POLITECNICO DI TORINO

Corso di Laurea Magistrale in
Ingegneria Meccanica - Fabbricazione Additiva

Tesi di Laurea Magistrale

Progettazione per fabbricazione additiva di sistemi a microonde in doppia banda e doppia polarizzazione per applicazioni satellitari

Relatore:
Prof. Luca Iuliano
Correlatore Politecnico:
Ing. Flaviana Calignano
Correlatori CNR-IEIIT
Ing. Oscar A. Peverini
Ing. Giuseppe Addamo

Candidato:
Marco Favario

Dicembre 2019

Sommario

Il recente sviluppo della fabbricazione additiva metallica ha portato a un significativo miglioramento della qualità dei componenti prodotti, in termini di accuratezza, ripetibilità e qualità superficiale. Questo ha contribuito a estendere l'applicazione dell'additive manufacturing a nuovi ambiti, come quello dei sistemi a microonde per applicazioni satellitari. L'utilizzo della fabbricazione additiva offre alcuni vantaggi fondamentali in questo settore come la possibilità di ridurre il numero di componenti da assemblare, i tempi di produzione e il peso del componente finale. Scopo di questo elaborato è la progettazione di un sistema a microonde in doppia banda e doppia polarizzazione da produrre mediante fabbricazione additiva metallica frutto della collaborazione tra il Centro Interdipartimentale IAM del Politecnico di Torino e il CNR-IEIIT. Partendo dall'analisi dei sistemi ad oggi sviluppati per le applicazioni aerospaziali e le tecnologie di fabbricazione additiva, si è successivamente effettuata l'analisi e ricostruzione per la tecnologia di fusione laser a letto di polvere (Selective Laser Melting, SLM) di un componente in lega di alluminio che integra varie parti di sistema di alimentazione di antenna in un unico pezzo.

Abstract

The recent development of metal additive manufacturing (AM) improved the quality of the products, enhancing the accuracy, repeatability and surface quality. This allowed the diffusion of AM to new fields, such as the microwave devices for satellite applications. The additive manufacturing has some essential advantages for these products, such as the possibility of reducing the number of components of the assembly, the building time and the weight of the part. This thesis aims to design a double band and double polarization microwave system, produced with metal additive manufacturing and developed by the collaboration of Centro Interdipartimentale IAM of Polytechnic of Turin and CNR-IEIIT. Starting from the analysis of the common additive techniques for aerospace applications, the analysis and design for laser powder bed fusion process (Selective Laser Melting, SLM) of an aluminium component, which integrates the different parts of an antenna feed-chain in a single piece, have been made.

Indice

Elenco delle tabelle V

Elenco delle figure VI

1 Additive manufacturing applicato a componenti guidati a microonde 1
1.1 Componenti guidati a microonde 1
1.1.1 Nozioni base 2
1.1.2 Problemi 5
1.2 Tecniche di fabbricazione additiva 7
1.2.1 Stereolitografia 8
1.2.2 Selective Laser Melting 9
1.2.3 Tecnica migliore per l'applicazione ai componenti guidati a microonde 13
1.3 Applicazione della FA a componenti guidati a microonde 14
1.3.1 Filtro curvo e torto 15
1.3.2 Filtro progettato per la fabbricazione additiva 16

2 Design for additive manufacturing 19
2.1 Principi 19
2.1.1 Direzione di costruzione 20
2.1.2 Superfici angolate 20
2.1.3 Fori 21
2.1.4 Superfici orizzontali 22
2.1.5 Orientamento 23
2.1.6 Strutture Snelle 24
2.2 Supporti 26

3 Caso studio: sistema a microonde in doppia banda e doppia polarizzazione 29
3.1 Analisi della geometria 29
3.1.1 Parte inferiore 32

3.1.2 Parte centrale 33
3.1.3 Parte superiore 36
3.2 Ricostruzione della geometria 37
3.2.1 Parte inferiore 38
3.2.2 Parte centrale 39
3.2.3 Parte superiore 42
3.2.4 Risultato preliminare 43
3.2.5 Irrigidimento 43
3.2.6 Verifica assemblaggio e performance elettromagnetica 48
3.3 Generazione STL e preparazione del job 49
3.4 Prototipo 50
3.5 Modifica del componente 50
3.6 Descrizione processo produttivo 52

4 Conclusioni 53

Elenco delle tabelle

1.1 Bande di frequenze utilizzate [17] 4
1.2 Proprietà di alluminio e titanio [9, 12] 12
1.3 Composizione dell'AlSi10Mg 13
1.4 Proprietà dell'AlSi10Mg: Rm carico di rottura, Rp 0,2% carico di snervamento, E modulo di Young e d densità [5]. 14

Elenco delle figure

1.1 Schema di un sistema di telecomunicazione [10] 2
1.2 Esempio di guide d'onda rettangolari con flange [16] 3
1.3 Schema di un sistema generico e relativo componente [10] 5
1.4 Schema della sezione dei componenti guidati a microonde 6
1.5 Schema stereolitografia [6] 8
1.6 Schema Selective Laser Melting [6] 10
1.7 Dispositivo tradizionale in confronto al nuovo design 16
1.8 Filtro di riferimento, a sinistra dettaglio dei supporti, a destra sezione [10] 17
1.9 Filtro del sesto ordine con rientranze angolate, a sinistra dettaglio con i supporti, a destra la sezione [10]. 17

