaggio, i componenti sono stati pensati con un giunto collegato all'elemento stesso della maglia. Il concetto rimane sempre quello di avere una sede e un perno di rotazione. In questo caso però, il perno è legato agli elementi e la sede si trova nell'elemento successivo.

La challenge maggiore è, in questo caso, l'eliminazione dei supporti, ma, dal momento che si pensa di estrarre la maglia dalla piattaforma, i perni che sono a sbalzo risultano generarsi "dal nulla". Per ovviare a questo problema si è cercato di sfruttare la polvere presente all'interno della sede, e la leggerezza del perno. Solitamente, con questa tecnologia, la polvere non riesce a svolgere un'azione di supporto. Essendo comunque leggermente più compatta (la piattaforma opera a 80 °C e, dovendo supportare un

componente molto leggero, si è deciso di fare questo tentativo al fine di eliminare totalmente la presenza dei supporti.

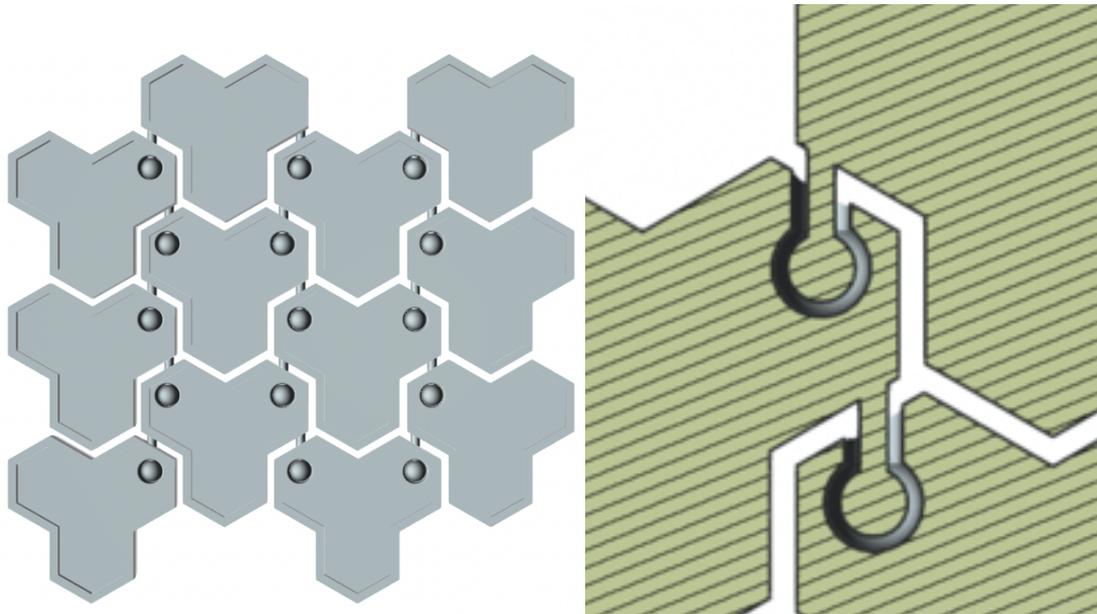


Figura 26 : Design Concept 1

Per fare ciò, si è scelto di realizzare un giunto formato da un cilindro e da una sfera. Nel Concept 1 si hanno tutti gli elementi uguali fra loro. Ciò permette facilità di design e di ripetibilità. Nel caso in cui il componente dovesse essere prodotto di varie dimensioni (ovvero le diverse misure del bracciale), sarebbe necessario solo aggiungere altri elementi dello stesso tipo su CAD. L'operazione, quindi, verrebbe effettuata in pochi semplici passaggi.

A partire dal valore di progetto del diametro del perno, di 0,5 mm, utilizzando i dati forniti dal produttore della polvere, è stato fatto un primo calcolo di resistenza, valutando le sollecitazioni e cui esso è sottoposto e la resistenza a snervamento del materiale.

Nel caso di questa tipologia di giunto si può modellizzare il tutto come una trave incastrata dove le forze vengono applicate all'estremità, sottoposta dunque a momento flettente e a sforzo normale.

Il momento flettente è dato dalla forza applicata, moltiplicata per la lunghezza della trave:

$$M_f = F \times l$$

E la tensione ammissibile dipende dalla sezione della trave, in questo caso circolare.

$$\sigma_{max} = \frac{M_f}{W_f} = \frac{M_f}{\frac{\pi d^3}{32}} \leq \sigma_a$$

In questo caso la tensione ammissibile la si può ricavare dal datasheet, considerando il caso peggiore ed è pari a 1140 MPa, e il diametro è noto da progetto: 0,5 mm.

La lunghezza della trave (considerando il solo tratto cilindrico) dipende dal design ed è nota. Si calcola in questo caso la forza a cui è sottoposto un singolo braccio della maglia. I risultati per tutte le alternative di design considerate sono riportate in Tabella 5.

La forza massima, ammissibile, in base alle equazioni precedenti, per il diametro di progetto, risulta essere

$$F_{a_f} = \frac{\sigma_a \times \frac{\pi d^3}{32}}{l} = 4,66 N = 1,03 lbf$$

È stata calcolata anche la resistenza a trazione data da

$$F_{a_n} = \sigma_a \times \frac{\pi d^2}{4} = 224 N = 50 lbf$$

	L	d	F_a_f (N)	F_a_f (lbf)	F_a_f (kg)	F_a_n (N)	F_a_n (lbf)	F_a_n (kg)
PROGETTO	3,0	0,5	4,7	1,0	0,5	223,7	49,2	22,4
P1	1,7	0,6	10,8	2,4	1,1	270,7	59,6	27,1
P2	1,7	0,6	10,8	2,4	1,1	270,7	59,6	27,1
P3	1,6	0,8	29,5	6,5	2,9	503,4	110,7	50,3
P4	1,6	0,5	8,9	2,0	0,9	223,7	49,2	22,4
P5	2,2	0,9	37,8	8,3	3,8	724,9	159,5	72,5
P6	1,6	0,8	35,8	7,9	3,6	572,7	126,0	57,3
P7	2,8	1,0	317,9	69,9	31,8	894,9	196,9	89,5

Tabella 5 : Studio sulle forze applicabili a un braccio della maglia.

I risultati ottenuti sono poi stati validati dal calcolo statico delle forze applicabili dalla mano umana. Lo studio, reperibile in rete [40] valuta i carichi applicabili dalla mano in diverse condizioni. Il confronto è stato fatto con il dimensionamento statico della forza applicabile tra pollice e indice di una donna in posizione del gomito a 90 gradi. Si consideri, inoltre, che lungo un asse le maglie non sono collegate da un solo braccio, bensì da tre o quattro. La resistenza dunque andrebbe divisa su tutti gli elementi soggetti allo sforzo.

Concept 2

Nella *Figura 27* è possibile vedere la vista frontale e in sezione del modello CAD del Concept 2

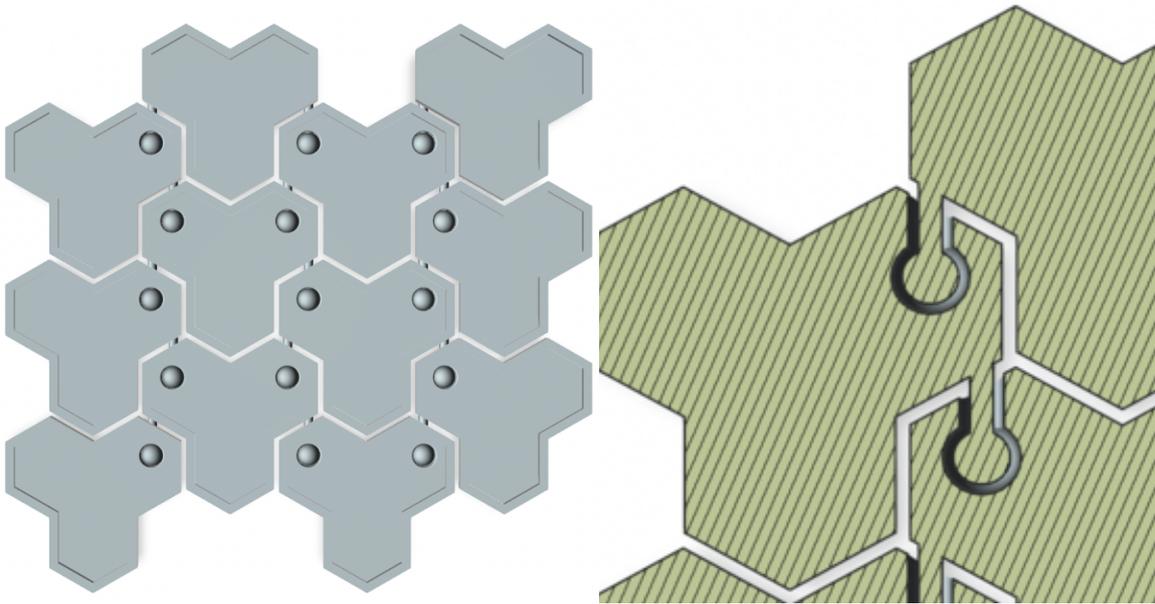


Figura 27 : Design Concept 2

Le considerazioni fatte per questa prova sono le stesse del Concept 1. In questo caso le dimensioni caratteristiche e i gradi di libertà sono gli stessi del caso precedente, ma intervenendo sugli indici di progettazione 3 e 4 sono state fatte delle modifiche.

Per quanto riguarda l'IDP 3 si è deciso di ridurre la luce di circa 0,2 mm. L'obiettivo di questa modifica era valutare la funzionalità del componente, nonostante la vicinanza degli elementi fra loro.

Stessa riflessione è stata fatta sull'IDP 4. In base agli studi presentati nel Capitolo 2 si è visto che per quanto riguarda la tecnologia LPBF era possibile ottenere giochi minimi con valori abbastanza bassi, fino a 0,2 mm. Per questo motivo sono state fatte più prove, utilizzando giochi diversi.

Avvicinare gli elementi fra loro e ridurre il gioco concede sicuramente minore mobilità al braccio, ma, in questa prima fase, sono state fatte più prove possibili per avere più spunti di riflessione negli steps successivi.

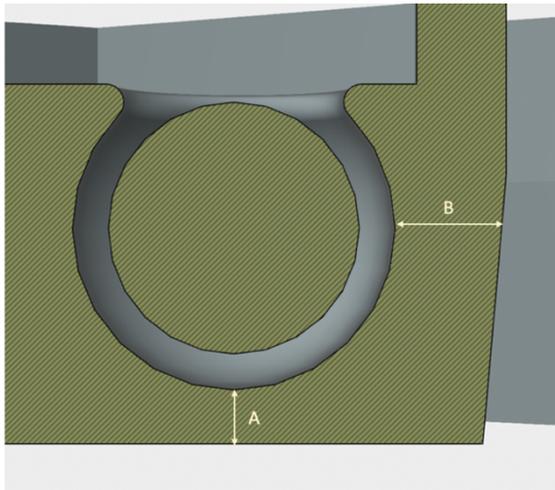


Figura 28 : Dimensioni critiche

Un ulteriore problema di cui ci si è resi conto nella fase di design è stato quello delle dimensioni minime di alcune pareti degli elementi. Diminuendo il gioco, e riducendo la luce, aumentano le dimensioni minime del componente nelle zone critiche. Queste ultime, visibili in *Figura 28* sono la zona inferiore dell'elemento e la zona laterale. Il giunto genera delle pareti sottili che, nella ricerca

del design ottimale, hanno raggiunto valori inferiori ai limiti tecnologici.

Per questo motivo, per ogni prova effettuata, sono state valutate le dimensioni A e B, come riportato in *Figura 28*.

Concept 3

Nella *Figura 29* è possibile vedere la vista frontale e in sezione del modello CAD della Concept 3

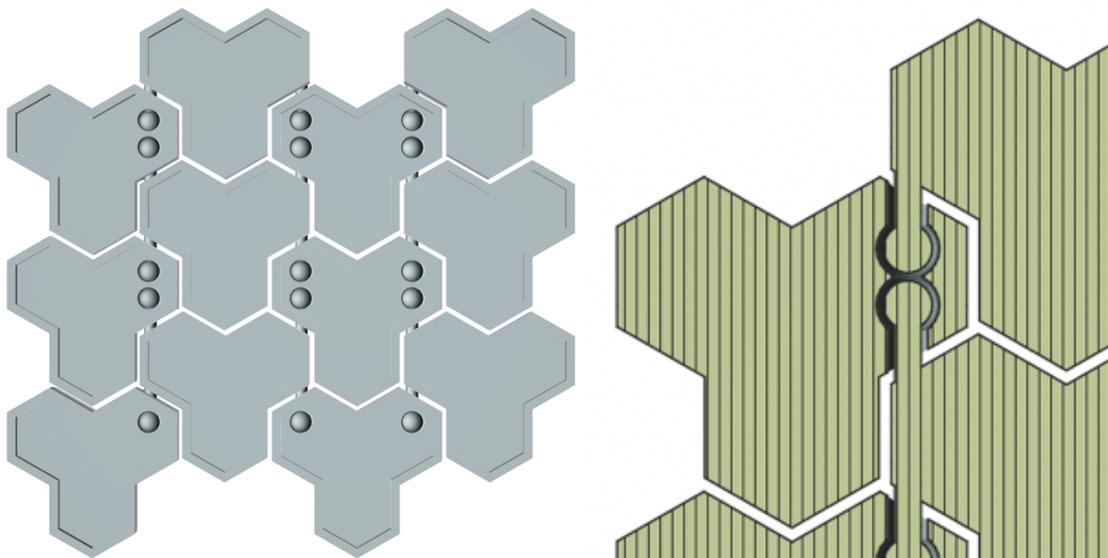


Figura 29 : Design Concept 3

Il terzo concept si differenzia dai primi due: rispetto al primo cambiano tutti e quattro gli IDP. Rispetto al secondo, gli indici di progettazione su cui si è agito sono l'1, il 2 e il 4.

In questo caso gli assi sono allineati. In questo modo, l'asse di rotazione degli elementi è unico. Ciò dovrebbe permettere maggiore libertà di movimento tra gli elementi che compongono la maglia.

Per quanto riguarda l'IDP 2, si è deciso di aumentare le dimensioni del braccio rispetto alle due prove precedenti. È vero che dal punto di vista della resistenza meccanica, idealmente, la sezione del braccio dovrebbe reggere le sollecitazioni, però è anche vero che la sezione realizzata in AM potrebbe presentare dei difetti e di conseguenza non avere la stessa resistenza del caso ideale. Aumentando le dimensioni del braccio, una caratteristica. Il problema principale, data questa geometria dei giunti e queste dimensioni caratteristiche, sono le dimensioni minime. Particolare attenzione va fatta in questo caso poiché, aumentando le dimensioni degli elementi del giunto, diminuiscono A e B e si rischia di avere dimensioni troppo sottili.

Per l'IDP 3 si è deciso di usare lo stesso valore del Concept 2. Per l'ID4, invece, si è deciso di ridurre ulteriormente il gioco. Sul raggio il valore di scostamento è 0,2 mm, ovvero pari al minor valore utilizzato in letteratura per giunti metallici prodotti in L-PBF.

Concept 4

Nella *Figura 30* è possibile vedere la vista frontale e in sezione del modello CAD del Concept 4

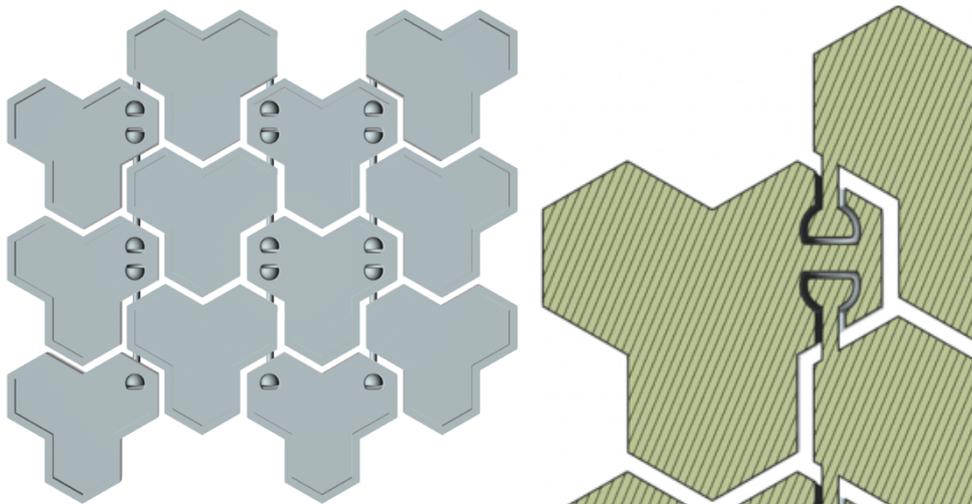


Figura 30 : Design Concept 4

Il Concept 4 presenta un design di giunto diverso rispetto agli altri. In questo caso il diametro del braccio è esattamente quello dato da progetto, dunque di 0,5 mm. Si è

deciso di mantenere il raggio della semisfera pari a quello del Concept 3. Il cambio di design è stato fatto per valutare la mobilità del giunto interponendo tra i due elementi che si incastrano in una maglia, una parete.

Per quanto riguarda l'IDP 3 si è deciso di utilizzare lo stesso valore di luce utilizzato per il Concept 1, mentre per l'IDP 4, si è mantenuta la prova del gioco minimo di 0,2 mm sul raggio.

Per una visione più chiara e immediata delle principali caratteristiche del design dei quattro Concept della prima iterazione del workflow, sono stati inseriti all'interno della *Tabella 6* i parametri più indicativi di ciascun Concept.

	Concept 1	Concept 2	Concept 3	Concept 4
Tipologia accoppiamento	sfere disallineate	sfere disallineate	sfere allineate	semisfere allineate
Diametro braccio	0,55 mm	0,55 mm	0,75 mm	0,5 mm
Diametro sfera	1,35 mm	1,35 mm	1,4 mm	1,4 mm
Luce	0,5 mm	0,3 mm	0,3 mm	0,5 mm
Gioco	0,6 mm	0,5 mm	0,4 mm	0,4 mm

Tabella 6 : Principali caratteristiche delle quattro prove di design della prima iterazione.

DATA PREPARATION

Una volta realizzato il design delle prove, si passa alla fase di Data Preparation. Il file CAD generato con Siemens NX viene esportato in STL e aperto sul software Magics Materialise.

Questa è la fase in cui si prepara il file per la produzione vera e propria. I passaggi principali da effettuare prima di avviare la stampa si possono dividere in:

- Correzione del file STL;
- Ottimizzazione dell'orientamento in macchina;
- Generazione dei supporti;
- Slicing del Job, impostando il *Layer Thickness*.
- Passaggio al software della macchina e impostazione dei parametri di processo;

A questo punto, il Job è pronto per essere prodotto. Allo stesso tempo, è necessario preparare la macchina per la stampa. È necessario riscaldare la piattaforma e inertizzare la camera prima di poter avviare la produzione.