2.1 Direzione di costruzione [1] 20
2.2 Superfici angolate [1], in ordine da in altro a sinistra: Superfice inclinata generica, esempio di struttura di supporto, angolo caratteristico della superficie aggettante. 21
2.3 Fori [1], in ordine da in alto a sinistra: Foro generico, evidenza dell'influenza delle dimensioni del foro, foro supportato, struttura autosupportante. 22
2.4 Superfici orizzontali [1], in ordine da in alto a sinistra: Superficie orizzontale generica, supporti interni, supporti angolati esterni, riorientamento della parte, progettazione per la riduzione di supporti, progettazione per la rimozione dei supporti. 23
2.5 Orientamento verticale [1] 23
2.6 Orientamento nel piano [1], in ordine da in alto a sinistra: Definizione delle parti, esempio di geometria ottimale curva, orientamento non accettabile, soluzione per il riorientamento con rotazione di pochi gradi, orientamento corretto con impatto sul lato corto, geometria ottimale sottile e raccordata. 24

2.7 Strutture snelle [1], da in alto a sinistra: Proporzioni critiche per strutture snelle, possibile deformazione a causa della lama, possibile sistema di irrigidimento, evidenza dell'instabilità della struttura durante la costruzione, supporto rimovibile, progettazione per la rimozione di supporti. 25
2.8 Orientamento da evitare per strutture snelle angolate [1] 25
2.9 Cella del supporto a blocchi: (a) Vista superiore, (b) vista laterale . 26

3.1 Schema del componente proposto nello studio [11] 30
3.2 Viste laterali e superiore della geometria interna del componente . . 30
3.3 Vista del seputm evidenziando in rosso la superficie al di sotto dei 45° 32
3.4 Parte cilindrica con diametri variabili, nella seconda immagine è evidenziato il dettaglio in sezione della lamina scanalata interna. . . 33
3.5 Vista del coupler inferiore, nella prima immagine si evidenzia in rosso la superficie al di sotto dei 45°, nella seconda la variazione geometrica. 34
3.6 Viste laterali della parte centrale, si notino il tappo e la giunzione delle guide oblique superiori. 34
3.7 Vista in sezione del tappo conico 35
3.8 Dettaglio dei filtri 36
3.9 Parte cilindrica superiore, nella seconda immagine si evidenzia in sezione la lamina interna. 36
3.10 Parte superiore, septum e parte finale della cavità cilindrica 37
3.11 Dettaglio della parte inferiore 38
3.12 Parte cilindrica 39
3.13 Due differenti geometrie ipotizzate per gestire i vicini canali centrali 40
3.14 Dettaglio del septum inferiore e dei filtri 41
3.15 Dettaglio del canale cilindrico superiore 41
3.16 Dettaglio delle guide con le flange terminali e del tappo con il relativo rinforzo 42
3.17 Dettaglio del septum superiore e della flangia circolare 43
3.18 Viste laterali e superiore del componente provvisorio 44
3.19 Dettaglio delle flange inferiori 45
3.20 Dettaglio dei rinforzi delle flange inferiori 45
3.21 Dettaglio dei rinforzi delle flange superiori 46
3.22 Dettaglio in sezione delle guide rettangolari superiori 46
3.23 Dettaglio dei rinforzi dei quattro canali laterali 47
3.24 Dettaglio del supporto gusset 47
3.25 Dettaglio e vista in sezione della struttura di supporto della flangia circolare. 48
3.26 Dettaglio del montaggio dei dadi 48
3.27 Componente finale 49
3.28 Prototipo prodotto tramite SLS 51

3.29 Flangia superiore modificata 51
3.30 Componente finale abbassato 52

Capitolo 1

Additive manufacturing applicato a componenti guidati a microonde

1.1 Componenti guidati a microonde

Di grande interesse è lo sviluppo tecnologico dei dispositivi utilizzati nei sistemi di telecomunicazione, vista la sempre più elevata diffusione e richiesta di tali servizi. In particolare ci concentriamo sulle comunicazioni satellitari (figura 1.1), che sfruttano onde elettromagnetiche a elevata frequenza e potenza per trasmettere informazioni a distanza. Tali sistemi sono composti da infrastrutture a terra che servono a generare e ricevere il segnale e da vari satelliti che consentono di coprire le aree di interesse, facendo da tramite tra trasmettitore e ricevente. Sono utilizzati quando una soluzione interamente terrestre non avrebbe convenienza economica, risultando molto interessanti in particolare nelle comunicazione broadcast. L'ultima generazione di satelliti è chiamata high throughput (HTS), è basata su architetture multispot ad elevata frequenza, tra Ku e Ka, che necessitano centinaia di spot, che corrisponde a una specifica area geografica, per coprire la domanda nell'area richiesta. A ogni spot corrisponde un sistema di alimentazione di antenna che serve a gestire il segnale dall'antenna all'emettitore e viceversa, ne deriva la necessità di posizionare nel satellite molti componenti. Si vogliono quindi massa e volume minimi in modo da ottimizzare l'uso del payload e aumentare la quantità di dati trasferibile. Nella presente tesi si considerano i vari dispositivi del sistema di alimentazione di antenna, chiamati componenti guidati a microonde, che possono essere visti come dei tubi dalla superficie interna conduttiva con specifiche e precise geometrie volte a guidare l'onda elettromagnetica.

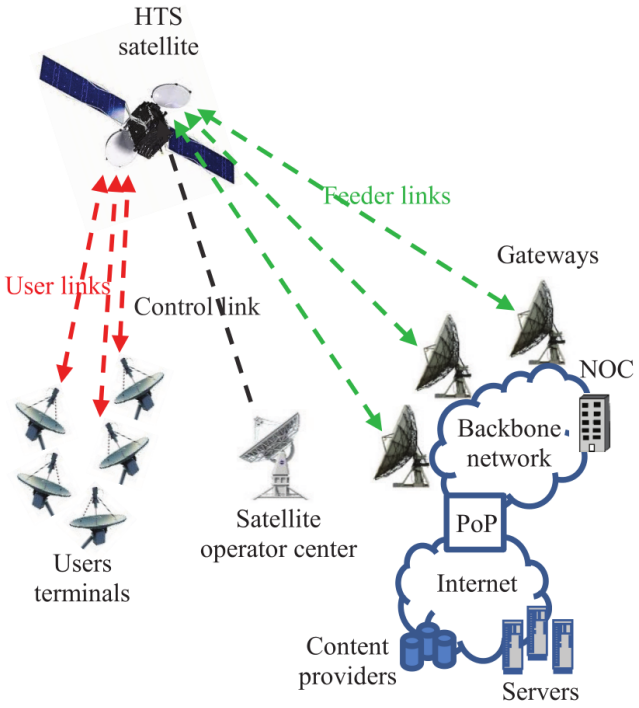

Figura 1.1: Schema di un sistema di telecomunicazione [10]

La produzione dei componenti è effettuata solitamente in parti separate tramite macchine utensili o elettroerosione, vista l'elevata precisione richiesta, seguita da assemblaggio tramite spine e bulloni, con conseguenti problemi di peso, ingombri e interferenze elettromagnetiche. Per superare i limiti tradizionali nasce l'interesse per il mondo della fabbricazione additiva (FA o in inglese, Additive Manufacturing, AM), infatti è possibile produrre componenti complessi integrando più funzioni in una sola parte con vantaggi di peso, dimensioni e riduzione dei problemi dell'assemblaggio. Il punto critico rimane la debolezza principale della fabbricazione additiva: La bassa accuratezza. Le precisioni richieste per lavorare nelle decine di GHz si possono quantificare come 0,1-0,05 mm, che sono coincidenti con il limite delle tecnologia additive.

1.1.1 Nozioni base

In questa sezione si cerca di sintetizzare gli aspetti principali dei componenti guidati a microonde [14, 15].

I sistemi di alimentazione di antenna sono composti da dispositivi elettromagnetici vuoti che sfruttano la riflessione all'interno di un mezzo conduttivo cavo per direzionare o filtrare o elaborare l'onda elettromagnetica che vi passa attraverso. Il funzionamento è in realtà molto più complesso di una semplice riflessione ripetuta

nella lunghezza del tubo, si vanno infatti a instaurare dei regimi modali legati al fatto che la larghezza della cavità è di dimensione analoga alla lunghezza d'onda.

I componenti più semplici sono dei tubi rettilinei a sezione circolare o rettangolare (figura 1.2) che rispettano specifiche dimensioni geometriche e che hanno lo scopo di direzionare la radiazione trasmessa all'interno, sono chiamati per questo guide d'onda. Variazioni geometriche interne possono essere sfruttate per diverse funzioni come nel caso di filtri, che sono solitamente passa-banda eliminando le frequenze indesiderate al di fuori della banda di funzionamento, o antenne, che direzionano l'onda elettromagnetica in campo aperto. Si possono anche avere curvature o torsioni della sezione per soddisfare le varie esigenze.

Figura 1.2: Esempio di guide d'onda rettangolari con flange [16]

Osservando l'assieme del sistema di alimentazione di antenna tradizionale o, in inglese, antenna feed-chain si nota che con le tecniche attuali ognuno dei componenti è distinto dagli altri e prodotto separatamente, ne deriva quindi un significativo ingombro che si desidera ridurre (figura 1.3).

Se il materiale è sufficientemente conduttivo e se la qualità delle superfici interne è buona, si ha la possibilità di trasmettere onde elettromagnetiche a alta frequenza (decine di GHz) e alta potenza (decine di kW) con efficienza molto elevata, e quindi limitata attenuazione. Si lavora a differenti frequenze, in particolare si riconoscono diverse bande, mostrate in tabella 1.1. Le bande sono state distinte arbitrariamente in modo da evitare problemi di interferenza e ognuna ha un determinato campo di

applicabilità e funzione. Si noti che il diametro dei componenti guidati a microonde è dell'ordine di grandezza della metà della lunghezza d'onda. Ciò rende utilizzabile la tecnologia soltanto fino a un certo limite di frequenza oltre al quale si hanno fenomeni elettromagnetici che rovinano il funzionamento e risulta quindi necessario l'utilizzo di mezzi alternativi, come ad esempio la fibra ottica. La tendenza è di spingere verso frequenze più elevate poiché consentono maggiore capacità, ma soffrono maggiormente di attenuazione e necessitano migliore precisione costruttiva. Ci si aspetta che le future generazioni di sistemi lavorino a 30-50 GHz, mentre attualmente si lavora fino a circa 30 GHz. Di interesse è la possibilità di costruire sistemi multibanda in grado di gestire più canali, consentendo quindi di diminuire massa, volume e costo del sistema.