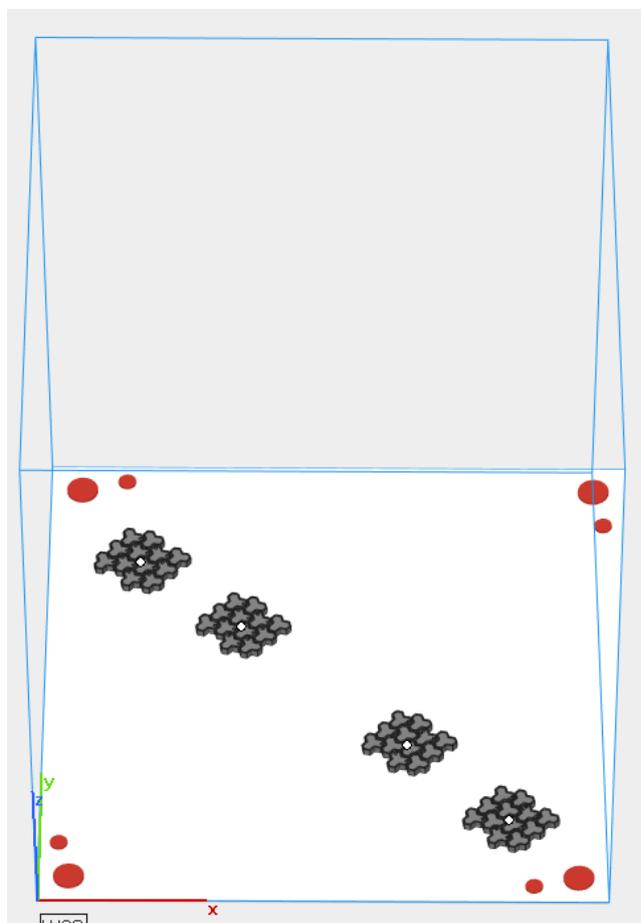


Figura 31 : Prima iterazione, messa in macchina

Tutti questi passaggi sono stati effettuati per la produzione dei campioni sopra esposti e di seguito vengono presentati.

Il file STL generato non presentava errori, di conseguenza si è passati direttamente alla fase di messa in macchina. Simulando l'ambiente di stampa della macchina Print Genius 250, sono state disposte le quattro prove di design sulla scena. Si è deciso di orientarle come raffigurate in *Figura 31*.

I fattori che hanno portato alla scelta di questa configurazione sono molteplici. La lama stende la polvere da destra verso sinistra. I componenti

sono stati orientati in modo tale da non avere superfici parallele alla lama. questo è necessario perché, superfici parallele potrebbero danneggiare la lama e, di conseguenza, avere problemi nella stesura della polvere nei layer successivi. È meglio evitare che la lama incontri troppo materiale solido nello stesso momento, anche per questo le quattro prove sono state posizionate in diagonale.

Per evitare che i pezzi potessero danneggiarsi l'un l'altro durante la stampa, si è cercato di posizzarli a diverse altezze lungo l'asse y in modo tale da avere il meno possibile elementi alla stessa quota. Il posizionamento sul piano X-Y è visibile in *Figura 32*.

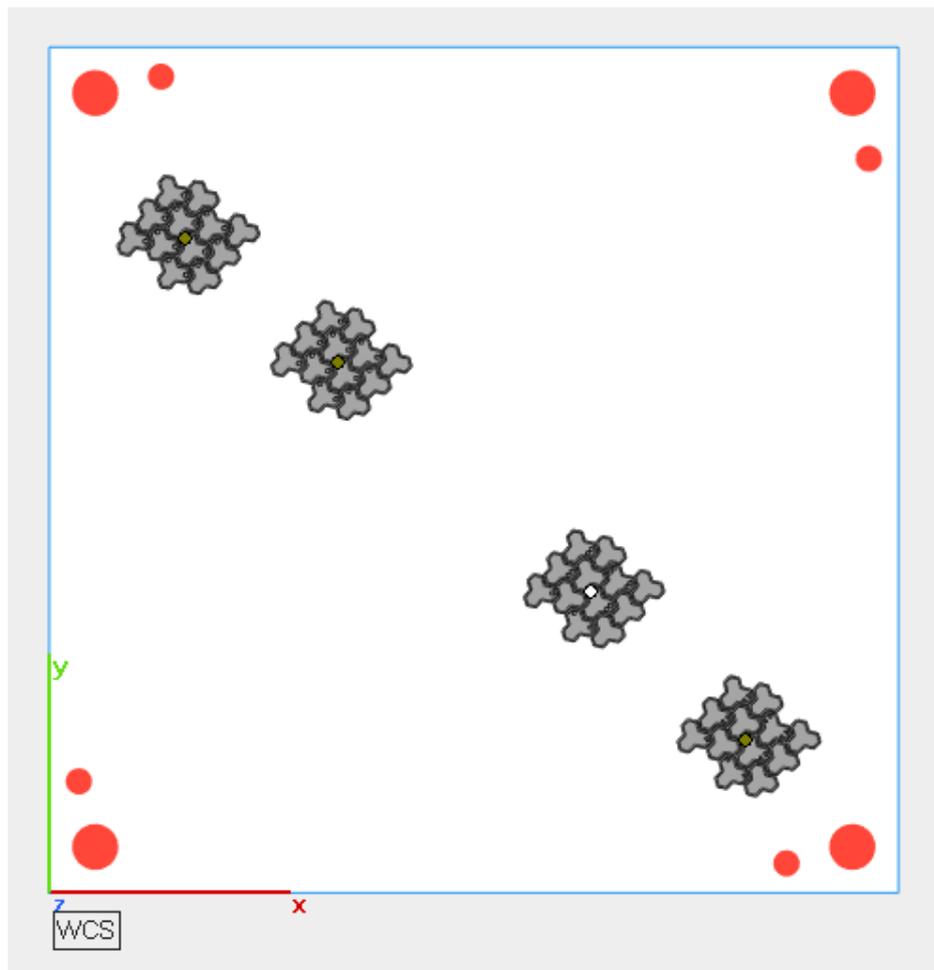


Figura 32 : Prima iterazione, messa in macchina vista dall'alto

A questo punto, una volta orientati i pezzi in macchina, si passa alla fase di generazione dei supporti. In questo caso, già dallo studio del design, si era pensato di non avere supporti. Avendo molte superfici piane, infatti, si è deciso di ancorare i pezzi alla piattaforma, senza utilizzare altri supporti.

In vista dell'operazione di taglio nella fase di post processing, i quattro campioni sono stati estrusi di 1 mm lungo l'asse Z.

In *Figura 33* è riportato il valore di volume totale di materiale utilizzato per la stampa dei quattro campioni, espresso in mm³.

	Volume
Part(s)	9245.254 mm ³
Support	0.000 mm ³
Total	9245.254 mm ³

Figura 33 : Prima iterazione, volume totale del job di stampa

Stabiliti orientamento e supporti, si passa alla fase di slicing. Il primo job è stato processato utilizzando un *Layer thickness* di 60 µm.

Inizialmente, si è deciso di provare a utilizzare questo spessore del layer poiché i parametri utilizzati erano già stati applicati ad altri componenti all'interno dell'azienda.

I componenti vengono suddivisi in layer secondo le impostazioni fornite e secondo l'altezza del componente che, in questo caso, è pari a 3500 mm, comprensivi della parte e di 1 mm di estrusione.

Questo era l'ultimo passaggio da effettuare sul software Magics Materialise, prima di passare al software della macchina, EP Hatch.

All'interno del software è possibile impostare i parametri di stampa per avviare la produzione.

In particolare, in *Tabella 7* sono riportati i due parametri principali, riassuntivi del blocco di parametri utilizzato per la stampa, la produttività e la VED, utilizzati per la produzione di questo JOB.

Layer Thickness (µm)	Produttività (cm ³ /h)	VED (J/mm ³)
60	32,40	37,78

Tabella 7 : Prima iterazione, parametri di produzione

La macchina utilizzata è fornita di due laser, per questo motivo, è stato deciso di fare processare due campioni per ciascun laser. I due campioni in alto a sinistra sono stati processati dal Laser 1 e gli altri due dal Laser 2.

Avere due laser permette di dimezzare i tempi di produzione. Inoltre, avendo quattro campioni molto simili tra loro, entrambi i laser sono perfettamente bilanciati nei tempi. Assegnati i parametri, è stata fatta una simulazione per valutare i tempi di stampa, l'altezza del job e il numero di layer.

In questo caso, essendo un Job con un'altezza non molto elevata e di conseguenza un basso numero di layer, il tempo di stampa risulta abbastanza breve. Le informazioni ottenute sono riportate nel software sotto la sezione Part Info visibile in *Figura 35*.

La scena di stampa è anch'essa riportata in *Figura 35*, ed è quella che viene fornita alla macchina per avviare la stampa.

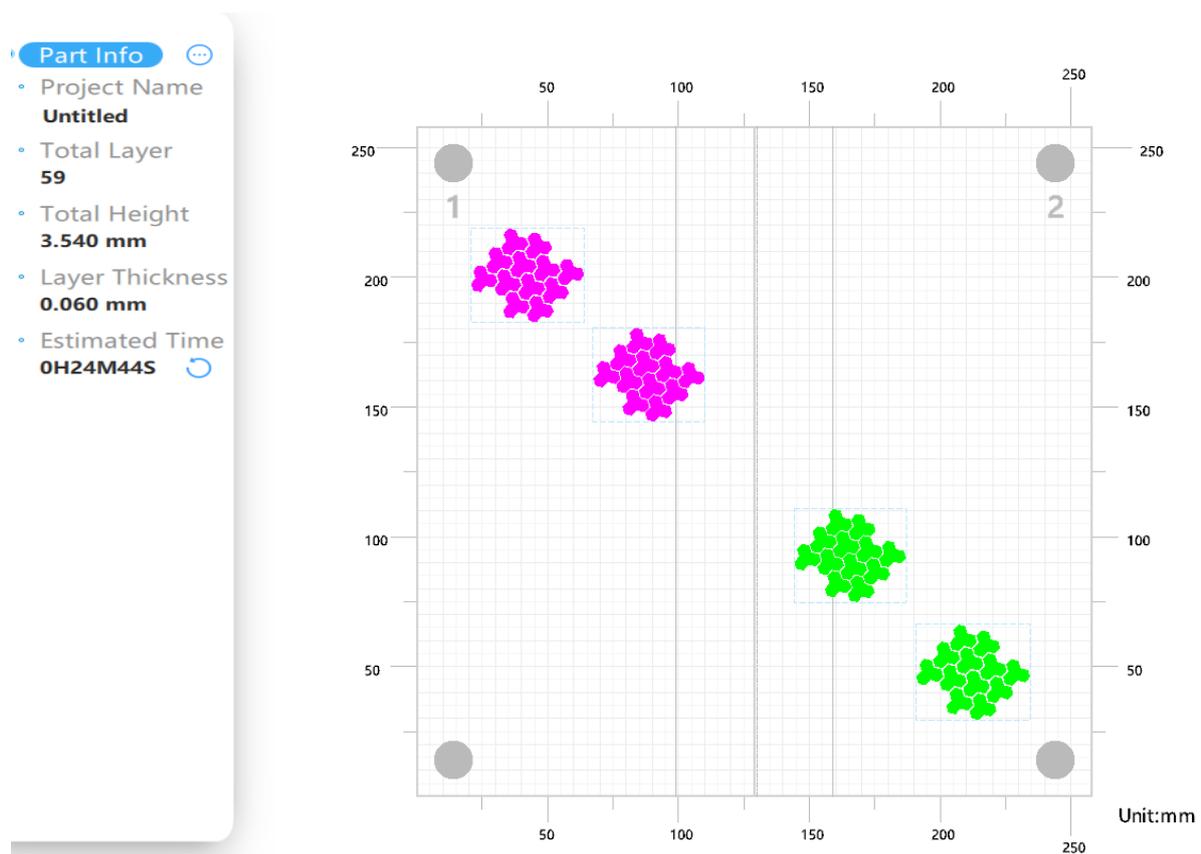


Figura 34 : Prima iterazione, printer user interface e Part info

PRODUZIONE E POST PROCESSING

Una volta terminata la fase di preparazione del job è stata avviata la stampa. All'interno del job, come visto, sono state inserite le quattro prove. La fase di stampa è durata circa 25 minuti, come visto nel precedente paragrafo.

Una volta terminata, è stata aspirata la polvere in eccesso ed è stata rimossa la piattaforma dalla macchina. Durante la produzione ci si è accorti di un errore fatto nella fase di data preparation e, alla fine del job ci si è accorti che il Concept 2 non è stata realizzata, bensì sono state stampate due Concept 3. Per questo non è stato possibile analizzare i pro e i contro di quel design in questo primo job.

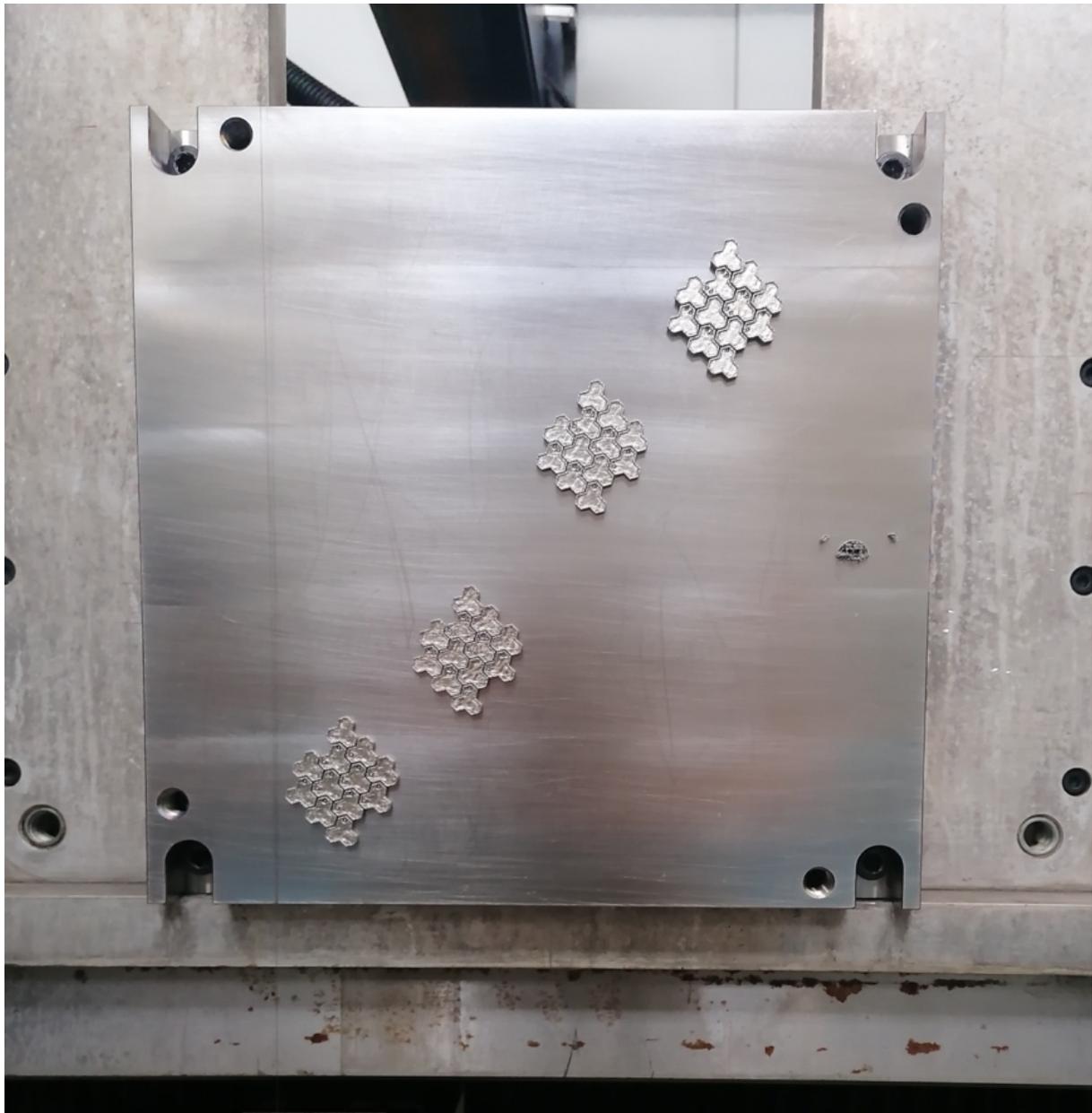


Figura 35 : Prima iterazione, risultato as built

In figura è possibile vedere i pezzi realizzati ancora collegati alla piattaforma, posizionati sulla macchina di taglio per essere separati.

La macchina utilizzata per separare i pezzi dalla piattaforma di costruzione è una macchina di elettroerosione a filo prodotta da Genesi Group: E-cut.

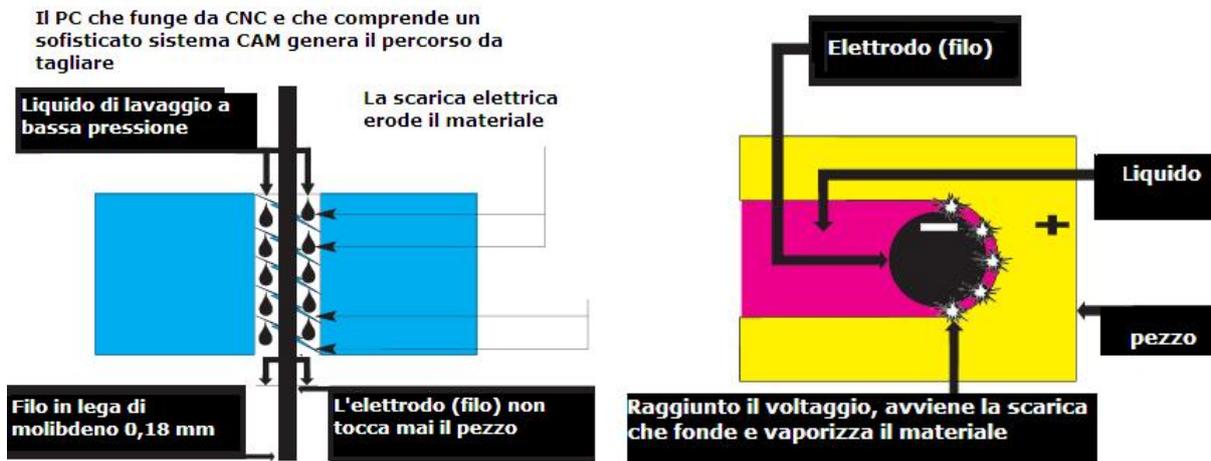


Figura 36 : Il processo E-cut

Il principio su cui si basa la macchina è quello dell'elettroerosione, che sfrutta la capacità delle scariche elettriche di asportare materiale. Il filo è l'elettrodo negativo e il pezzo è l'elettrodo positivo. La scarica viene controllata dal voltaggio e dall'ampereaggio. Raggiunto il voltaggio, si ha la scarica che permette di fondere il materiale. Vengono rappresentati due schemi in *Figura 36* del processo dell'E-cut.

E-cut è un sistema formato da un filo di acciaio al molibdeno con un diametro di circa 18 centesimi di millimetro, in grado di tagliare a freddo qualsiasi materiale metallico. A differenza degli altri sistemi di elettroerosione, il filo viene riavvolto e utilizzato continuamente. In questo modo, il tempo di contatto tra filo e pezzo è minore, a favore di una miglior efficienza del processo di taglio. Il filo è guidato da un percorso a controllo numerico che permette l'esecuzione di tagli dai profili complessi. [41]

In particolare, la macchina presente all'interno dei laboratori del CIM4.0 è la E-cut 40D, visibile in *Figura 37* e che presenta le seguenti caratteristiche:



Figura 37: Macchine di elettroerosione a filo E-Cut40D

- Precisione: +/- 0,0075 mm (taglio singolo)
- Dimensione tavola di lavoro: 500x785X500
- Portata: kg 500
- Vasca liquido: 80 Lt
- Filtraggio liquido con vasca a tre settori, prefiltro e cartucce filtranti
- Lubrificazione centralizzata
- Basamento in ghisa HT250 lungamente stagionata
- RA: >1 (0,8-0,9)

Una volta separati i pezzi dalla piattaforma, si procede alla fase di sbloccaggio della maglia. Per permettere il movimento degli elementi tra loro, è necessario rimuovere la polvere intrappolata nelle sedi del giunto.