Tabella 1.1: Bande di frequenze utilizzate [17]

Banda	Frequenza [GHz]	Applicazione
L	1-2	Sistemi di navigazione e mobile
S	2-4	
C	4-8	Applicazioni "remote sensing"
X	8-12	
Ku	12-18	
K	19-21	
Ka	27-32	Comunicazioni satellitari, rilevamento velocità veicoli
Q	30-50	Comunicazioni terrestri, radio astronomia
V	50-75	

Per il corretto funzionamento, il componente guidato a microonde deve rispettare alcuni vincoli, che limitano le tecniche produttive utilizzabili. In sintesi si identificano:

- Accuratezza: Per poter manipolare onde nell'ordine delle decine di GHz è necessario avere errori geometrici molto limitati, ovvero la geometria reale deve essere molto prossima alla geometria teorica. Normalmente si considera accettabile un errore inferiore a 0,1 mm, si preferirebbe essere attorno a 0,05 mm.
- Qualità superficiale: Oltre ad avere geometria corretta è necessario avere una superficie interna del componente meno rugosa possibile, consentendo perdite e difetti di comunicazione inferiori.
- Resistività superficiale: Per fare sì che il dispositivo funzioni è necessario che ci sia sufficiente conducibilità sulla superficie interna, ovvero ridotta resistività superficiale, che garantisce una buona riflessione. Lo spessore dello strato conduttivo può essere limitato a decimi di millimetro poiché si ha l'effetto

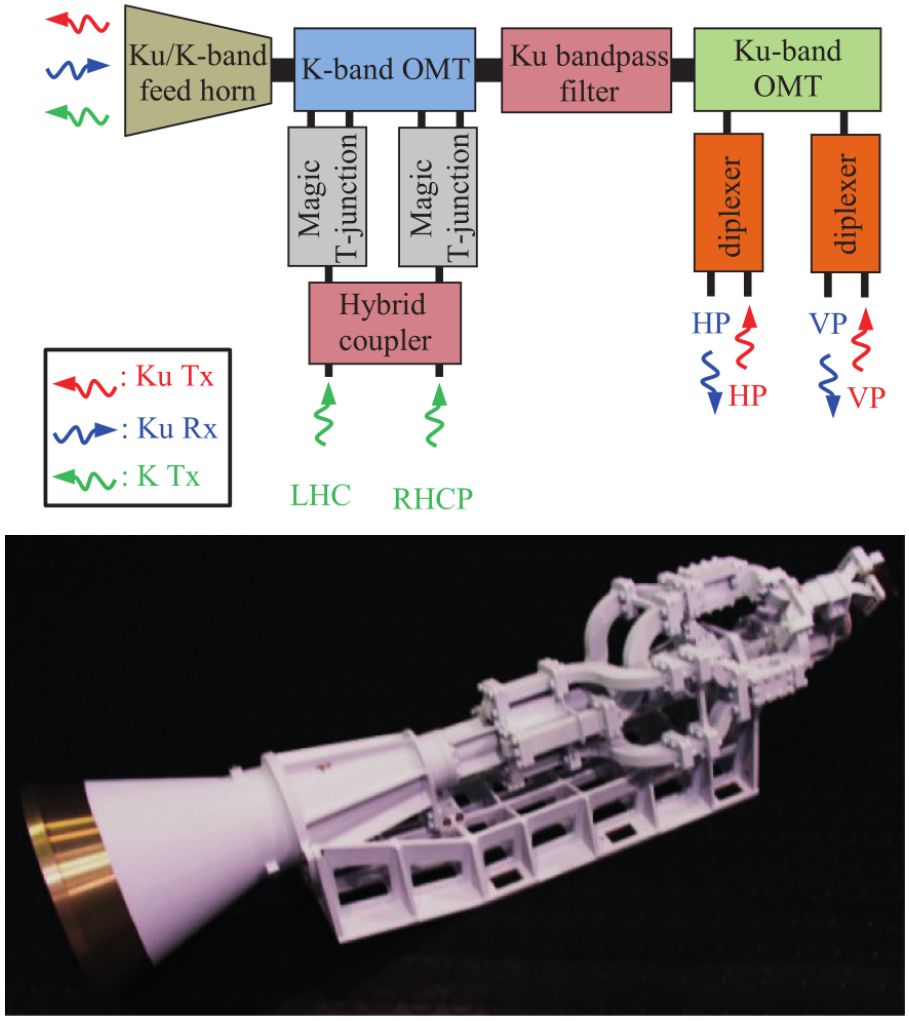

Figura 1.3: Schema di un sistema generico e relativo componente [10]

pelle, che limita le correnti alla superficie del conduttore nel caso di correnti alternate.

1.1.2 Problemi

Si ritiene opportuno evidenziare le criticità dei componenti guidati a microonde prodotti tradizionalmente per poter capire l'interesse e vantaggi della fabbricazione additiva. In particolare si nota che ci sono problemi più logistici, legati a ingombri e costi, mentre altri sono fenomeni elettromagnetici intrinsecamente legati alla struttura dei componenti e all'uso di onde elettromagnetiche ad elevata potenza:

- Assemblaggio: Si ha la produzione dei singoli componenti separatamente e il montaggio tramite bulloni e spine, questo causa sia un allungamento dei tempi,

sia la possibilità di errori che possono compromettere il corretto funzionamento.

- Volume e peso: Legato al fatto che i singoli componenti sono distinti e che ci sono flange e bulloni che consentono il montaggio. Si vorrebbe ottimizzare questo aspetto in modo da migliorare l'uso del payload, ovvero la massa e il volume trasportabili dal sistema di lancio del satellite.

- Tempi e costi: Le tecniche tradizionali di lavorazione alle macchine utensili e elettroerosione sono molto precise ma hanno tempi e costi molto elevati. È accettabile nel settore aerospaziale in cui si ha ampia disponibilità economica e i lotti sono ridotti, ma è un aspetto che si aspira a migliorare.

- Multipactor discharge: Fenomeno legato all'elevata potenza e alla bassa pressione, è un processo di danneggiamento che porta a un declino delle performance del componente. Il processo può essere sintetizzato come il deterioramento superficiale legato all'impatto ad alte velocità di elettroni accelerati dal campo elettromagnetico alternato (figura 1.4). Questo fenomeno avviene a cascata in quanto nell'impatto si possono liberare altri elettroni per emissione secondaria, se si supera una certa energia, che possono a loro volta essere accelerati e impattare su altre superfici e generare altri elettroni. Se si soddisfano le

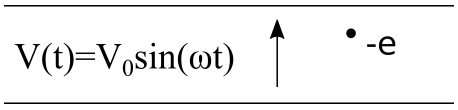

Figura 1.4: Schema della sezione dei componenti guidati a microonde

condizioni dinamiche si ha una sorta di risonanza che può portare alla rottura del pezzo. Si può evitare tramite rivestimenti superficiali che aumentano la soglia di emissione, allargamento della banda di design o con una progettazione apposita della geometria.

- Passive intermodulation products: A causa di caratteristiche non lineari nei componenti si possono generare dei passive intermodulation products (PIMP), che consiste in onde elettromagnetiche indesiderate con frequenza diversa da quella di partenza. Generalmente si ha un rapido decadimento di tali onde, ma nel caso di sistemi di comunicazione le elevate potenze possono portare a problemi di interferenza. Nel caso di sistemi di alimentazione di antenna tradizionali, la causa è principalmente legata alla presenza di ossidi metallici nella giunzione tra le varie parti, che sono unite tramite flange avvitate. I PIMP non sono risolvibili tramite filtri e devono essere considerati a priori nella fase di design, cercando di dividere le parti in posizioni meno influenti.

1.2 Tecniche di fabbricazione additiva

Per fabbricazione additiva si intendono le tecniche produttive che consentono di generare un prodotto finito o quasi tramite l'aggiunta di materiale, che tipicamente avviene strato per strato.

In generale il flusso di processo della fabbricazione additiva è differente rispetto a quello di tecniche tradizionali e prevede in generale:

- Progettazione e modellazione CAD del componente;
- Generazione e correzione del file STL;
- Definizione di orientamento, supporti e posizionamento in macchina;
- Costruzione;
- Trattamenti termici;
- Rimozione dalla piattaforma del pezzo;
- Post processing.

Per l'elevata precisione richiesta molte delle tecniche di fabbricazione additiva non sono applicabili, in particolare per scarsa precisione e qualità superficiale insoddisfacente, oltre che per il fatto che molte usano materiali polimerici, non conduttivi, sebbene possa essere effettuato un trattamento superficiale. Le tecniche attualmente utilizzate osservando i vari studi sull'argomento risultano sostanzialmente due, che sono anche le tecniche più precise nel mondo dei polimeri e dei metalli: Stereolitografia e Selective Laser Melting (SLM).

Si noti che anche la Selective Laser Sintering (SLS), per termoplastici risulterebbe piuttosto precisa, inoltre non necessita supporti e semplificherebbe quindi la gestione della produzione, ma non è a livello della stereolitografia come qualità superficiale e in questo ambito non è di interesse la riciclabilità, punto critico in altre applicazioni. Altre tecniche come Fused Deposition Modelling (FDM) o simili sono adottate ma non si ritengono interessanti come le altre.

Al momento le tecniche di fabbricazione additiva non sono sufficientemente precise da soddisfare abbondantemente i requisiti richiesti dai componenti guidati a microonde, bisogna pertanto scegliere le tecniche e i materiali che consentono la maggiore precisione. Risulta inoltre necessaria un'attenta calibrazione dei parametri di processo e una progettazione robusta dei componenti che consenta di compensare a tali lacune.

Si descrivono quindi le due tecniche sopra citate cercando di evidenziare limiti e caratteristiche principali e le ragioni per cui preferire una piuttosto che l'altra.

1.2.1 Stereolitografia

La stereolitografia SLA è una tecnica che usa un fascio laser per attivare selettivamente la reazione di polimerizzazione di un fotopolimero, si ottiene quindi un polimero termoindurente.

Il fotopolimero è composto da diversi materiali, i principali sono il monomero, solitamente basato su resina epossidica, e il fotoiniziatore, a cui si aggiungono additivi o solventi. Quando il laser colpisce il fotoiniziatore allora si generano specie reattive che, legandosi al monomero, consentono di iniziare le reazioni di polimerizzazione e di reazione della catena.

Tipicamente si ha una vasca piena del fotopolimero in cui si trova la piattaforma su cui andrà costruito il pezzo, il processo prevede la ripetizione di affondamento della tavola e polimerizzazione selettiva del singolo strato fino al completamento del pezzo.

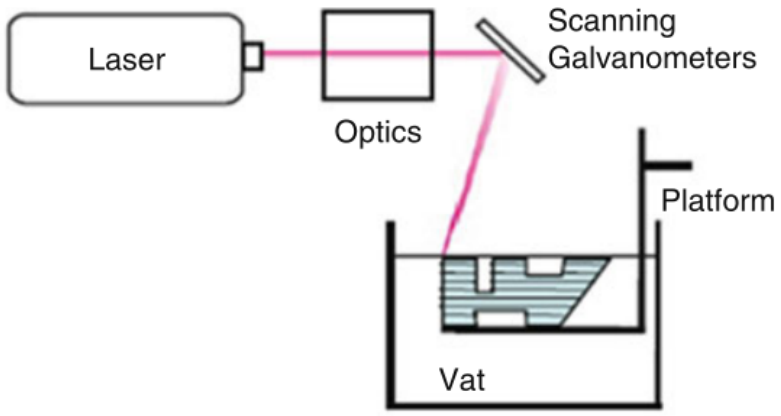

Figura 1.5: Schema stereolitografia [6]

Importante è notare che per questa tecnica sono necessari supporti, in quanto superfici troppo aggettanti o complesse rischiano di deformarsi. Bisogna quindi tenere conto del design del pezzo e dell'orientamento per evitare di avere supporti su superfici sensibili o non raggiungibili. Per velocizzare il processo si può prevedere la polimerizzazione superficiale e di una struttura reticolare in grado di sostenere il pezzo verde, ovvero il pezzo non completamente polimerizzato, e di trattenere monomero che viene poi completamente polimerizzato in un forno con lampade UV in un secondo momento.