In questa prima iterazione, per questo scopo è stata utilizzata solo l'aria compressa. Solo per uno dei componenti si è deciso di provare una leggera pallinatura. La macchina utilizzata per la pallinatura, presente all'interno dei laboratori del CIM4.0 è la Sabbiatrice SD9 prodotta dall'azienda Noreblast.



Figura 38 : Pallinatrice Noreblast sd9

La macchina, visibile in *Figura 38*, opera con delle microsfere di vetro e presenta le seguenti caratteristiche: [42]

- Compatta
- Filtro a cartuccia autopulente integrato
- Separazione e recupero graniglia ad alta efficienza
- Dispositivo di regolazione flusso graniglia
- Dim. camera di lavoro LxPxH mm: 900 x 610 x 620
- Dim. esterne LxPxH mm: 1370 x 670 x 1520

Per quanto riguarda la pallinatura, si riporta un esempio per osservare la differenza tra l'oggetto as built e l'oggetto pallinato. La prova è stata fatta a seguito dei tentativi di sbloccaggio del componente per vedere se avrebbe portato a dei risultati migliori.

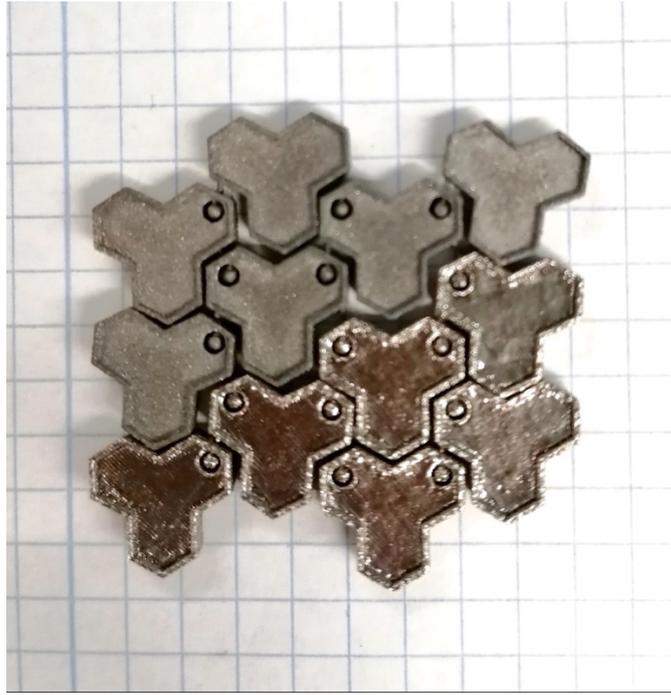


Figura 39 : Confronto finitura superficiale as-built e dopo pallinatura con sfere di vetro per la prima iterazione.

Dal punto di vista della qualità superficiale si può notare, in *Figura 39* la differenza tra l'oggetto pallinato e quello as built. La definizione degli elementi di piccole dimensioni è maggiore. Resta comunque il fatto che i componenti non rispettano la funzionalità voluta e non si ha la rotazione nella zona del giunto.

Aggiungendo questa fase di post processing a delle migliorie dal punto di vista del design e del processo, si potrebbe ottenere un componente funzionale.

ANALISI DEI RISULTATI

I risultati ottenuti in questa prima iterazione non sono stati quelli attesi. Nella prova di sbloccaggio degli elementi, molti di essi si sono rotti.

Per analizzare al meglio ciò che non è andato bene durante la fase di design e di produzione, sono state fatte diverse osservazioni.

Inizialmente sono stati misurati gli elementi, per vedere se, dal punto di vista dimensionale, rientravano nell'intorno delle dimensioni nominali. La precisione del processo è di $\pm 0,1$ mm.

Le prove di misura sono state fatte con un calibro, valutando le dimensioni lungo gli assi x , y e z e misurando lo scostamento rispetto al valore nominale.

In *Figura 40* è possibile visualizzare il sistema di riferimento adottato e le misure nominali del componente. L'altezza nominale lungo l'asse z , non riportata nelle immagini, è di 2,5 mm.

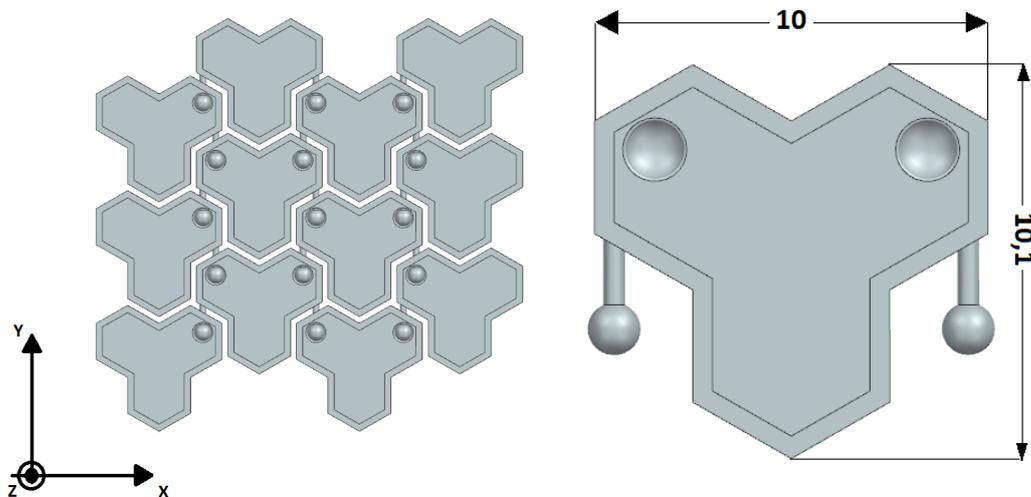


Figura 40 : Asse di riferimento per le prove di misura e dimensioni nominali lungo gli assi X e Y

I valori misurati in x , y e z , di ciascun elemento, sono stati registrati su un foglio di calcolo Excel ed è stato calcolato lo scostamento Δx , Δy e Δz .

Ciascun Concept presentava 12 elementi e per ciascuno di essi sono state fatte le 3 misure. È stato poi calcolato il valore medio per avere una stima indicativa della precisione del processo. I valori medi calcolati sono riportati in *Tabella 8*.

Si ricorda a questo punto che il Concept 2 non è stato prodotto per un errore di Data preparation e di conseguenza il Concept 3 è stato realizzato due volte.

I dati riportati in tabella mostrano una buona precisione del processo lungo gli assi. La misura lungo l'asse x è quella che meglio ha rispettato le misure. I problemi lungo l'asse y e lungo l'asse z, però, sono da riportare anche a condizioni esterne quali:

- Per l'asse y: la difficoltà della misura. Per misurare con il calibro l'elemento, era necessario appoggiarsi su tre punti, a differenza dell'asse x, dove si potevano sfruttare le superfici.
- Per l'asse z, il problema potrebbe essere dovuto alla fase di taglio. Avendo estruso i componenti di 1 mm per ancorarli alla piattaforma ed essendo il diametro del filo $d = 0,18$ mm, il taglio è stato fatto spostandosi di una quota di 0,82 mm rispetto allo 0. Potrebbe essersi verificato, però, un errore nel posizionamento della piattaforma che potrebbe poi aver generato il Δz risultante.

MEDIA	X	ΔX	Y	ΔY	Z	ΔZ
Concept_1	9,98	-0,02	9,87	-0,23	2,68	0,18
Concept_3.1	9,93	-0,07	9,85	-0,25	2,65	0,15
Concept_3.2	9,90	-0,10	9,77	-0,33	2,68	0,18
Concept_4	9,95	-0,05	9,88	-0,22	2,63	0,13

Tabella 8 : Prove di misura degli ingombri dei risultati della prima iterazione

Valutata la precisione degli ingombri generali, e visto che, dal punto di vista dimensionale, i componenti rientrano nei canoni richiesti, eccezion fatta per i problemi sopra citati, sono stati sezionati i componenti per vedere il comportamento dei giunti interni.

A partire dalle dimensioni nominali sul software CAD, sono state individuate le quote di taglio per cercare di analizzare i giunti lungo i loro assi. Secondo il sistema di riferimento riportato in *Figura 40*, sono stati analizzati i piani x-y, x-z, y-z al microscopio ottico e sono state prese le misure della sfera, del braccio e delle sedi di questi due. Sono state prese tre misure indicative per ciascun di essi, per alcuni campioni degli elementi di ciascun Concept. L'analisi a campione serviva per individuare i principali problemi riscontrati durante la stampa.

In *Figura 41* sono riportati alcuni esempi delle sezioni effettuate lungo ciascun piano, seguite, in *Figura 42* dalla corrispondente immagine al microscopio.

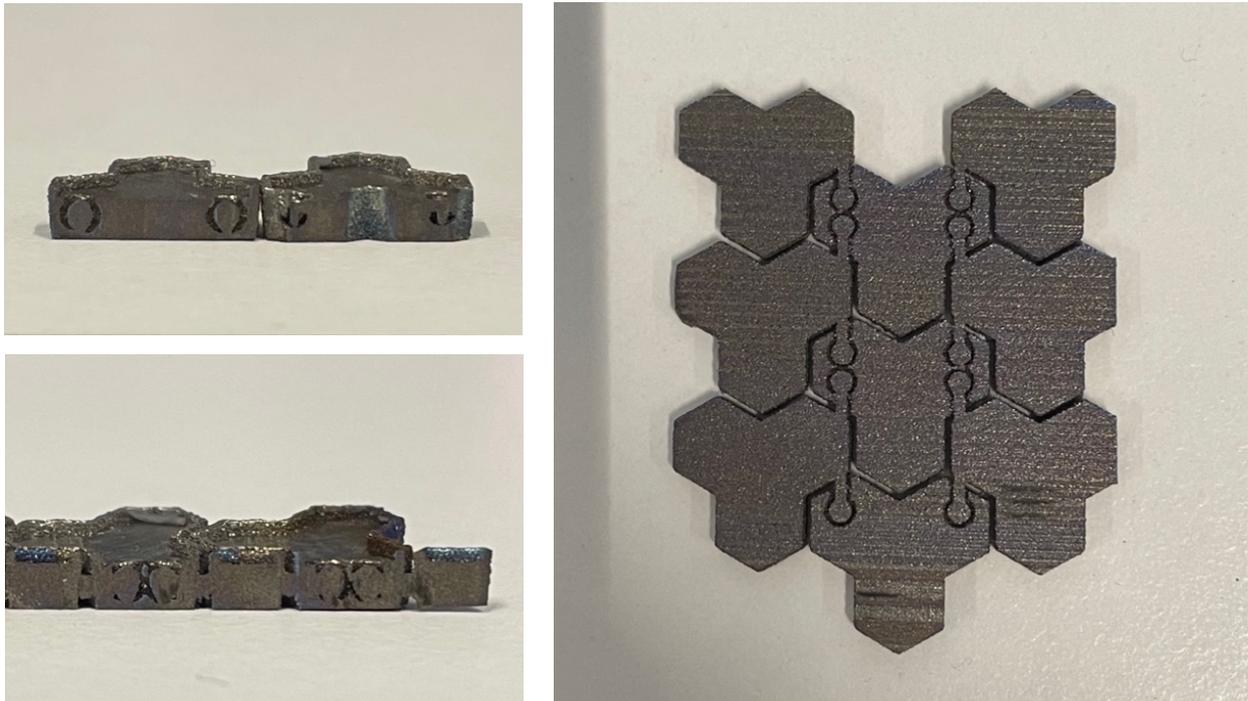


Figura 41 : Esempi di sezioni analizzate per la prima iterazione

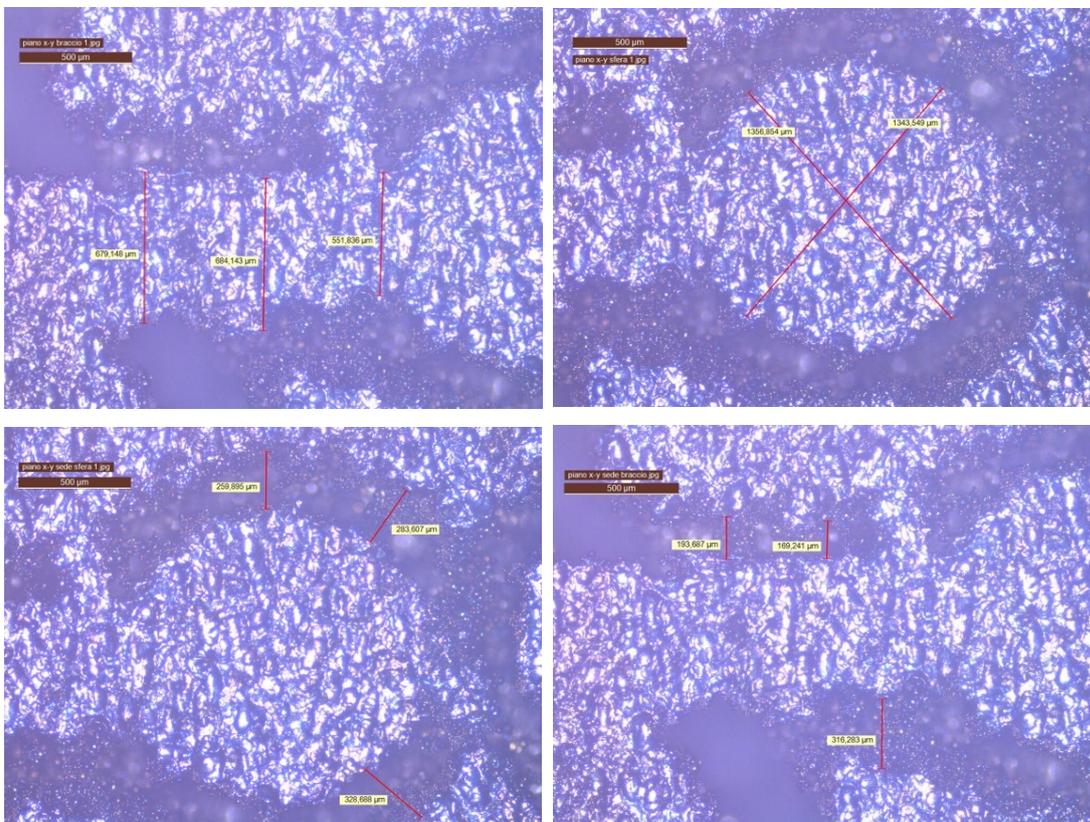


Figura 42 : : Misure al microscopio elettronico. Esempi di misure prese per ciascun piano per braccio e sede e sfera e sede

Le misure prese sui piani sono state tabellate su un foglio Excel ed è stata calcolata la media di quelle prese, tranne nel caso in cui gli elementi si sono fusi tra loro e non è stato possibile prendere le misure.

In seguito, sono state confrontate con i valori nominali del diametro della sfera, del braccio e del gioco.

È stata calcolata, poi, la variazione espressa in micrometri, considerando che la precisione del processo rientra all'interno di $\pm 0,1$ mm ovvero ± 100 μm .

In *Tabella 9* sono riportati i valori nominali.

	Concept 1	Concept 3	Concept 4
Diametro Sfera	1350 μm	1400 μm	1400 μm
Diametro Braccio	550 μm	750 μm	500 μm
Gioco (sul raggio)	300 μm	200 μm	200 μm

Tabella 9 : Dimensioni nominali dei giunti

In *Tabella 10* sono riportate le dimensioni medie calcolate su più prove, e il Δ rispetto alla dimensione nominale. Sono poi evidenziati i valori fuori tolleranza di processo. Si può osservare che, lungo lasse di costruzione, sul piano x-y, le dimensioni vengono rispettate, si ha una buona precisione dimensionale sia per il giunto che per la sede.

Lo stesso non si può dire per gli altri piani. In alcuni casi i pezzi si sono fusi insieme e non è stato proprio possibile prendere le misure. In altri casi i valori non rientrano nelle tolleranze volute. Su un diametro di 1400 μm , una variazione di 279 μm rappresenta il 20% di differenza, una variazione non accettabile.

In generale si può osservare che, probabilmente a causa del ritiro volumetrico, il braccio e la sfera hanno dimensioni leggermente minori rispetto al nominale, le sedi, invece, hanno dimensioni maggiori.

	Concept 1		Concept 3		Concept 4	
	Misura (μm)	$\Delta(\mu\text{m})$	Misura (μm)	$\Delta(\mu\text{m})$	Misura (μm)	$\Delta(\mu\text{m})$
Sfera						
Piano x-y	1272,7	-77,3	1358,4	-41,6	1398,1	-1,9
Piano x-z	1545,5	195,5	1405,0	5,0	1679,0	279,0
Piano z-y	1545,3	195,3			1548,2	148,2
Braccio						
Piano x-y	494,3	-55,7	677,9	-72,1	422,3	-77,7
Piano x-z	629,7	79,7				
Piano z-y	632,8	82,8			500,2	0,2
Sede sfera						
Piano x-y	419,0	119,0	275,3	75,3	235,1	35,1
Piano x-z	270,0	-30,0	229,7	29,7	225,2	25,2
Piano z-y	420,2	120,2			257,1	57,1
Sede braccio						
Piano x-y	280,8	-19,2	226,1	26,1	272,1	72,1
Piano x-z	304,2	4,2	230,2	30,2	157,8	-42,2
Piano z-y	381,3	81,3			176,5	-23,5

Tabella 10 : Misure e scostamenti rispetto alle dimensioni nominali dei giunti. In azzurro i valori critici

OUTPUT

Al termine della prima iterazione si possono trarre le seguenti conclusioni: le dimensioni sono risultate in media coerenti con i limiti del processo, il problema principale, però, lo si riscontra nelle geometrie del giunto.

Sul piano x-y la circolarità è stata rispettata. Negli altri piani il problema è evidente e fa sì che l'oggetto non rispetti la funzionalità voluta.

Questo problema può essere associato a una doppia causa:

- Dal lato del processo, si osserva che, un layer thickness di 60 μm non fornisce un risultato accettabile dal punto di vista della qualità superficiale e dei dettagli sia esterni che interni
- Dal lato del design sono state riscontrate diverse criticità. Si è visto che, un gioco sul raggio minore di 0,3 mm non è consentito per la realizzazione del giunto. Le prove 1 e 4 che avevano un gioco di 0,2 mm hanno i giunti e le sedi fusi insieme. Per questo motivo per le prossime revisioni del design verrà usato un gioco maggiore. Il Concept 3, nonostante non sia funzionale, è la migliore di questa prima iterazione, sia per quanto riguarda il gioco, che per le dimensioni caratteristiche utilizzate. Il diametro del braccio è maggiore rispetto agli altri design e questo ha fatto sì che alcuni giunti, durante lo sbloccaggio, non si sono rotti. Da ciò emerge che il calcolo del momento flettente agente sul braccio del giunto non è sufficiente. Bisogna prevedere un diametro maggiore per fare in modo che, durante lo sbloccaggio, il giunto vinca la resistenza data dalla polvere intrappolata nella sede e dalle eventuali microfusioni.

Un'altra criticità riscontrata dal punto di vista del design riguarda l'apertura sulla parte superiore degli elementi della maglia. Si è osservato che le dimensioni risultano molto piccole e, di conseguenza, è difficile rimuovere la polvere e il materiale in eccesso accumulato nelle sedi.

I punti di forza e i punti di debolezza individuati con la produzione dei primi quattro campioni sono l'output della prima iterazione. Le considerazioni fatte sul processo e sul design sono il punto di partenza per le prossime prove.

3.3.2 Parametri di processo

Visti i risultati ottenuti con il primo job di prova, si è deciso di fare dei cambiamenti sui parametri di processo. Per migliorare la qualità del componente è stato effettuato uno studio sui parametri con un layer thickness di 30 μm per analizzare la VED e la produttività muovendosi nell'intorno dei parametri a disposizione all'interno dell'azienda. Sono anche stati realizzati dei campioni utilizzando dei parametri presenti in letteratura.

Sono stati prodotti tredici cubetti delle dimensioni di 13x13x13 mm. A ciascuno di essi è stato assegnato un set di parametri differente. Il Cubetto 1 è stato processato con i parametri dell'azienda; i Cubetti dal 2 al 9 sono stati processati muovendosi nell'intorno dei parametri del Cubetto 1, basandosi su alcuni studi presenti in letteratura e individuando i migliori parametri da modificare per ottenere una densità ottimale. I Cubetti dal 10 al 13 sono stati processati utilizzando i parametri risultati dalle ricerche bibliografiche. Si riportano a questo proposito i riferimenti.[43] - [49]

Le prove effettuate e i risultati ottenuti sono riportati in *Tabella 11*

Cubetto	Produttività (cm^3/h)	VED (J/mm^3)	Densità media percentuale sabbiati	Densità media percentuale lucidati
1	12,96	50,00	100,0	100,0
2	14,26	45,45	99,8	100,1
3	11,66	55,56	100,1	100,5
4	12,96	41,67	100,0	99,9
5	14,26	37,88	99,9	
6	11,66	46,30	99,9	100,2
7	12,96	33,33	99,7	
8	14,26	30,30	99,4	
9	11,66	37,04	100,1	
10	10,37	41,67	99,7	
11	5,83	74,07	100,6	
12	9,20	68,47	100,1	101,0
13	13,50	45,33	100,0	

Tabella 11 : Prove per l'analisi dei parametri di processo, variazioni di produttività e densità di energia per unità di volume.

Risultati ottenuti in termini di densità

Il Job per la produzione dei provini è riportato in *Figura 48*. Una volta separati dalla piastra, i provini sono stati sabbiati ed è stata fatta la prova di densità con la bilancia di Archimede.

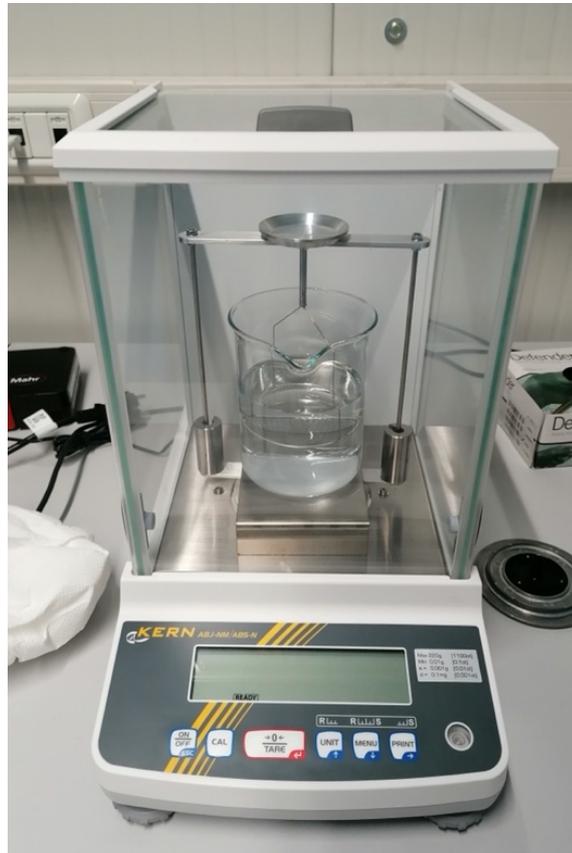


Figura 43 : Bilancia di Archimede per le prove di densità

Per ciascun provino sono state fatte quattro misure ed è stata calcolata la media percentuale della densità di ciascuno di essi. In seguito a questa prova, i cui risultati sono riportati in *Tabella 11*, sono stati scartati i provini con i risultati peggiori.

In generale, però, i valori di densità ottenuti per i cubetti rimasti erano tutti prossimi al 99-100%. Considerando che, superato il 98%, i valori forniti con la prova di Archimede non sono più considerati attendibili, si è deciso di fare un'ulteriore selezione sulla base della resa estetica dei cubetti.

I provini selezionati presentavano infatti una qualità superficiale migliore rispetto ad altri. Considerata l'applicazione per cui si sta svolgendo questo studio dei parametri, si è ritenuto opportuno valutare anche questo fattore.

I provini selezionati in questo caso sono sei, ovvero: i cubetti 1, 2, 3, 4, 6 e 13, che sono riportati in *Figura 44*.

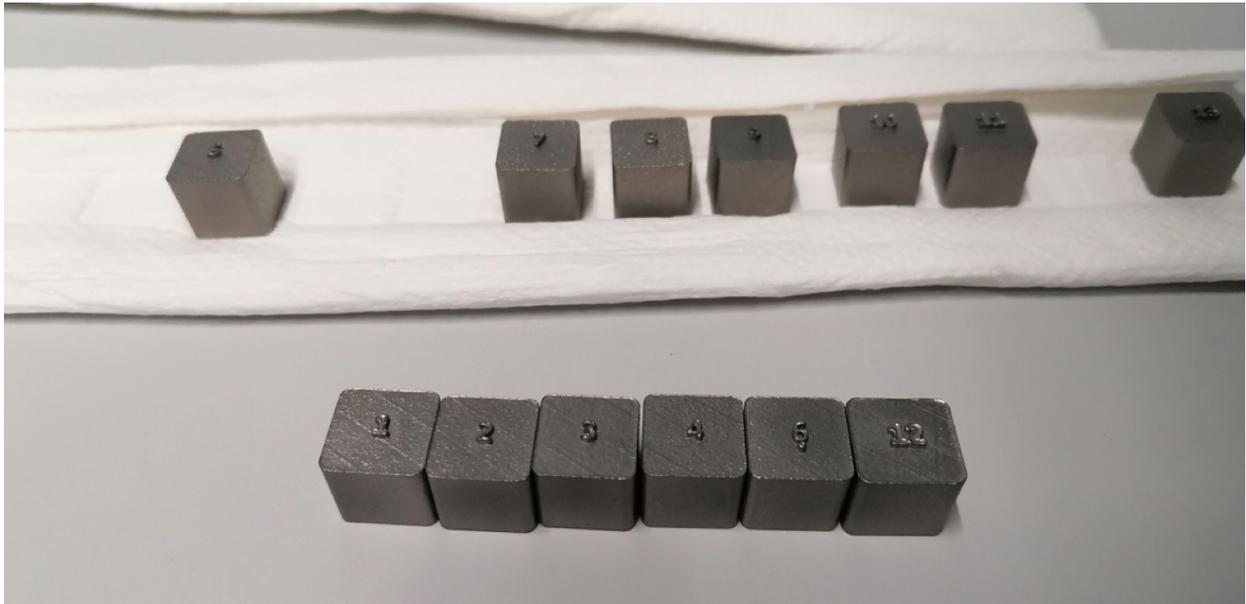


Figura 44 : In primo piano: cubetti selezionati in seguito alle prime prove di densità

I provini selezionati sono stati misurati con il calibro per assicurarsi che i parametri utilizzati permettessero di avere delle dimensioni all'interno delle tolleranze date dal processo e, in seguito, sono stati lucidati ed è stata fatta una seconda prova di misura alla bilancia di Archimede.

Anche in questo caso i risultati della prova hanno prodotto dei valori di densità elevati. Per questo motivo si ritengono tutti i parametri validi per la produzione, per questo livello di selezione. Sarebbe interessante svolgere prove più approfondite che, però, non erano oggetto di questa tesi.

Per la scelta dei parametri a questo punto è stata vista la produttività di ciascun set. Sono stati esclusi di conseguenza il Cubetto 3, il Cubetto 6 e il Cubetto 12, poiché presentavano un valore leggermente inferiore agli altri. Il Cubetto 4 è stato escluso, nonostante gli ottimi risultati, poiché era l'unico che presentava un valore di densità poco minore del 100%.

Tra il Cubetto 1 e il 2, ovvero i migliori selezionati in questa breve analisi, i risultati sono di poco differenti. Guardando la produttività sarebbe da scegliere il Cubetto 2. Considerando però che all'interno del Job dei provini, sono stati inseriti dei campioni del bracciale prodotti con i parametri del Cubetto 1 e sono stati ottenuti dei risultati soddisfacenti, si è scelto di optare per questi.

Si vuole precisare, però, che questa scelta è legata a questo caso di studio. Per ulteriori applicazioni sarebbe da effettuare uno studio più approfondito.

3.3.3 Seconda iterazione

INPUT

A partire dagli output ottenuti durante la prima prova di stampa, sono state fatte delle considerazioni, sia sul design, che su processo per migliorare i risultati ottenuti.

Come visto dalla prima iterazione, a causa dei parametri di processo e a causa del design, i campioni prodotti non sono risultati funzionali. I risultati ottenuti sono da considerarsi come gli input di questa seconda iterazione del workflow.

Anche in questo caso si parte da una fase di design, seguita da una fase di data preparation, produzione e infine di analisi dei risultati.

DESIGN

A seguito dei risultati ottenuti durante la prima iterazione del lavoro, sono stati evidenziati dei particolari su cui poter agire per migliorare i risultati dal punto di vista del design.

Le prove proposte per la seconda iterazione presentano degli elementi comuni che sono frutto delle considerazioni fatte. L'eccezione riguarda il Concept 8 poiché questa altro non è che il Concept 2 riproposta, visti gli errori durante la data preparazione del primo risultato.

Gli elementi comuni ai Concept 5, 6 e 7 sono:

- Ispessimento del componente nella parte inferiore, come già visto nella prima iterazione: lo spessore, l'altezza complessiva è ora di 2.5 mm
- Per quanto riguarda l'ID 3, la luce tra le maglie di 0.4 mm. Una luce più piccola potrebbe non concedere la mobilità voluta agli elementi. Una luce più grande, esteticamente, crea troppo distacco tra gli elementi.
- Anche per quanto riguarda l'ID 4 si è deciso di fissare il gioco sul raggio a 0,3 mm. Con un gioco minore si ha la fusione del giunto con la sua sede, per questo si è fissato uguale per tutti.

Concept 5

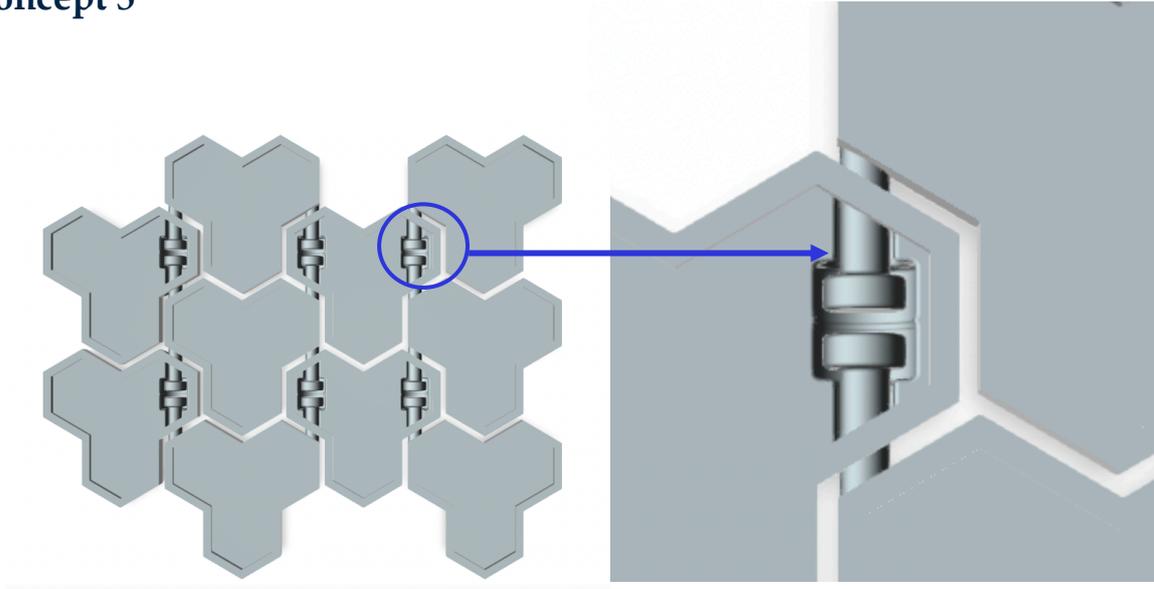


Figura 45 : Design Concept 5

Il giunto proposto è composto da un braccio di 0,8 mm e un disco di diametro pari a 1,4 mm. In questo modo, per quanto riguarda l'IDP 1 si ha la rotazione all'asse e il movimento lungo y.

Concept 6

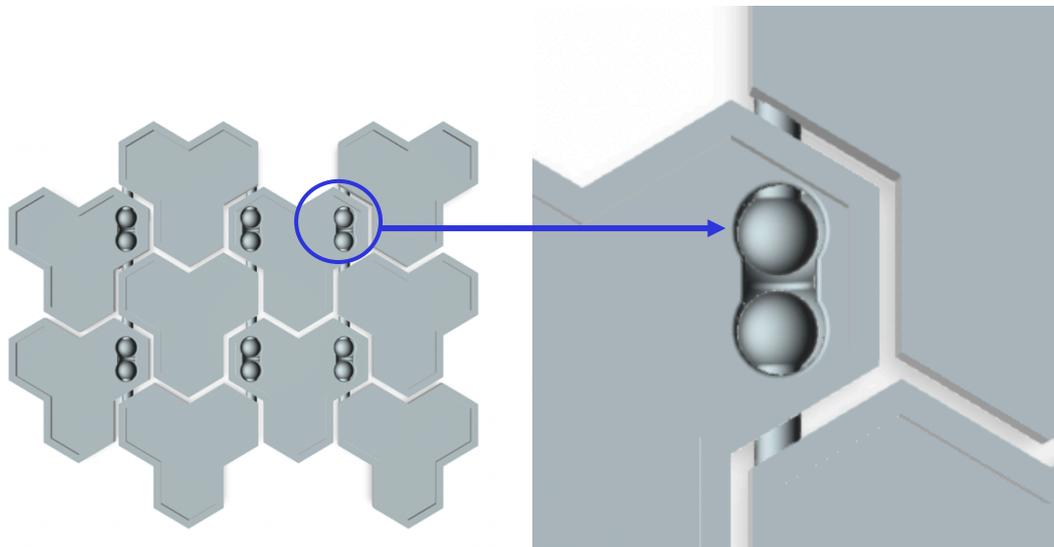


Figura 46 : Design Concept 6

Per la Concept 6 si ha un design fatto da un braccio e una sfera. Le dimensioni dei diametri sono pari a quelle della Concept 5. In questo caso, però, avendo una sfera, si ricerca una minore vincolo lungo gli assi. Il componente risulta comunque vincolato nella sua sede, ma dovrebbe garantire una piccola rotazione attorno agli assi.

Concept 7

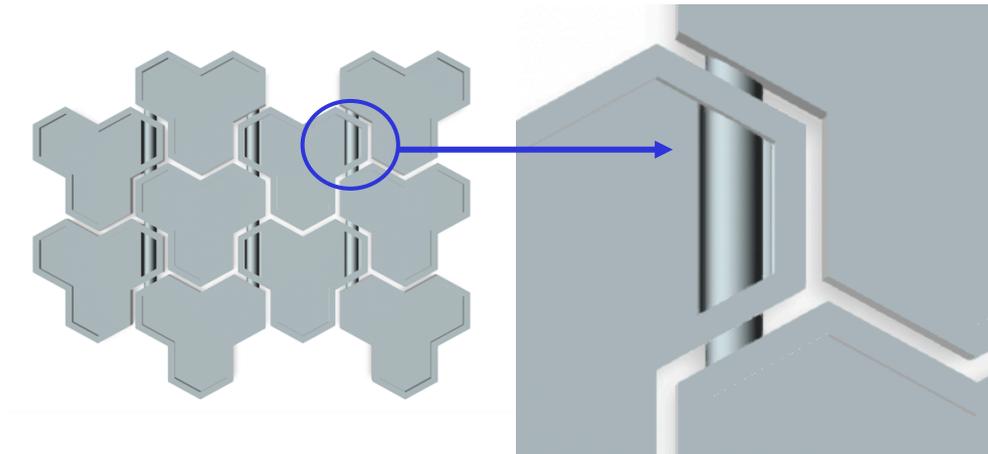


Figura 47 : Design Concept 7

Il design di questo Concept è diverso rispetto agli altri sia per l'IDP 1 che per l'IDP. In questo caso, si è voluto mantenere come unico grado di libertà la rotazione attorno all'asse del perno. Si ha un solo braccio realizzato come ponte fra le maglie. La dimensione caratteristica è una sola ed è il diametro del perno, pari a 1,4 mm. Questa prova è stata fatta per cercare di ottenere un giunto quanto più resistente possibile in base alle dimensioni caratteristiche.

Concept 8

La Prova 8 ha lo stesso design della Prova 2 riportato nel paragrafo della prima iterazione. Si è deciso di riproporlo poiché, durante la prima iterazione, per un errore durante la messa in macchina non è stato prodotto.

Anche in questo caso si propone una tabella riassuntiva dei principali parametri del design per le alternative proposte.

	Concept 5	Concept 6	Concept 7	Concept 8
Tipologia accoppiamento	Braccio + disco	Braccio + sfere	Braccio unico	sfere disallineate
Diametro braccio	0,9 mm	0,8 mm	1 mm	0,55 mm
Diametro secondo elemento	1,4 mm	1,4 mm	-	1,35 mm
Luce	0,4 mm	0,4 mm	0,4 mm	0,3 mm
Gioco	0,3 mm	0,3 mm	0,3 mm	0,5 mm

Tabella 12 : Principali caratteristiche dei quattro Concept di design della seconda iterazione

DATA PREPARATION

Come visto nella prima iterazione, una volta stabiliti i design da produrre, si passa alla fase di Data preparation. I passaggi seguiti sono gli stessi.

Si vuole porre l'attenzione sul fatto che, in questo caso, il Job comprende:

- Quattro nuovi design, ottimizzati sulla base dei risultati della precedente prova;
- Due design della prima iterazione, riproposti in modo tale da valutare la possibilità che il risultato della prova effettuata fosse dovuto solo ai parametri di processo e non al design;
- Tredici cubetti per la valutazione dei parametri di processo.

Si è deciso di effettuare un'unica stampa per la valutazione dei parametri e dei nuovi design. Al momento della stampa dei cubetti, infatti, erano già stati sviluppati i nuovi design ottimizzati e, di conseguenza, si è deciso di inserirli nel Job per svolgere una prima prova della combinazione dei parametri forniti e del design.