Si ha ampia varietà dei volumi di costruzione disponibili, partendo dai piccoli utili per il settore della gioielleria per arrivare attorno al mezzo metro cubo.

Lavorando materiale allo stato liquido si riescono ad avere strati molto sottili, circa 0,025-0,05 mm, e a ridurre quindi l'effetto scala. Un'attenta calibrazione del fascio

laser, che presenta potenza contenuta, consente di ottenere un'ottima precisione, con un'accuratezza di circa 0,025-0,05 mm [4], e qualità superficiale con Ra sotto a 10 µm che soddisfano i requisiti necessari per la produzione di componenti guidati a microonde. Si noti che la SLA raggiunge i migliori risultati ottenibili con la FA.

Avendo come materiale un polimero non si soddisfa il requisito di conducibilità e bisogna quindi applicare un trattamento che consenta di superare questo limite. In letteratura si hanno esempi di verniciatura conduttiva o metallizzazione, che si è rivelato un processo critico per la difficoltà di generazione di una superficie uniforme, con conseguente diminuzione delle prestazioni. Per esempio nello studio di Maas et al. [8] si ha la copertura dell'intero pezzo finito in SLA con un inchiostro conduttivo che può essere usato per effettuare la placcatura in rame, che porta a rugosità molto ridotta Ra di circa 1.8 µm, ma spessore non omogeneo.

Altre criticità ipotizzate nello studio di Zhang et al. [17] riguardo il polimero sono la dubbia resistenza meccanica alle sollecitazioni di lancio del satellite e la possibilità di distacco della placcatura a causa della notevole escursione termica e i diversi coefficienti di espansione.

1.2.2 Selective Laser Melting

Si tratta di una tecnica a letto di polvere che sfrutta un laser per fondere selettivamente la sezione del componente, si noti che è anche noto con altri nomi come direct metal laser sintering DMLS di EOS o laser power bed fusion L-PBF secondo la normativa ASTM. Come nel caso di SLA si procede strato per strato fino al completamento. Il processo prevede in sintesi:

- Calibrazione tavola di supporto;
- Stesura dello strato di polvere tramite racla o rullo a seconda dei sistemi;
- Fusione tramite laser dello strato deposto e di una piccola porzione di quello sottostante in modo da fonderli assieme;
- Abbassamento della tavola e ripetizione degli step precedenti fino a completamento;
- Rimozione polvere;
- Trattamento termico di distensione;
- Rimozione supporti;
- Finitura e trattamenti termici.

In questo caso il laser ha una potenza elevata tra 200-1000W poiché deve fondere le polveri metalliche. Come nella SLA la sorgente laser è fissa e lo spot viene orientato tramite un sistema di specchi e focalizzato tramite lenti, questo sistema consente

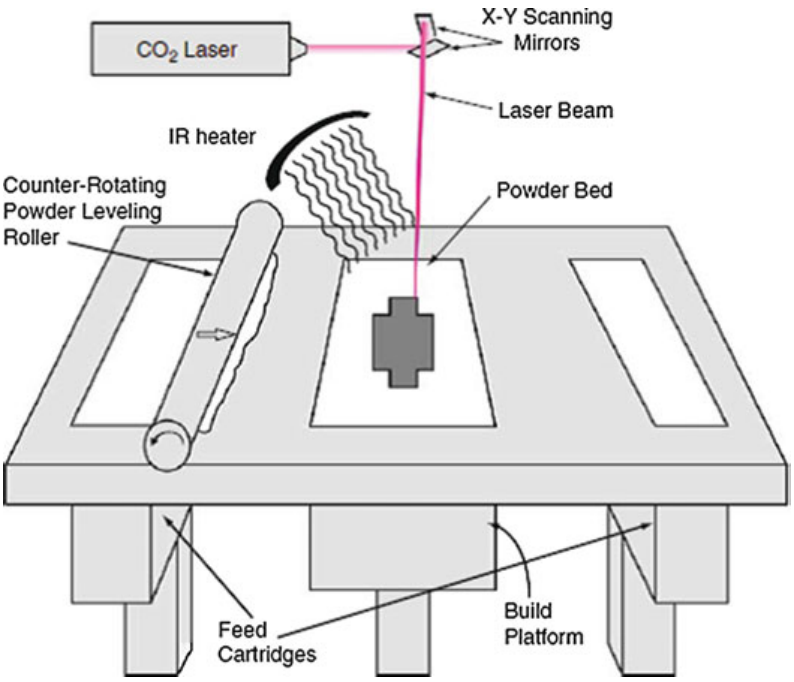

Figura 1.6: Schema Selective Laser Melting [6]

elevate velocità di passata in quanto si devono solo muovere delle lenti con inerzia molto ridotta rispetto al muovere l'intera sorgente laser. Si lavora in atmosfera inerte, comunemente usando argon, per evitare forti reazioni di ossidazione delle polveri metalliche.

Si tratta di un processo complesso dalla difficile calibrazione ottimale, ma consente di raggiungere dei buoni risultati in termini di precisione e qualità superficiale. Sono molti i parametri da tenere in considerazione, tra cui i principali sono potenza del laser, velocità di passata, angolo e distanza di hatching, spessore dello strato e tecnica di scansione.

Le polveri utilizzate sono in media di diametro 25 µm e la loro distribuzione granulometrica, forma, composizione e microstruttura condizionano la qualità del componente.

Il metallo è sottoposto a un raffreddamento con gradiente termico molto elevato, avendo materiale circostante a temperatura nettamente inferiore al fuso, che può causare tensioni molto significative che possono portare a deformazione o rottura del pezzo. Questo effetto è ridotto tramite piattaforme riscaldate che consentono di aumentare la temperatura del letto di polvere e ridurre il gradiente, tramite strategie di scansione opportunamente studiate, la corretta progettazione dei supporti e per mezzo di trattamenti termici successivi alla lavorazione del pezzo. Si noti che l'elevato gradiente ha anche un effetto positivo, consente infatti di ottenere gradi

molto fini e abbastanza omogenei che possono essere opportunamente ingranditi tramite trattamenti termici, ottenendo la possibilità di adattare il materiale alla funzione calibrandone le proprietà meccaniche in funzione della dimensione dei grani.

In generale non si riesce a raggiungere finiture che soddisfino le precisioni elevate di accoppiamenti meccanici e si progetta con un sovrametallo che sarà asportato durante le lavorazioni meccaniche di finitura. Quindi comunemente questa è una tecnica che porta alla generazione di un semilavorato, analogo alla microfusione. Un'attenta calibrazione dei parametri consente il miglioramento della precisione, si possono raggiungere dopo pallinatura, che consente di rimuovere le polveri adese e migliorare la finitura superficiale, rugostità Ra di circa 5-12 µm e accuratezza di 30-100 µm . Nel caso di antenna feed-chain si vuole raggiungere un elevato grado di finitura nei componenti as built in quanto in generale non è possibile rifinire le cavità interne di un sistema prodotto in un singolo pezzo, ci si limita alla finitura delle flange di ancoraggio. La limitata precisione meccanica determina un limite alle prestazioni e alle frequenze utilizzabili, che non possono essere troppo elevate, e se ne limita l'influenza tramite una progettazione robusta che tiene conto di possibili deformazioni.

Importante è la necessità di utilizzare supporti, che hanno diversi compiti: Sostengono il materiale fuso, evitano deformazioni in seguito a ritiro da solidificazione e raffreddamento e conducono il calore dalla pozza di fusione alla tavola. Si ha necessariamente uno step di rimozione dei supporti che normalmente segue il trattamento termico di distensione per evitare deformazioni. Si noti che i supporti sono studiati per ridurre il materiale necessario, che è uno scarto, e per essere facilmente rimossi manualmente. Bisogna tenere conto del posizionamento dei supporti e della direzione costruttiva nelle fasi di progettazione del dispositivo in quanto supporti interni non potranno essere rimossi.

A causa delle temperature elevate si può avere una parziale sinterizzazione del materiale circostante a quello fuso, che quindi non può più essere riutilizzato ma deve essere rimosso. Non è un problema se è una superficie esterna, in quanto può essere rimosso con pallinatura, mentre internamente può creare piccoli agglomerati di particelle o anche bloccare intere sezioni andando a impedire il corretto funzionamento del dispositivo.

Per la finitura si deve quindi agire a seconda della possibilità di accesso alla geometria e costi, per esempio nello studio di Zhang et al. [17] si studia un'antenna in rame che ha ampia possibilità di accesso per eseguire operazioni di finitura, si ottiene una migliore finitura con micromachining, intermedia con placcatura in oro e un po' peggiore con lucidatura manuale. In tale analisi considerando i costi e il risultato complessivo la lucidatura manuale è considerato il miglior compromesso in

quanto la qualità è sufficiente per il corretto funzionamento, ma i costi nettamente inferiori alle altre tecniche.

Questa tecnica lavorando con metalli soddisfa il requisito di conducibilità, ma solo alcuni hanno una resistività superficiale sufficientemente bassa, mentre altri risultano poco conduttivi e bisogna quindi prevedere un rivestimento con conducibilità maggiore. In particolare in letteratura sono presenti esempi con:

- Lega di alluminio AlSi10Mg: Presenta una elevata conducibilità, migliorabile con placcatura in argento. La precisione risulta sufficiente per garantire il corretto funzionamento;
- Lega di titanio Ti6Al4V: Non è molto conduttivo, risulta leggermente più preciso dell'alluminio;
- Acciaio: Non presenta proprietà elettriche soddisfacenti ed è più pesante del titanio, non c'è quindi interessa ad usarlo;
- Rame: Indubbiamente interessante per le elevate proprietà conduttive. Non si hanno molti casi di SLM applicata a questo materiale, probabilmente per problemi di interazione tra laser e polvere di rame. Nello studio di Zhang et al. [17] si hanno alcuni esempi positivi dell'adozione.