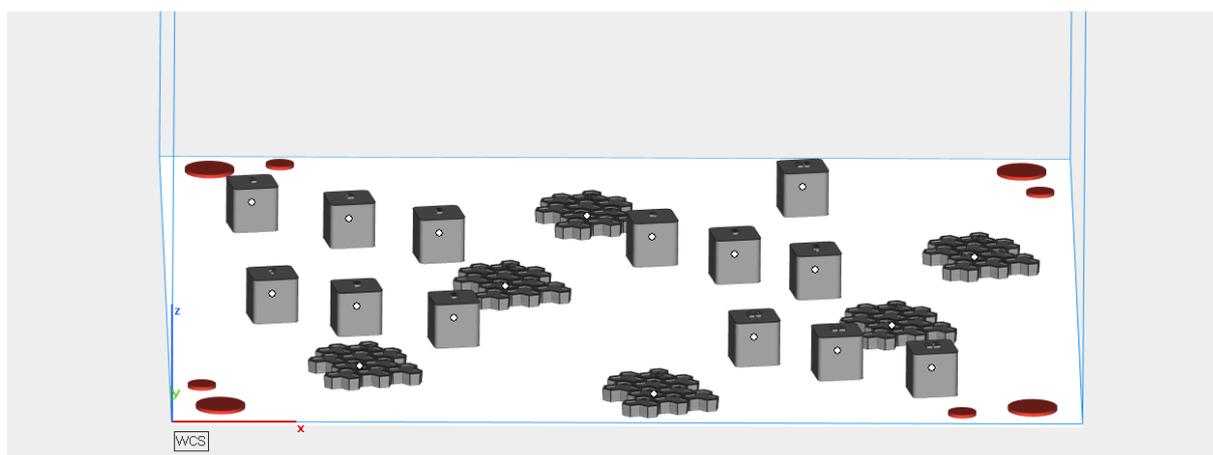


Figura 48 : Seconda iterazione, messa in macchina dei campioni di design e dei Cubetti per i parametri di processo

Anche in questo caso, il file STL generato non presentava errori, di conseguenza si è passati direttamente alla fase di messa in macchina. Simulando l'ambiente di stampa della macchina Print Genius 250, sono state disposti tutti i componenti, orientandoli come in figura, seguendo le stesse considerazioni fatte per il Job 1: i componenti sono stati orientati in modo tale da non avere superfici parallele alla lama.

Per evitare che i pezzi potessero danneggiarsi l'un l'altro durante la stampa, si è cercato di posizionarli a diverse altezze lungo l'asse y in modo tale da avere il meno possibile elementi alla stessa quota.

Il posizionamento sul piano X-Y è visibile in *Figura 49*:

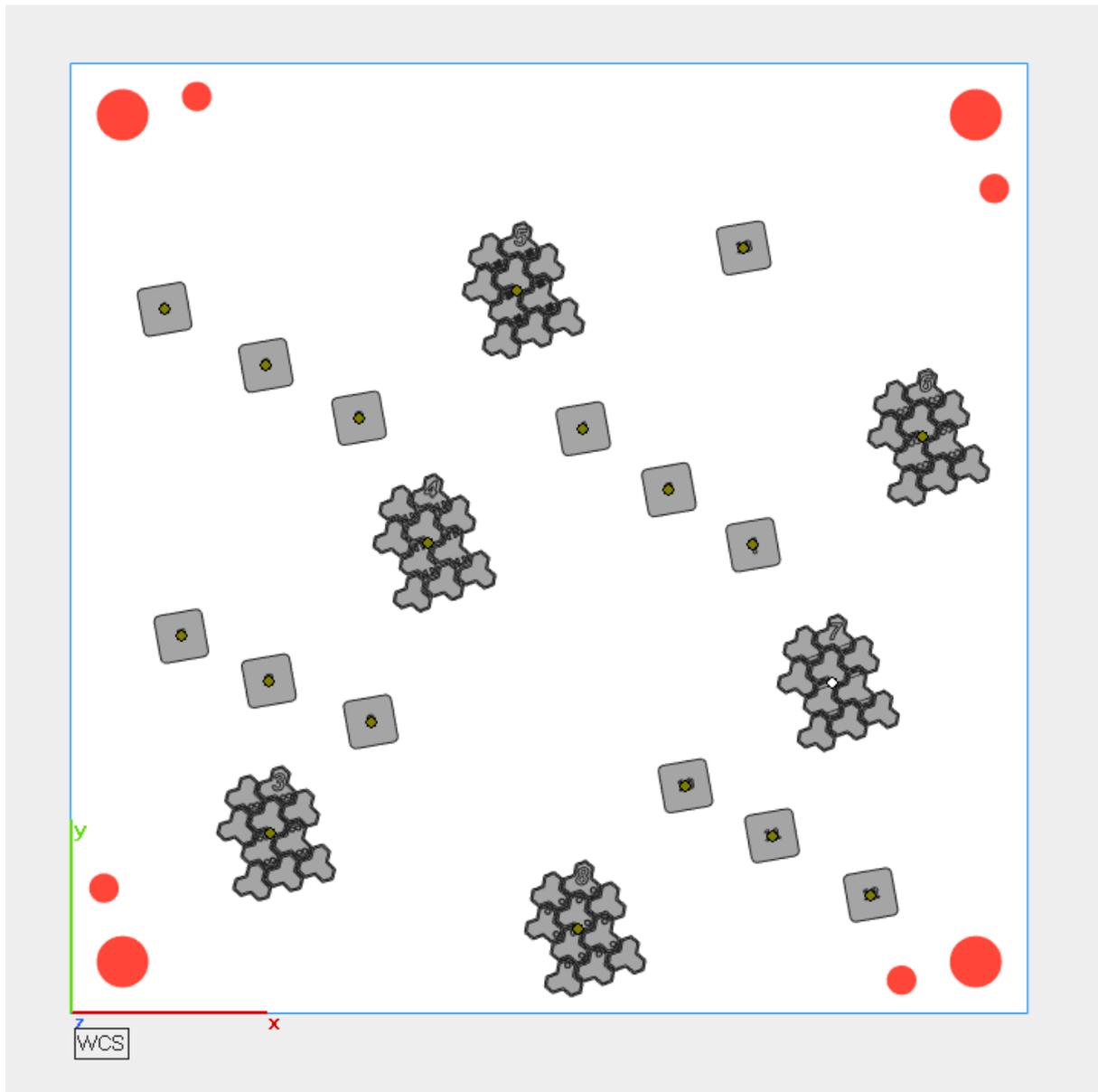


Figura 49 : Seconda iterazione, messa in macchina vista dall'alto

Per quanto riguarda i supporti, anche in questo caso, non sono necessari. Avendo molte superfici piane, i pezzi sono stati ancorati alla piattaforma, senza utilizzare altri supporti. In vista dell'operazione di taglio nella fase di post processing, i quattro campioni sono stati estrusi di 1 mm lungo l'asse Z.

In Figura 50 è riportato il valore di volume totale di materiale utilizzato per la stampa dei quattro campioni, espresso in mm^3 .

	Volume
Part(s)	39845.880 mm ³
Support	0.000 mm ³
Total	39845.880 mm ³

Figura 50 : Seconda iterazione, volume totale del job di stampa

Stabiliti orientamento e supporti, si passa alla fase di slicing. Il secondo job è stato processato utilizzando un *Layer thickness* di 30 μm .

I componenti vengono suddivisi in layer secondo le impostazioni fornite e secondo l'altezza del componente totale è pari a 3500 mm, comprensivi della parte e di 1 mm di estrusione.

A questo punto si passa al software EP Hatch. In *Tabella 13* sono riportati i due parametri principali, riassuntivi del blocco di parametri utilizzato per la stampa, la produttività e la VED, utilizzati per la produzione di questo dei campioni di maglie presenti nel Job. Gli stessi parametri sono stati assegnati al Cubetto 1. Tutti gli altri cubetti hanno diversi parametri, sulla base di come è stato indicato in *Tabella 11*.

Layer Thickness (μm)	Produttività (cm^3/h)	VED (J/mm^3)
30	12,96	50

Tabella 13 : Seconda iterazione, parametri di processo

Assegnati i parametri, si manda il file alla macchina di produzione per assegnare i componenti a ciascun laser. La divisione la si può osservare in *Figura 51*: gli elementi a sinistra vengono scannerizzati dal laser 1, mentre, quelli a destra, dal laser 2.

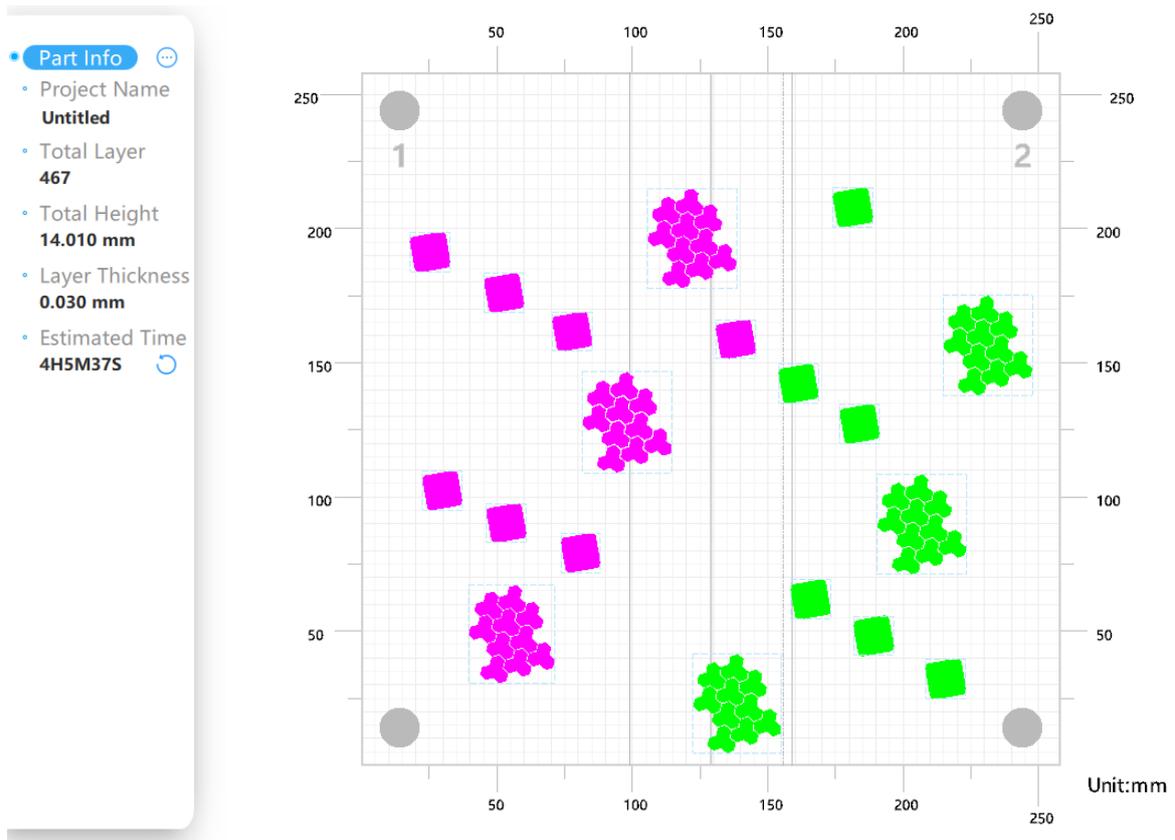


Figura 51 : Seconda iterazione, part info e printer user interface

È stata fatta una simulazione per valutare i tempi di stampa, l'altezza del job e il numero di layer. Le informazioni ottenute sono riportate nel software sotto la sezione Part Info visibile in *Figura 51*.

I tempi, in questo caso, sono molto maggiori. Ciò è dovuto al fatto che i Cubetti hanno un'altezza molto maggiore rispetto ai campioni delle maglie e, di conseguenza, aumentano il numero di layer da stendere e i costi di produzione.

PRODUZIONE E POST PROCESSING

La fase di produzione, in questo caso, è stata più lunga. Il tempo totale del Job, infatti, è stato di circa quattro ore. Questo è dovuto sia alla maggiore altezza dei provini, che alla maggiore superficie da scansionare. In *Figura 52* è possibile vedere la piattaforma di costruzione, appena ultimato il Job e ripulita la camera.

Già da questa immagine è possibile osservare che ci sono stati dei problemi nella produzione del Concept 3 e del Concept 8. La prima presenta dei difetti visibili già in superficie, ma è comunque stata ultimata. La seconda invece, presentava molti problemi già dai primi layer che avrebbero potuto rovinare la lama e inficiare sulla produzione di tutto il Job. Per questo motivo è stata bloccata la produzione non appena ci si è accorti del problema.



Figura 52 : Seconda iterazione, risultato della produzione

A questo punto è stata posizionata la piastra sulla macchina di taglio e sono stati separati i pezzi dalla piattaforma.

Una volta tagliati, visti i risultati ottenuti nella precedente iterazione sulla superficie e sul livello di definizione dei componenti, i campioni sono stati pallinati. Sono stati ottenuti i campioni in *Figura 53*, numerati dal 3 al 7.



Figura 53 : Concept da 3 a 7 in seguito a pallinatura

È subito possibile notare il difetto presente sul Concept 3. Per quanto riguarda gli altri concept, si riescono a distinguere perfettamente i giunti, le sedi e i dettagli della maglia. In seguito alla pallinatura, però, la maglia non risulta ancora mobile. Dall'analisi della prima iterazione si è visto che, nel caso migliore, associato al design della Concept 3, con un gioco sul raggio di 0,3 mm, si aveva comunque una fusione parziale della zona del giunto a sbalzo. La considerazione fatta dal punto di vista del design, di ingrandire le dimensioni del braccio del giunto, serve in questa fase per sbloccare la maglia. utilizzando delle pinze per il bloccaggio degli elementi, sono stati sbloccati applicando un momento torcente lungo l'asse dei bracci dei giunti. In questo modo, il braccio di diametro più grande, risulta avere una maggiore resistenza e vince la resistenza data dalla polvere intrappolata e dalle eventuali microfusioni presenti all'interno della sede.

ANALISI DEI RISULTATI

In seguito alle operazioni di post processing i risultati ottenuti sono risultati soddisfacenti rispetto alla prima operazione. I parametri utilizzati sono risultati essere validi. La validazione è stata ottenuta anche nella fase di analisi dei Cubetti, dal momento che, la densità ottenuta con la prova di Archimede è risultata di circa il 100% e dal punto di vista della produttività si riscontra un buon risultato rispetto agli altri utilizzati, secondo solo a un parziale aumento di velocità.

Durante le prove di sbloccaggio del materiale i design della prima iterazione riprodotti con i nuovi parametri a 30 μm hanno ceduto. Questo significa che, nonostante siano stati ristampati i provini più promettenti, dei quali si era riuscita a sbloccare almeno una maglia, i design precedenti non erano funzionali. I campioni hanno subito la rottura, come è possibile vedere in *Figura 54*, a causa del momento torcente, lungo il braccio del giunto.

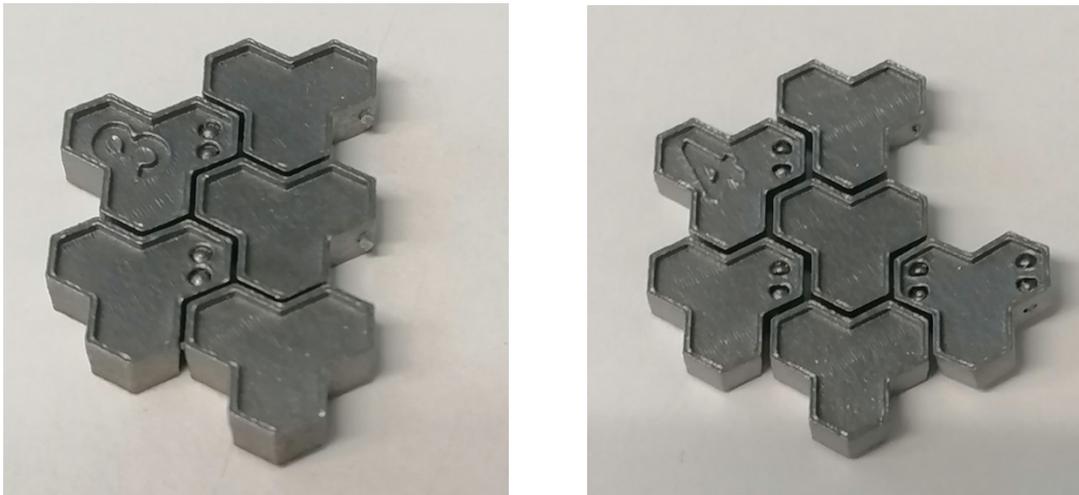


Figura 54 : Risultato dei Concept 3 e 4

I Concept 5, 6 e 7, invece, sono state sbloccate. In seguito a ciò, si è effettuata un'ulteriore pallinatura per cercare di rifinire anche le superfici interne al giunto e per cercare di evacuare al meglio la polvere.

I risultati ottenuti sono stati molto soddisfacenti. Tutte e tre le prove avevano la mobilità voluta in base ai gradi di libertà concessi in fase di design. Le maglie riescono a ruotare fra loro come è possibile osservare in *Figura 55*.

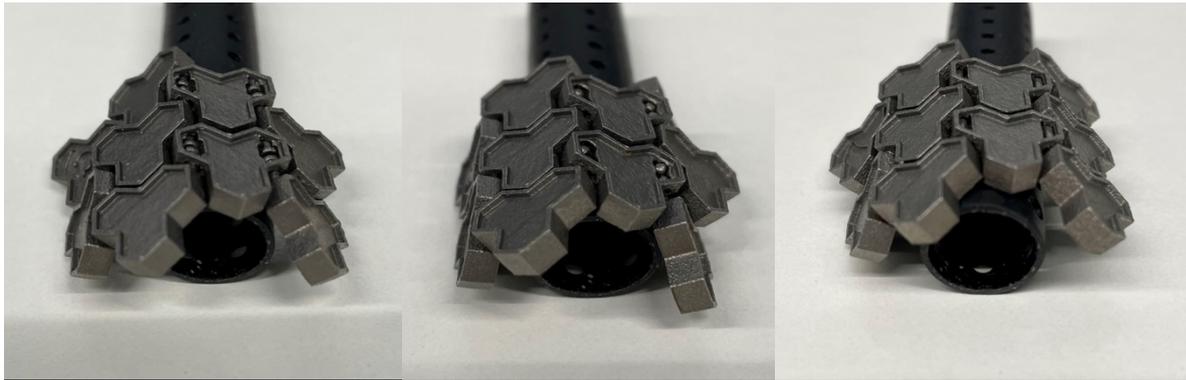


Figura 55 : Valutazione della mobilità del Concept 5, Concept 6 e Concept 7

Considerando che il braccio del supporto utilizzato per le immagini in *Figura 55* ha un diametro pari a 10 mm e che, sulla base delle misure standard fornite dall'azienda BMC gioielli, la curvatura massima di un bracciale ha un raggio di circa 20 mm, i campioni risultano avere una curvatura adeguata.

In particolare, si può osservare che, la Concept 5 non ha un movimento regolare e una curvatura minore della Concept 6. Alcuni elementi della maglia, inoltre, si sono rotti. Questo potrebbe essere dovuto alla tipologia di giunto. La differenza di sezione tra l'albero e il disco potrebbe indebolire il giunto per un elevato fattore di intaglio.

La Concept 6 risulta essere la più mobile da un punto di vista della curvatura e della fluidità del movimento. I giunti hanno resistito bene alla prova di sbloccaggio e il risultato soddisfa i requisiti prestabiliti.

Anche la Concept 7 ha fornito un ottimo risultato. La curvatura risulta minore, questo a causa della natura del sistema di giunzione. Tra tutte le prove è sicuramente la più resistente, meno soggetta a rottura durante lo sbloccaggio della maglia.

OUTPUT

Il risultato della seconda iterazione si ritiene adeguato come soluzione per la produzione. I tre campioni che sono stati sbloccati rappresentano tre possibilità di produzione di un bracciale completo.

Anche dal punto di vista parametri utilizzati si sono raggiunti i risultati voluti. Per questo motivo, si può reputare completa la fase di studio e ottimizzazione e si può proseguire presentando le tre varianti al cliente.

In seguito alla concept selection si potrà poi proseguire con la produzione del bracciale completo.

CAPITOLO 4 – PRODOTTO FINALE

4.1 Concept selection

In questo capitolo verrà analizzata la fase di produzione dell'intera struttura del bracciale, valutando quali sono i vantaggi e gli svantaggi dal punto di vista del processo e dal punto di vista economico.

A partire dai tre risultati ottenuti dal processo iterativo esposto nel Capitolo 3, è stata fatta un'analisi con il cliente in modo tale da individuare quale delle tre opzioni fornite fosse quella più in linea con il progetto fornito.

Come visto nel capitolo precedente, i tre campioni differiscono per la mobilità e per la rigidità del giunto. È stato osservato che:

- Il Concept 5 ha buone capacità di movimento in più direzioni, specialmente lungo l'asse Y ma sembrerebbe avere minore resistenza a trazione e concentrazione delle tensioni sul cambio di sezione repentino.
- Il Concept 6 ha ottime capacità di movimento in più direzioni e una buona resistenza, anche se nella fase di sbloccaggio si potrebbe avere qualche criticità in più rispetto al Concept 7.
- Il Concept 7 ha elevata resistenza del giunto: il braccio unico di sezione maggiore risulta essere molto performante, non si rischia la rottura durante la fase di sbloccaggio delle maglie. Allo stesso tempo però, si ha maggiore rigidità e movimenti ridotti. L'unico gradi di libertà, infatti, è quello attorno all'asse del braccio.

Tra le tre proposte, quella più in linea con il progetto iniziale è risultata la soluzione con le sfere, ovvero il Concept 6. I gradi di libertà concessi, fanno sì che il tester abbia una maggiore fluidità al tatto, cosa molto importante per quanto riguarda l'indossabilità del gioiello.

Il Concept 5, nonostante abbia una buona mobilità, è stato escluso poiché non presenta una fluidità accettabile.

Per quanto riguarda la soluzione con il singolo perno, invece, è stata valutata più in linea alla realizzazione di una maglia per un orologio, poiché i gradi di libertà concessi renderebbero, nel complesso, il bracciale troppo rigido.

Dal punto di vista della qualità superficiale, la produzione dei campioni è risultata in linea con i risultati attesi. Si ricorda che in seguito al processo di fabbricazione additiva, i componenti hanno subito una pallinatura per rimuovere lo strato di ossido dovuto al taglio e per permettere di evacuare al meglio la polvere.

Selezionato il campione che più rispettava i requisiti richiesti, sono state affrontate le valutazioni per la produzione della maglia completa.

Per la realizzazione del prodotto finito è necessario conoscere le misure standard adottate. Queste sono riportate nell'immagine in *Figura 56*.

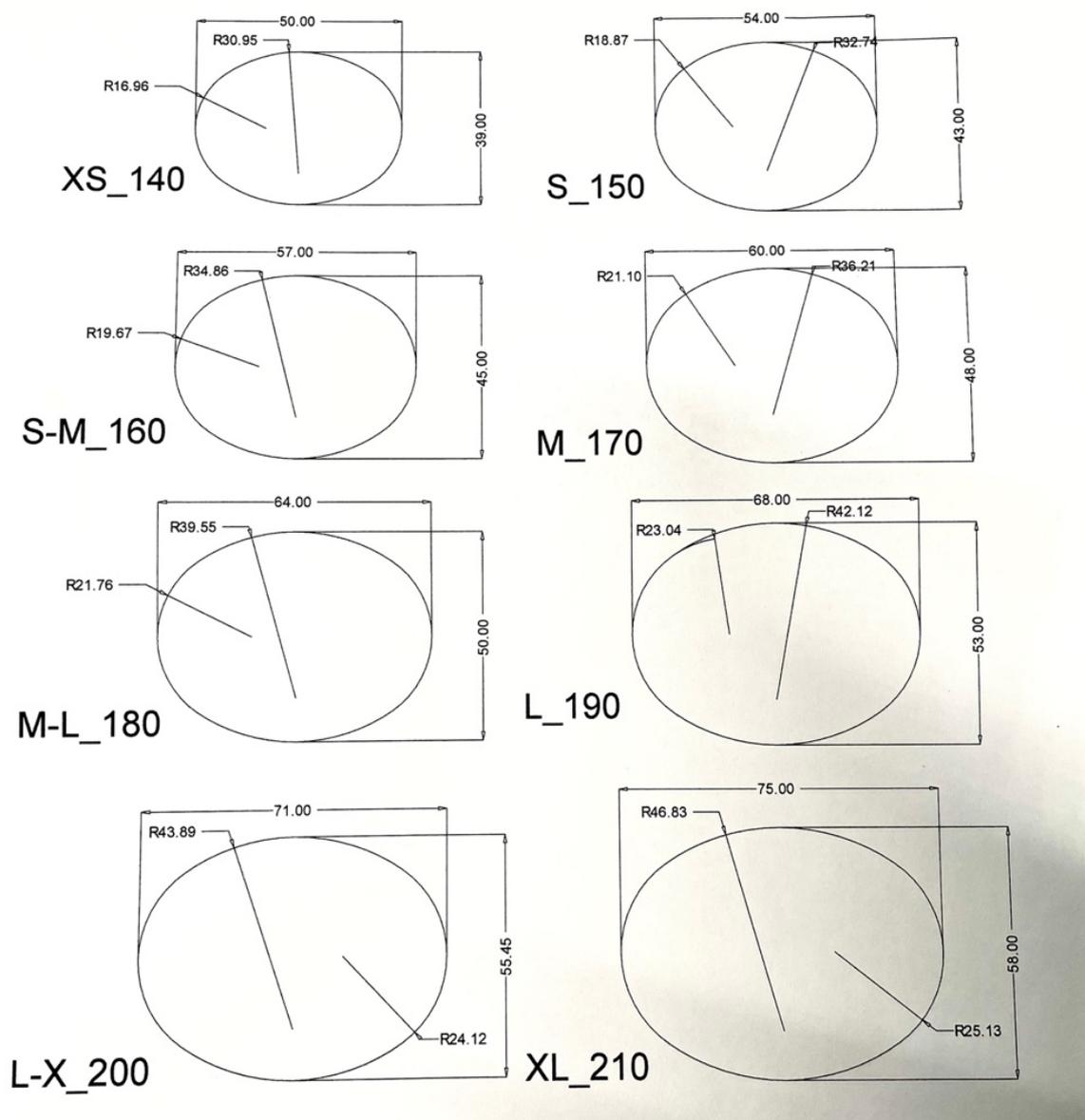


Figura 56 : Misure standard per la produzione di un bracciale

Tra le misure standard si è deciso di utilizzare la taglia S_M poiché una delle più comuni. La dimensione del bracciale lungo l'asse x sarà, quindi, di 160 mm.

Un ulteriore fattore considerato è quello della chiusura del bracciale. Un sistema standard prevede la chiusura a T. questa dovrebbe essere collegata alla maglia per mezzo di anellini di giunzione per permettere la mobilità della chiusura. Dal momento però che è stata realizzata la maglia per cercare di eliminare la fase di assemblaggio, si è deciso di valutare un sistema di chiusura alternativo che fosse stampato anch'esso direttamente in macchina.

Le due considerazioni fatte in questa fase hanno permesso la realizzazione della maglia in file CAD, necessario per la produzione.

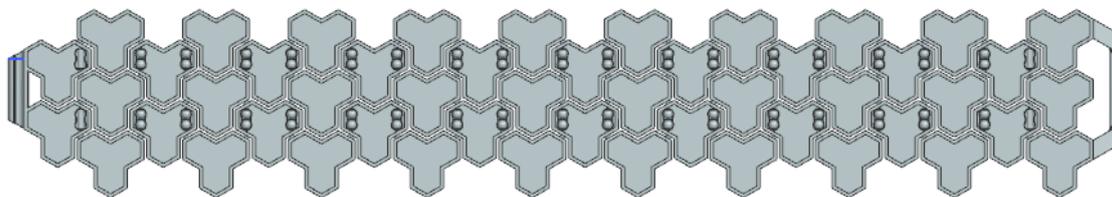


Figura 57 : Design finale del bracciale

Il risultato ottenuto è riportato in *Figura 57*. Si è deciso di mantenere la soluzione con tre file di elementi per una sola motivazione estetica. Sarà poi proposta una seconda versione del bracciale, esposto nel paragrafo successivo.

Il bracciale è formato da una maglia di lunghezza pari a 160 mm. Per questa misura sono necessari 50 elementi, considerando l'alternanza di file di due elementi e file di tre.

I giunti sono quelli del Concept 6, eccezion fatta per le modifiche dovute alla realizzazione della chiusura negli elementi delle file finali, che hanno i giunti del Concept 7. Questa modifica è stata fatta per dare maggiore rigidezza al sistema di chiusura e permettere facilmente di aprire e chiudere il bracciale.

Nel dettaglio, il sistema di chiusura realizzato è un sistema a incastro a scatto. È costituito da un perno che si trova sul lato destro del componente e una sede sul lato sinistro.

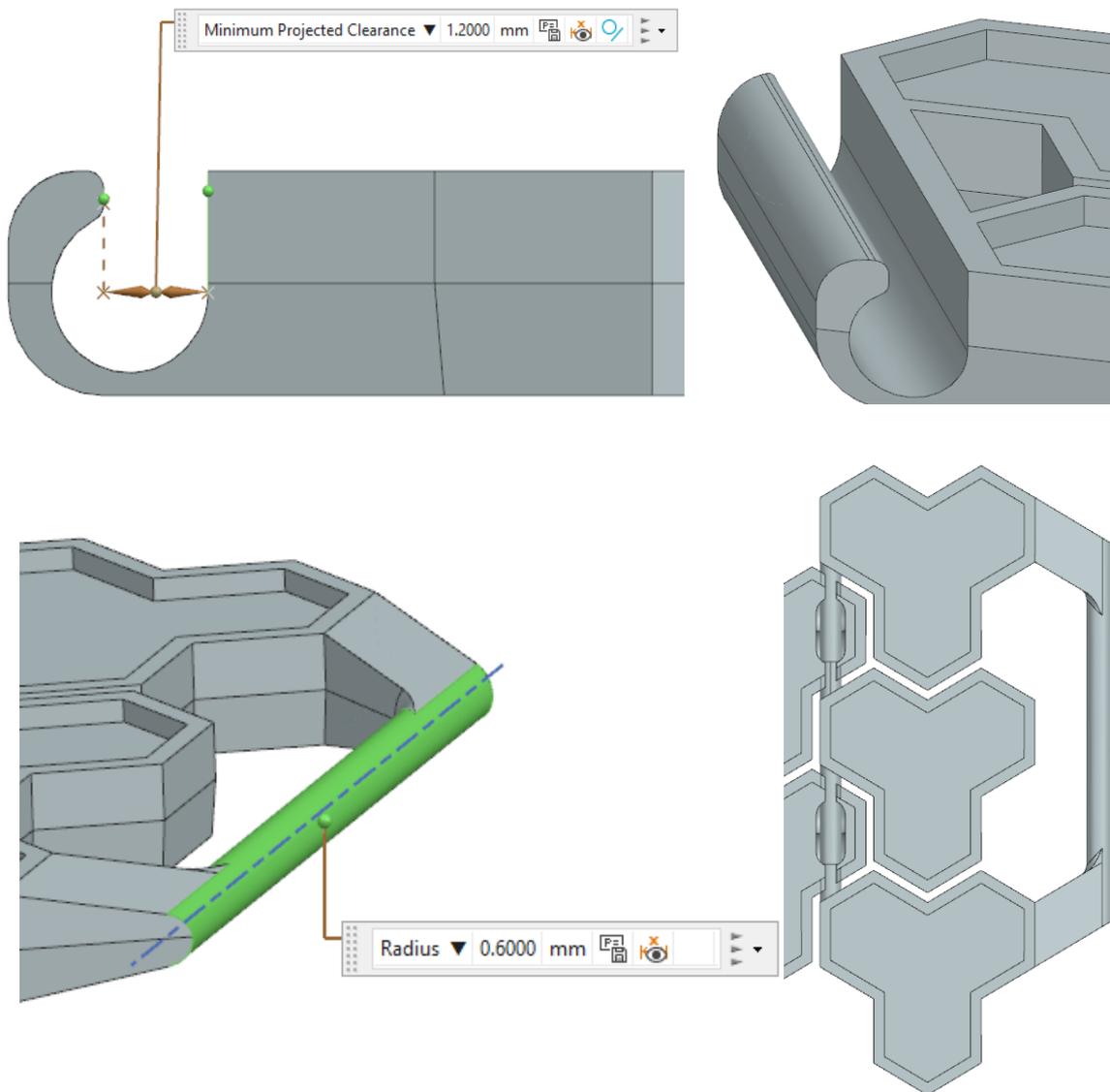


Figura 58 : Sistema di chiusura

La dimensione del perno è di 1,2 mm, pari all'ingresso nella sede. La sede poi prevede una zona più larga per ospitare il perno una volta chiuso il bracciale. Sia la sede che il perno sono stati uniti alle ultime maglie del bracciale come è possibile vedere in *Figura 58*.

4.2 Produzione del componente

Oltre alla versione proposta dal cliente, nella produzione del prototipo, è stata realizzata una seconda versione a scopo puramente estetico.

Il design realizzato è riportato in *Figura 59*.

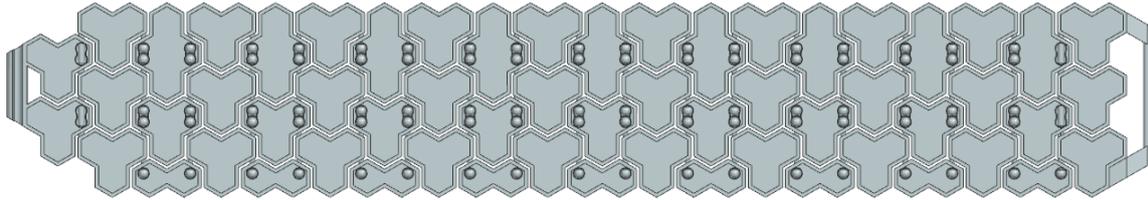


Figura 59 : Design finale del bracciale, seconda soluzione

Realizzato il file CAD della maglia completa si passa alla fase di produzione. Come esposto nel precedente paragrafo, sono state realizzate due versioni del bracciale, per una sola motivazione estetica.

La fase di produzione è suddivisa come per le iterazioni presentati nel Capitolo 3, della fase di Data preparation, della fase di stampa e della fase di Post processing.

Per la fase di Data preparation, i passaggi sono stati quelli di correzione del file, orientamento in macchina e inserimento dei supporti. L'orientamento dei pezzi nella piattaforma è riportato in *Figura 60*.

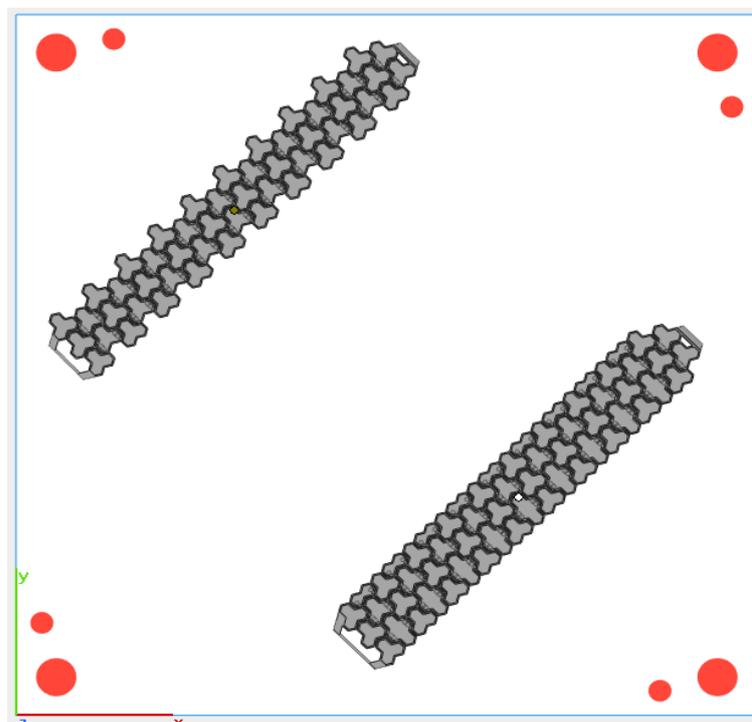


Figura 60 : Messa in macchina per il Job di produzione

In questo caso, dal momento che è stata inserita anche la chiusura, è stato necessario l'utilizzo dei supporti per il tipo di geometria che questa presenta.

Sono stati inseriti dei supporti a cono per la parte a sbalzo (il perno) e dei rinforzi per la sede.

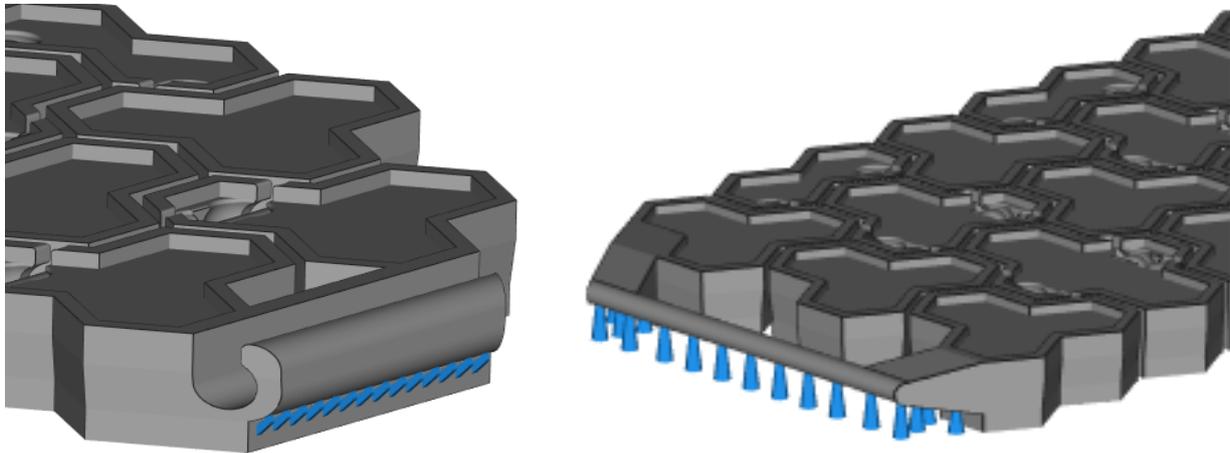


Figura 61 : Supporti del Job di stampa

Una volta generati i supporti e inserite le parti, si ottiene il volume totale della stampa in termini di materiae ei componenti, materiale dei supporti che, in questo caso, è diverso da zero, e materiale totale della stampa. I valori espressi in mm^3 sono riportati in *Figura 62*.

	Volume
Part(s)	12068.854 mm^3
Support	7.874 mm^3
Total	12076.728 mm^3

Figura 62 : Volume totale di materiale utilizzato per il Job di produzione

Una volta fatto questo sono stati inseriti i parametri di processo. Anche in questo caso, quelli utilizzati sono quelli della seconda iterazione riportati nel precedente capitolo.

In seguito alla produzione del componente, si è passati all'operazione di taglio. Il tempo di taglio complessivo è stato di circa cinque ore.

Prima dello sbloccaggio si è fatta una prima operazione di pallinatura. La fase di sbloccaggio è necessaria per far sì che il bracciale abbia la mobilità voluta.

Dopo la stampa dei primi due prototipi con il giunto realizzato per il Concept 6, sono stati riscontrati alcuni problemi nella fase di sbloccaggio. Per questo motivo è stata riproposta un prototipo con delle leggere modifiche in termini di design e di parametri. Per quanto riguarda i parametri di processo si è scelto di operare sui parametri di downskin, diminuendo del 10% la potenza e aumentando del 40% il numero di layer.

Per quanto riguarda il design, invece, è stato osservato che la parte critica la chiusura della sede sopra il braccio. Per questo motivo si è scelto di effettuare un taglio sulla parte superiore del componente di 0,4 mm. In questo modo non si ha la fusione del braccio. Inoltre, il gioco è stato leggermente aumentato, di 5 centesimi di millimetro, per permettere maggiore mobilità. Per fare ciò, l'altezza del componente è stata aumentata di 0,2 mm in modo tale da avere una sezione resistente della maglia maggiore. La modifica effettuata è visibile in *Figura 63*.

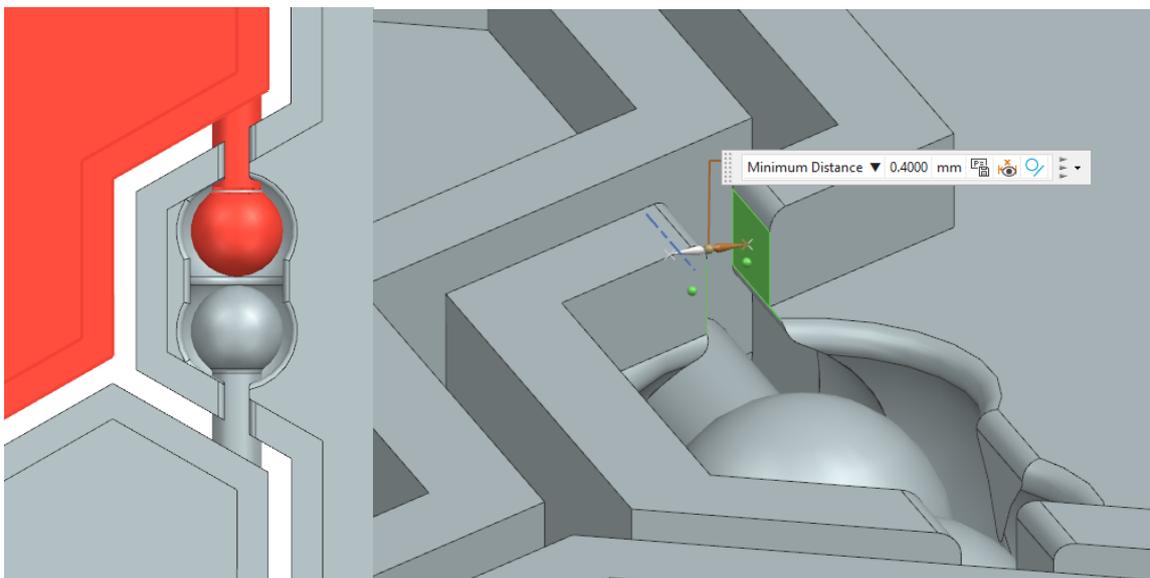


Figura 63 : Modifica per la produzione

I due componenti, così modificati sono stati importati nuovamente in Magics, orientati come nel caso precedente e esportati nel software della macchina. In *Figura 64* è possibile vedere le informazioni principali della produzione come l'altezza del layer e il tempo di produzione, pari, in questo caso, a circa 2 ore.

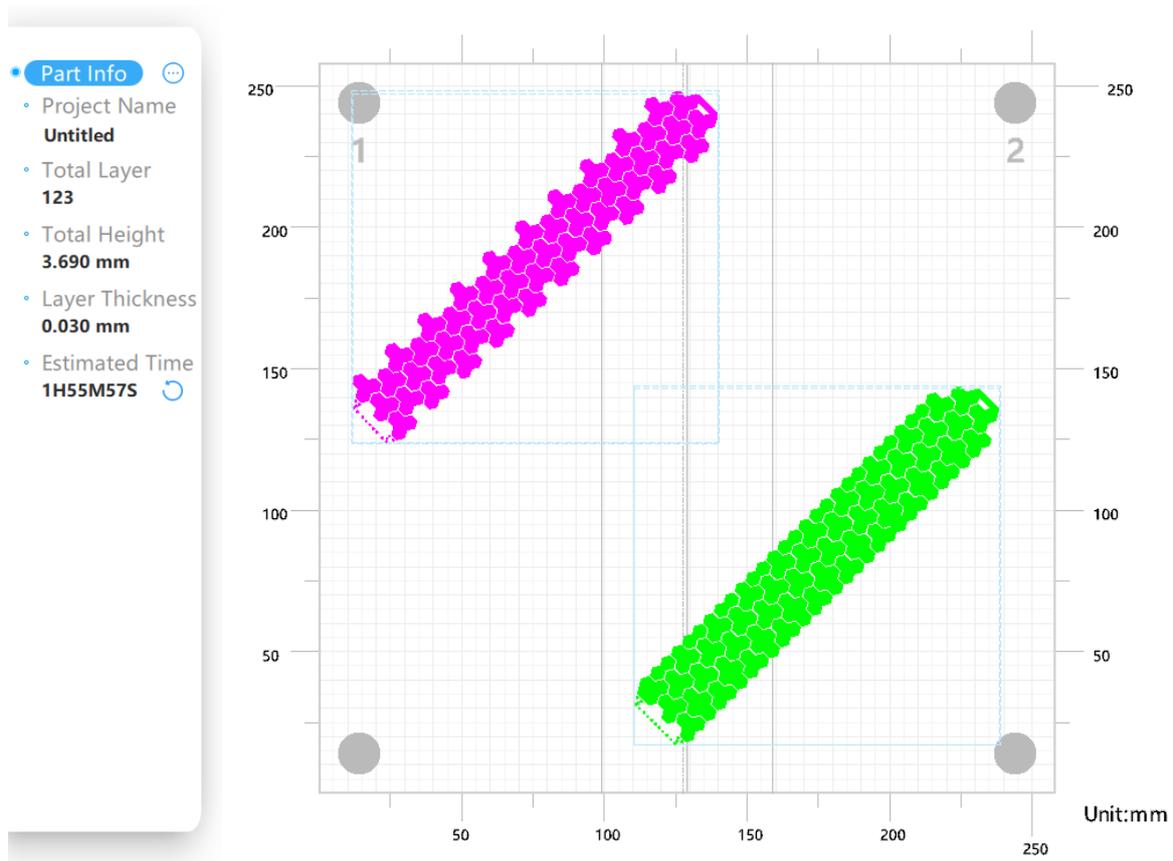


Figura 64 : Job di produzione, part info e printer user interface

La fase di stampa vera è propria è visibile in *Figura 65*, dove si può vedere, anche il layer in cui si sta realizzando la sede del giunto.

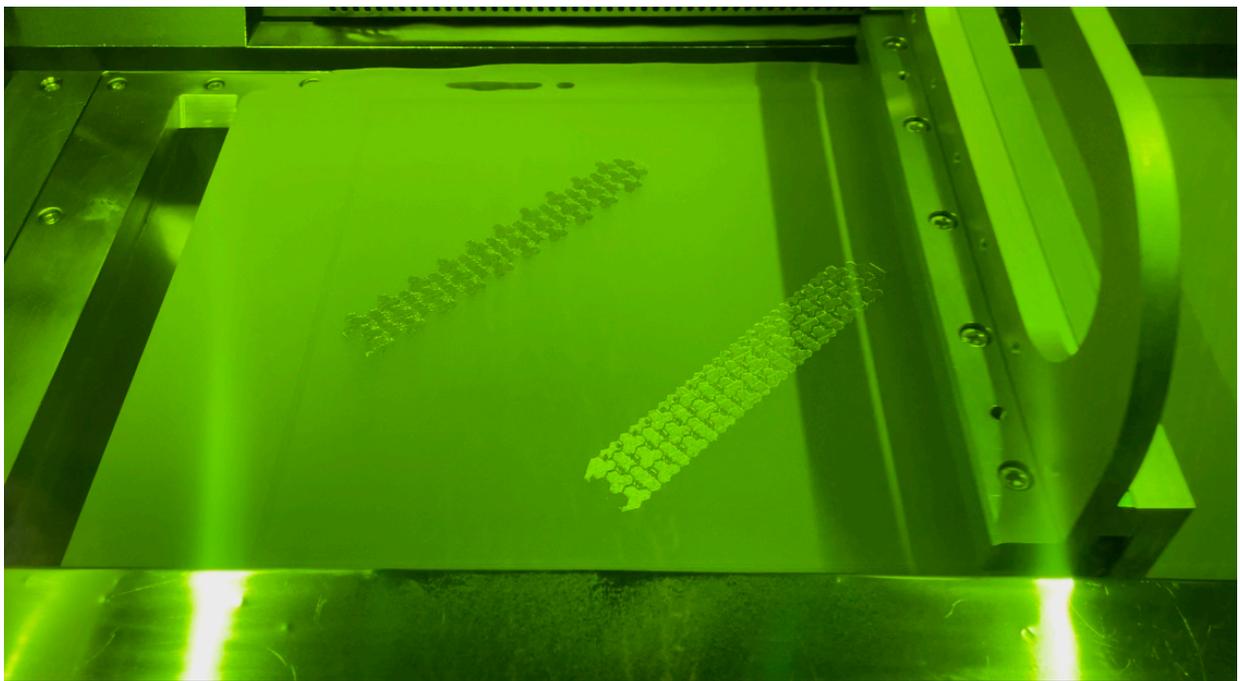


Figura 65 : Camera di lavoro con il Job di produzione

Il risultato ottenuto, dopo aver separato i pezzi dalla piattaforma, e dopo averli sabbiati, è riportato in figura.

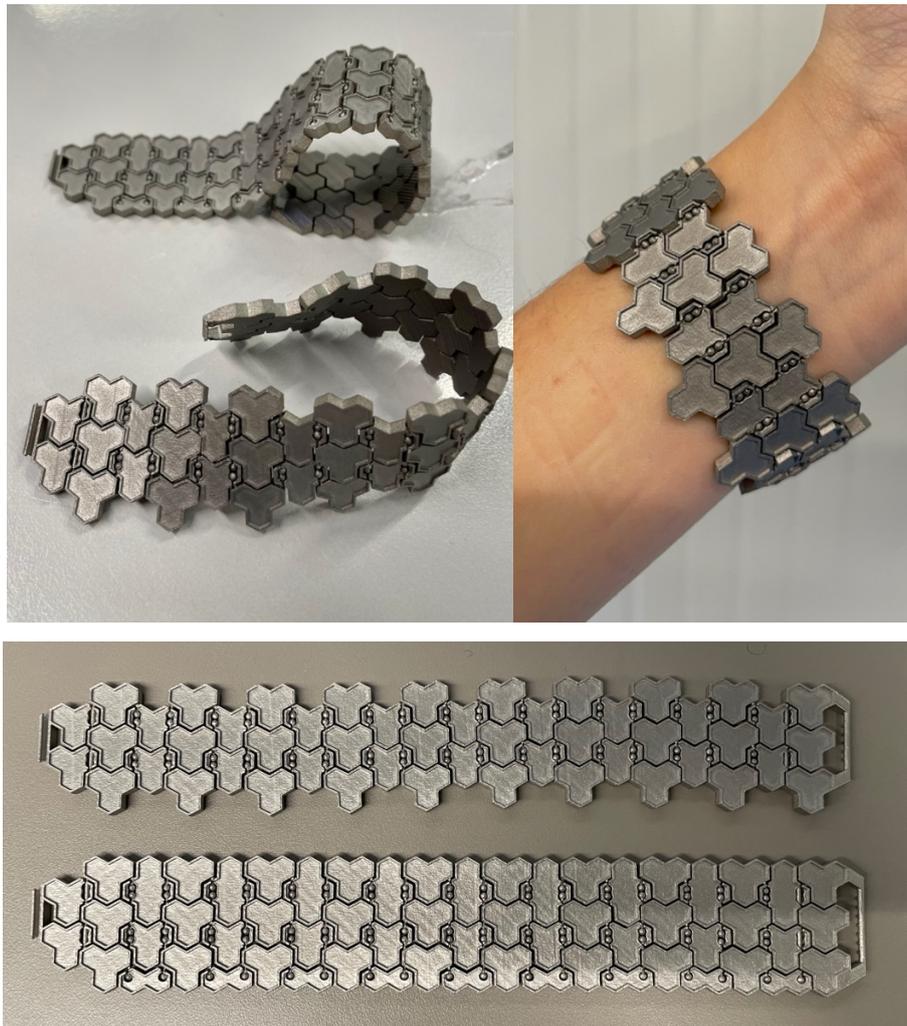


Figura 66 : Risultato finale

È stata fatta un'analisi di rugosità superficiale sul componente sabbiato, prendendo due maglie per la valutazione ed effettuando circa tre misure. Si è osservato che la rugosità Ra è al di sotto dei $5\mu\text{m}$. In particolare, le misure effettuate hanno dato intervalli di valori tra $4,1\mu\text{m}$ e $4,4\mu\text{m}$. un esempio dell'output è riportato in Figura 67.

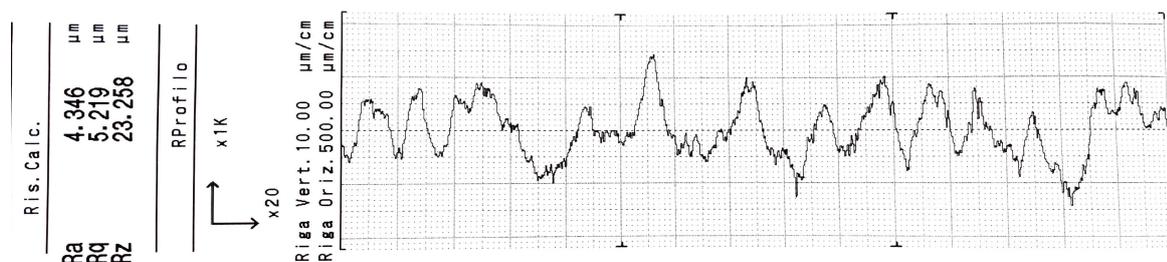


Figura 67 : Risultato della prova di rugosità

4.3 Analisi preliminare dei costi e confronto fra le tecnologie

Per avere un'idea indicativa dei costi di produzione del componente è stata fatta un'analisi confrontando la tecnologia Laser Powder Bed Fusion e la microfusione, utilizzata da BMC Gioielli per la produzione dei gioielli.

I dati sulla microfusione sono stati forniti da BMC e riguardano:

- la realizzazione della cera per lo stampo,
- la fusione di un cilindro di materiale
- i costi di assemblaggio.

Di contro, con la LPBF, sono stati considerati:

- i tempi di stampa, scarico macchina,
- taglio EDM
- rimozione dei supporti e post-processing.

Lo studio è stato fatto considerando la produzione della stessa versione di design, ovvero quella di *Figura 57*. Questo è stato fatto per facilità poiché, con la microfusione è possibile avere in un solo albero circa 50 maglie, ovvero quelle presenti in tale versione del bracciale di questa misura.

L'analisi di seguito riportata vuole essere indicativa, frutto del caso particolare su cui si sta applicando e di alcune ipotesi semplificative per il calcolo. In *Tabella 14* sono riportati i valori indicativi sia per cera persa che per AM, per la produzione di un prototipo, due, quattro, sei e dodici. In base ai dati forniti per quanto riguarda la fusione a cera persa, si stima che, dal momento che la produzione di un solo bracciale occupa un intero cilindro di fusione, sia una linea unica per ciascuna operazione.

Per quanto riguarda l'AM, invece, passare da 1 a 6 componenti, fa diminuire il costo unitario per prodotto poiché la produzione avviene in un unico Job. Considerando che i bracciali vengono realizzati all'interno della macchina Print Genius 250, si arriva alla saturazione del volume di stampa dopo 6 componenti. Per questo motivo, una volta superato quel valore sarà necessario un nuovo Job.

I risultati dell'analisi sono riportati in *Tabella 14*.

I risultati ottenuti sono stati rappresentati nei grafici in *Figura 68 e 69* per avere una rappresentazione immediata dell'andamento dei costi.

Per quanto riguarda il costo unitario, riportato in *Figura 68*, si può vedere come, in questo caso, per la fusione a cera persa il costo sia sempre costante. Per la tecnologia L-PBF, invece, si ha una decrescita fino alla saturazione della piattaforma, quantificata come sei componenti per Job. Da lì in poi si ha un andamento costante.

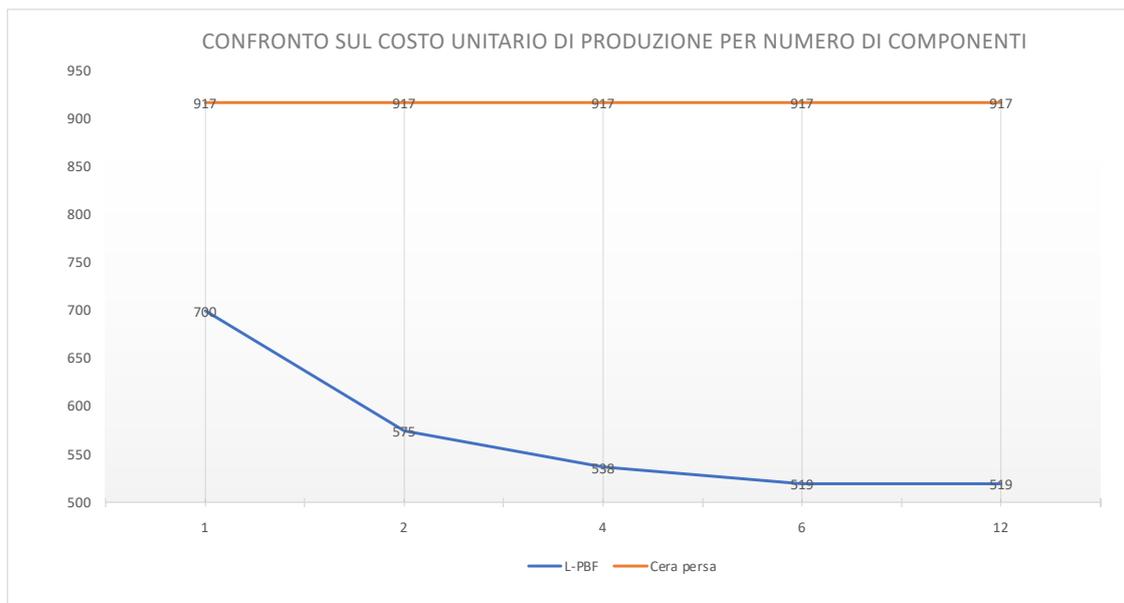


Figura 68 : Confronto sul costo unitario di produzione

Il costo totale, invece, ha un andamento sempre crescente per entrambi i sistemi di produzione, ma si può osservare come la pendenza della curva sia minore per la tecnologia additiva e, di conseguenza, il costo totale di produzione.

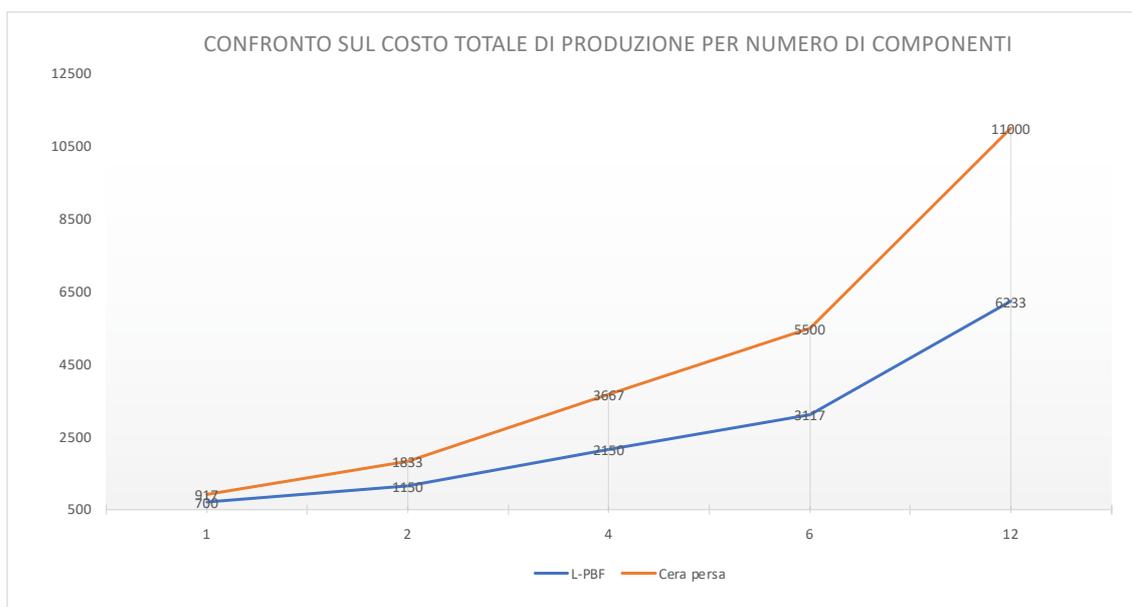


Figura 69 : Confronto sul costo totale di produzione

Le ipotesi semplificative effettuate per questa analisi preliminare dei costi, non tengono conto degli scari di produzione che potrebbero esserci con entrambe le tecnologie. Uno dei limiti dell'AM per questa applicazione, infatti, è che non è possibile riparare il componente o assemblarlo in altri modi.

Un confronto tra le due tecnologie riguarda proprio questo aspetto: nella produzione delle singole maglie, è sempre possibile aggiungere componenti, toglierli, o aggiustare il bracciale. Nel caso di produzione in AM, se si ha un solo braccio rotto, l'intero componente non è funzionale.

CONCLUSIONI

L'obiettivo principale di questo lavoro di tesi, svolto nella linea pilota di Additive Manufacturing del competence center CIM 4.0, era quello di valutare la possibilità di produrre la maglia di un bracciale in lega di titanio con tecnologia LPBF, sfruttando le potenzialità della tecnologia ed eliminando la fase di assemblaggio tra gli elementi che lo compongono.

Per fare ciò, utilizzando un processo iterativo, a partire dall'analisi del progetto del gioiello proposto dall'azienda BMC Gioielli, sono stati valutati i principali requisiti funzionali necessari fino ad arrivare alla produzione di tre diverse tipologie di prototipi funzionali, per la produzione di un bracciale completo. Il processo iterativo ha visto diverse fasi che possono essere riassunte in:

- Analisi degli input
- Fase di re-design for additive manufacturing
- Fase di data preparation e valutazione dei parametri ottimali per il processo
- Fase produttiva: stampa del componente e post-processing
- Analisi dei risultati e output dell'iterazione.

I passaggi appena elencati riassumono lo studio svolto per valutare la possibilità di realizzare il componente assemblato direttamente in macchina.

Una volta trovate più soluzioni di design attuabili, si è passati alla fase di produzione vera e propria. È stato selezionato un solo modello di giunto e un set di parametri da portare avanti per la realizzazione di un bracciale completo di chiusura.

Secondo un primo dimensionamento statico sul braccio, questa tipologia di giunto presenta una buona resistenza sia a trazione che a flessione: il diametro da 0,8 mm permette una resistenza a flessione del braccio di 3,6 kg. Dal momento che non è un componente critico o soggetto a forti sollecitazioni, si è ritenuto un risultato accettabile, fermo restando che, prima della produzione in serie, potrebbero essere fatti dei calcoli più approfonditi, utilizzando dei software a elementi finiti andando a valutare le sollecitazioni reali a cui ciascun perno è sottoposto.

Sono state poi proposte due diverse varianti di design, entrambe con il giunto formato da un braccio e una sfera e con la sede nella maglia stessa che ne segue la geometria con un gioco sul raggio pari a 0,35 mm. La produzione delle due varianti ha come

unico scopo la resa estetica del bracciale. A livello funzionale hanno entrambi le stesse peculiarità. Il sistema di chiusura realizzato segue la geometria delle maglie del bracciale ed è stato pensato come un sistema a incastro. Come spiegato nel Capitolo 4, la dimensione del perno è pari alla dimensione dell'ingresso della sede. In questo modo, è necessario applicare una forza minima per far entrare e uscire il perno e, dunque, per aprire e chiudere il bracciale.

Le due versioni di design prodotti sono riportati in Figura 70.

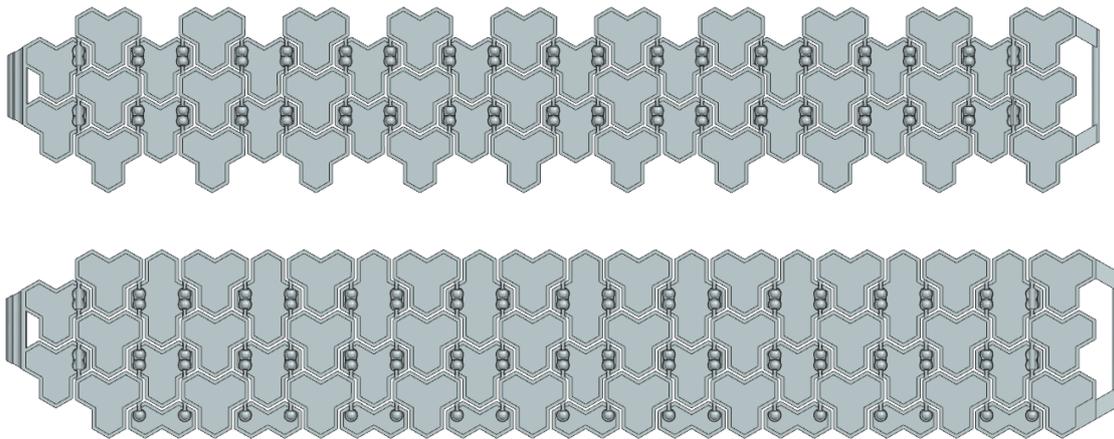


Figura 70 : Vista dall'alto dei due design prodotti

Per quanto riguarda i parametri di produzione utilizzati, dal momento che sono stati riscontrati dei buoni risultati con la produzione della seconda iterazione, riportata nel Capitolo 3, si è scelto di proseguire con quel set, andando poi a modificare i parametri del downskin come spiegato nel Capitolo 4. Il set di parametri utilizzato viene riportato per semplicità di visualizzazione in Tabella 15.

Layer Thickness (μm)	Produttività (cm^3/h)	VED (J/mm^3)
30	12,96	50

Tabella 15 : Parametri utilizzati per il Job di produzione finale

I risultati ottenuti soddisfano l'obiettivo prestabilito. Si è riusciti a produrre due componenti funzionali con la mobilità voluta. Il movimento attorno all'asse del giunto permette alla maglia di avvolgersi attorno al polso e, inoltre, la tipologia di giunto dà

maggior mobilità su più piani. Grazie a questo il bracciale può adattarsi al polso in modo più fluido e ha, di conseguenza, una migliore indossabilità.

L'oggetto prodotto è da considerarsi un semi-finito. È necessario agire sulla qualità superficiale con dei processi di finitura. Questo argomento non è stato oggetto di questa tesi, ci si è soffermati maggiormente sulla funzionalità sulla producibilità e sul confronto, a livello di prodotto semifinito, con il processo tradizionale utilizzato. È stata comunque effettuata una prova di rugosità su alcune maglie del prodotto sabbiato, raggiungendo valori di Ra minori di 5 μm . Come sviluppi futuri sarebbe interessante valutare i processi di finitura superficiale in modo tale da capire se il componente può soddisfare i requisiti estetici tipici del mondo della gioielleria.

Da un punto di vista economico, il prodotto, realizzato con tecnologia L-PBF, a seguito di un'analisi preliminare semplificativa, risulta vantaggioso rispetto allo stesso oggetto realizzato con fusione a cera persa, soprattutto per una piccola produzione. I costi trovati sono dei casi specifici, strettamente correlati capacità produttiva delle due aziende. Un'analisi più dettagliata, stimando anche il valore delle possibili perdite in fase di produzione, sarebbe da effettuare per avere un confronto più generico.

La produzione si è fermata in questo caso alla produzione di due prototipi preserie che hanno avuto la funzione di valutare tutti i passaggi produttivi e la resa finale del componente. In vista di una produzione vera e propria sarebbe interessante valutare la possibilità di parametrizzare il design sulla base delle diverse misure del polso. In questo modo potrebbero essere realizzati dei prodotti su misura, customizzabili a monte della produzione. La possibilità data dall'AM di eliminare la fase di assemblaggio è sicuramente un vantaggio poiché permette di snellire il ciclo produttivo. Allo stesso tempo però, sarebbe utile avere la possibilità di riparare il componente in caso di rottura, e dunque, un lavoro correlato a questa tesi potrebbe essere quello di trovare dei metodi di repairing.

Con questo lavoro di tesi è stato indagato l'utilizzo dell'AM nel campo della gioielleria. Sfruttando le potenzialità della tecnologia, si possono ottenere dei grandi vantaggi in termine di realizzazione e customizzazione dei prodotti. Tra quelle di AM, la tecnologia L-PBF è una delle maggiormente indicate in questo campo. In questo lavoro ci si è fermati ad uno spessore del layer di 0,03 mm. Diminuendo questo valore si potrebbero ottenere risultati ancora migliori.

Continuare ad approfondire l'utilizzo dell'AM in questo settore, visti i risultati di questo lavoro, potrebbe essere una scelta vantaggiosa.

BIBLIOGRAFIA e SITOGRAFIA

- [1] “rivoluzione industriale,” *Treccani*, vol. Enciclopedia online.
- [2] M. Romagnoli, “Pharma 4.0: come adeguarsi alla quarta rivoluzione industriale?,” *blog.mercurio.it*.
- [3] F. Tenaglia, “Quality 4.0-Digitalizzazione del processo di controllo qualità in un’impresa manifatturiera,” Politecnico di Torino, Torino, 2020.
- [4] K. Schwab, *La quarta rivoluzione industriale*. Milano, 2016.
- [5] “INDUSTRIA 4.0 - La quarta rivoluzione industriale,” *industria40.it*.
- [6] “Industry 4.0,” *bcg.com*.
- [7] “Transizione 4.0,” *innovaimpresa-cnaumbria.it/*.
- [8] F. Esiliato and A. C. Cagliano, “Advanced Manufacturing Solutions, Simulation, Additive Manufacturing e Augmented Reality: l’impatto delle tecnologie di Industria 4.0 attraverso analisi critica di casi studio,” Politecnico di Torino, 2021.
- [9] B. Ietto, C. Ancillai, A. Sabatini, E. Carayannis, and G. L. Gregori, “The Role of External Actors in SME’s Human-Centered Industry 4.0 Adoption: An Empirical Perspective on Italian Competence Centers,” *IEEE Trans Eng Manag*, 2022, doi: 10.1109/TEM.2022.3144881.
- [10] “Centri di competenza ad alta specializzazione,” <https://www.mise.gov.it/>.
- [11] “Competence Industry Manufacturing 4.0,” *cim40.com*.
- [12] “Designation: F2792 – 12a,” *ASTM International*. 2012. doi: 10.1520/F2792-12A.
- [13] S. Vinto, “Additive manufacturing: una storia di brevetti,” *Il progettista industriale*, Milano, Jan. 09, 2020.
- [14] L. Iuliano, “Slide del corso: Tecniche di fabbricazione additiva.” Torino, 2020.
- [15] I. el Aita, “Technologies in 3D-printing,” *Pharma excipients*, 2021.
- [16] M. Kitchoukova and N. Staneva, “Concurrent furniture engineering design, deformation and strength dimensioning of skeletons and structure of the upholstery of sofas view project perspectives in front of businesses in the forest industry to dealwith increasing competition View project,” *Researchgate.net*, 2014. <https://www.researchgate.net/publication/311614591>
- [17] T. Petrat, C. Brunner-Schwer, B. Graf, and M. Rethmeier, “Microstructure of Inconel 718 parts with constant mass energy input manufactured with direct

- energy deposition,” in *Procedia Manufacturing*, 2019, vol. 36, pp. 256–266. doi: 10.1016/j.promfg.2019.08.033.
- [18] J. O. Milewski, *Additive Manufacturing of Metals - From Fundamental Technology to Rocket Nozzles, Medical Implants, and Custom Jewelry*, Springer. Springer Series in Materials Science, 2017. doi: 0.1007/978-3-319-58205-4.
- [19] Margiov Margiov, “Effetti dei parametri più importanti sulle proprietà di Inconel 719 prodotto dal Letto di polvere laser LPBF Kaser Powder Bed Fusion,” *Stampare in 3D*, Dec. 09, 2019.
- [20] F. Calignano, “Slide del corso: Tecniche di fabbricazione additiva.” Torino, 2020.
- [21] J. P. Oliveira, A. D. LaLonde, and J. Ma, “Processing parameters in laser powder bed fusion metal additive manufacturing,” *Mater Des*, vol. 193, Aug. 2020, doi: 10.1016/j.matdes.2020.108762.
- [22] P. Fino, “Dispense del corso: Materiali per la fabbricazione additiva.” 2021.
- [23] A. K. Singla *et al.*, “Selective laser melting of Ti6Al4V alloy: Process parameters, defects and post-treatments,” *Journal of Manufacturing Processes*, vol. 64. Elsevier Ltd, pp. 161–187, Apr. 01, 2021. doi: 10.1016/j.jmapro.2021.01.009.
- [24] T. T. Ferioli and G. Rivoli -To, “TITANIO E SUE LEGHE. TRATTAMENTI TERMICI Ti 6Al 4V Lezione per il 12° Corso di Aggiornamento sui Trattamenti Termici dei Metalli. AIM Milano. Ottobre 2007 ELIO GIANOTTI.”
- [25] C. Leyens and M. Peters, *Titanium and Titanium Alloys: Fundamentals and Applications*. Wiley, 2003. Accessed: Oct. 05, 2022. [Online]. Available: <https://books.google.it/books?id=68mQLz7yJ8UC>
- [26] “Material data sheet EOS Titanium Ti64,” 2018. [Online]. Available: www.eos.info
- [27] C. Mavroidis, K. J. DeLaurentis, J. Won, and M. Alam, “Fabrication of non-assembly mechanisms and robotic systems using rapid prototyping,” *Journal of Mechanical Design, Transactions of the ASME*, vol. 123, no. 4, pp. 516–524, 2001, doi: 10.1115/1.1415034.
- [28] K. Lussenburg, A. Sakes, and P. Breedveld, “Design of non-assembly mechanisms: A state-of-the-art review,” *Additive Manufacturing*, vol. 39. Elsevier B.V., Mar. 01, 2021. doi: 10.1016/j.addma.2021.101846.

- [29] Y. Chen and J. Lu, "Minimise joint clearance in rapid fabrication of non-assembly mechanisms," *Int J Comput Integr Manuf*, vol. 24, no. 8, pp. 726–734, 2011, doi: 10.1080/0951192X.2011.592995.
- [30] F. Calignano, D. Manfredi, E. P. Ambrosio, S. Biamino, M. Pavese, and P. Fino, "Direct fabrication of joints based on direct metal laser sintering in aluminum and titanium alloys," in *Procedia CIRP*, 2014, vol. 21, pp. 129–132. doi: 10.1016/j.procir.2014.03.155.
- [31] J. S. Cuellar, G. Smit, D. Plettenburg, and A. Zadpoor, "Additive manufacturing of non-assembly mechanisms," *Additive Manufacturing*, vol. 21. Elsevier B.V., pp. 150–158, May 01, 2018. doi: 10.1016/j.addma.2018.02.004.
- [32] H. Y. Jeong *et al.*, "3D printing of twisting and rotational bistable structures with tuning elements," *Sci Rep*, vol. 9, no. 1, Dec. 2019, doi: 10.1038/s41598-018-36936-6.
- [33] E. Ercolini, F. Calignano, M. Galati, M. Viccica, and L. Iuliano, "Redesigning a flexural joint for metal-based additive manufacturing," in *Procedia CIRP*, 2021, vol. 100, pp. 469–475. doi: 10.1016/j.procir.2021.05.106.
- [34] B. Paiva, F. J. Lino, R. J. Neto, and S. Leite, "design and manufacturing titanium jewellery through additive and conversion technologies." [Online]. Available: www.reflectionandfraction.co.uk/history.html
- [35] Michela Ferraro-Cuda, "Innovation and differentiation: Precious metal Additive Manufacturing in the jewellery sector," *METAL AM*, pp. 107–117, 2020.
- [36] C. Pogliani, A. Albertin, and B. Gioielli, "Case Study of Problems and Their Solutions for Making Quality Jewelry Using Selective Laser Melting (SLM) Technology," 2016.
- [37] Prima additive, "<https://www.primaadditive.com/it>."
- [38] "Laser free icon 3d printing icons created by Freepik - Flaticon."
- [39] "Cad free icon 'https://www.flaticon.com/free-icons/cad' title='\"cad icons\"'>Cad icons created by Freepik - Flaticon."
- [40] "ECNC-Hand-Grip-Insertion-Forces-Calculator".
- [41] "https://www.genesigroup.com/ecut/ecut_baoma/#_cose."
- [42] "<https://norblast.it/macchine-sabbiatrici/manual-line/sabbiatrice-sd9/#1588782333105-6e0c09b1-c224>."

- [43] A. K. Singla *et al.*, "Selective laser melting of Ti6Al4V alloy: Process parameters, defects and post-treatments," *Journal of Manufacturing Processes*, vol. 64. Elsevier Ltd, pp. 161-187, Apr. 01, 2021. doi: 10.1016/j.jmapro.2021.01.009.
- [44] J. P. Oliveira, A. D. LaLonde, and J. Ma, "Processing parameters in laser powder bed fusion metal additive manufacturing," *Mater Des*, vol. 193, Aug. 2020, doi: 10.1016/j.matdes.2020.108762.
- [45] M. Elsayed, M. Ghazy, Y. Youssef, and K. Essa, "Optimization of SLM process parameters for Ti6Al4V medical implants," *Rapid Prototyp J*, vol. 25, no. 3, pp. 433-447, Apr. 2019, doi: 10.1108/RPJ-05-2018-0112.
- [46] H. Gong, K. Rafi, H. Gu, G. D. Janaki Ram, T. Starr, and B. Stucker, "Influence of defects on mechanical properties of Ti-6Al-4V components produced by selective laser melting and electron beam melting," *Mater Des*, vol. 86, pp. 545-554, Dec. 2015, doi: 10.1016/j.matdes.2015.07.147.
- [47] A. Fatemi *et al.*, "Fatigue behaviour of additive manufactured materials: An overview of some recent experimental studies on Ti-6Al-4V considering various processing and loading direction effects," *Fatigue and Fracture of Engineering Materials and Structures*, vol. 42, no. 5. Blackwell Publishing Ltd, pp. 991-1009, May 01, 2019. doi: 10.1111/ffe.13000.
- [48] "Design optimization of supports for overhanging structures in aluminum and titanium alloys by selective laser melting".
- [49] "2018 Additive manufacturing of Ti6Al4V alloy- A review".
- [50] BMC Gioielli, "Progetto Sant'Eligio."

RINGRAZIAMENTI

Ritengo doveroso, a questo punto, dedicare uno spazio del mio elaborato alle persone che hanno contribuito, con il loro instancabile supporto, alla realizzazione dello stesso.

Un ringraziamento particolare va al mio relatore, il Professore Luca Iuliano che mi ha seguito in ogni step della realizzazione dell'elaborato, fin dalla scelta dell'argomento e al mio correlatore, Giacomo Mussino, per i suoi preziosi consigli e per le giuste osservazioni che mi hanno permesso di arrivare a raggiungere il risultato prefissato. Vorrei ringraziare, poi, tutto il team del CIM 4.0 per avermi supportata nello svolgimento del lavoro, per avermi insegnato tanto e per avermi accolta tra loro.

Infine, vorrei ringraziare tutte le persone senza le quali raggiungere questo traguardo sarebbe stato impossibile: la mia famiglia, i miei amici e Marco. Grazie di avermi dato sempre il vostro supporto e il vostro affetto in questi anni.