Tabella 1.2: Proprietà di alluminio e titanio [9, 12]

Materiale	Accuratezza (µm)	Resistività superficiale (µΩcm)
Ti6Al4V	50	200-250
AlSi10Mg	30-100	20-40

Si noti che la resistività superficiale nel caso di componenti prodotti con SLM è superiore rispetto a quelli lavorati dal pieno a causa della inferiore finitura superficiale, nel caso di alluminio si ha circa 20-40 µΩcm nella fabbricazione additiva, che risulta comunque sufficiente per non necessitare placcatura. Risulta necessaria una placcatura, tipicamente in argento, nel caso del titanio. La placcatura consente di avere resistività di circa 8 µΩcm sia per alluminio che titanio.

Un limite di questa tecnologia è il limitato volume di lavoro, infatti le macchine più comuni di medie dimensioni hanno il volume di circa 250×250×325 mm, prendendo come esempio la macchina M290 di EOS. Esistono modelli con volumi significativamente più ampi ma sono più rare in quanto il costo è di molto più elevato, inoltre potrebbe essere complesso gestire le deformazioni di componenti molto grandi.

Quindi l'SLM è una tecnica molto interessante per l'applicazione ai dispositivi guidati a microonde, perché consente la costruzione del componente in un materiale

definitivo e che soddisfa anche i requisiti di conducibilità, ma si hanno in sintesi le seguenti criticità [11]:

- Elevata rugosità;
- Ridotta precisione meccanica;
- Necessità di supporti;
- Rischio di bloccaggio di polvere nei canali interni;
- Volume di lavoro;
- Possibili difetti come fratture causate dal ritiro di solidificazione, polveri residue, porosità, delaminazione o balling.

1.2.3 Tecnica migliore per l'applicazione ai componenti guidati a microonde

Tra le due tecniche è preferibile l'SLM poiché consente di generare dei componenti in materiale definitivo, resistente meccanicamente e che non necessita complessi processi di finitura. Risulta in particolare interessante l'alluminio poiché è sufficientemente conduttivo, consolidato nell'ambiente dell'SLM, con buona precisione e con densità ridotta. Nonostante l'SLM abbia accuratezza inferiore e rugosità maggiore dell'SLA, si ritiene che il critico processo di metallizzazione e la scarsa resistenza meccanica dei polimeri ne limitino le potenzialità, pertanto si favorisce la produzione del componente metallico.

Si usa l'alluminio AlSi10Mg con composizione (tabella 1.3) quasi eutettica nel diagramma di stato Al-Si e quindi idonea all'uso in SLM avendo scarso ritiro e bassa temperatura di fusione, simile a 570°C. Le proprietà meccaniche sono analoghe a leghe di Alluminio da colata (tabella 1.4). La porosità è contenuta a circa lo 0,8% e la pallinatura ha un effetto molto positivo vista la limitata resistenza dell'alluminio.

Tabella 1.3: Composizione dell'AlSi10Mg

Elemento	Si	Fe	Cu	Mn	Mg	Zn	Ti	Al
(%)	9-11	<0.55	<0.05	<0.45	0.2-0.45	<0.1	<0.15	Rimanente

Tabella 1.4: Proprietà dell'AlSi10Mg: Rm carico di rottura, Rp 0,2% carico di snervamento, E modulo di Young e d densità [5].

Proprietà	Rm	Rp 0,2%	E	d
Valore	345 MPa	230 MPa	70 GPa	2670 kg/m^3

1.3 Applicazione della FA a componenti guidati a microonde

Normalmente i componenti guidati a microonde sono ottenuti con lavorazione alle macchine utensili o talvolta con electrical discharghe machining, che consentono elevata precisione e soddisfando quindi i requisiti di ridotte perdite e purezza del segnale. Per produrre sistemi di alimentazione di antenna con tali tecniche è necessaria una divisione dei componenti, da assemblare tramite spine e bulloni, poiché è impossibile lavorare le superfici interne e produrre un componente monoblocco. Si ha quindi una delicata operazione di assemblaggio e un'inevitabile aggiunta di peso e volume legata alla presenza di flange e alla difficoltà di creare componenti integrati a causa dei limiti di lavorazione delle macchine utensili. Con la fabbricazione additiva invece è possibile ed è per questo che si sta sviluppando interesse per tali tecniche.

Si hanno diverse ragioni che motivano l'applicazione della fabbricazione additiva ai componenti guidati a microonde [11]:

- Libertà nella progettazione, sono infatti possibili geometrie non altrimenti producibili con tecniche tradizionali (per esempio generando risuonatori dalla forma ellissoidale come nello studio di Booth et al. [2]), anche a causa dell'aumento delle frequenze delle bande di interesse. La libertà geometrica consente di controllare problemi tipici come quelli sopra citati di PIMP e multipactor discharge.

- Massa e volume sono molto ridotti rispetto ai componenti tradizionali, poiché grazie alla fabbricazione additiva è possibile ridurre gli spessori e creare componenti più aderenti alla geometria interna. Si possono sfruttare nervature, strutture lattice e geometrie non producibili con macchine utensili per irrigidire minimizzando il materiale utilizzato. Si può quindi ottimizzare il payload dei satelliti, infatti a parità di ingombri sarebbe possibile imbarcare molti più sistemi, con conseguente vantaggio economico.

- È possibile integrare e componenti con funzioni diverse in un solo pezzo, consentendo una notevole riduzione di peso e dimensioni, di ridurre le operazioni

di assemblaggio e di evitare il problema di PIMP alle giunzioni dei componenti, come accennato nella sezione precedente. Si noti che potenzialmente si potrebbero anche integrare funzioni elettromagnetiche con aspetti termici o stutturali, consentendo un ulteriore guadagno.

- Solitamente i tempi di produzione e costi (Zhang et al. [17]) sono inferiori rispetto a tecniche tradizionali per la produzione di piccoli lotti. Infatti i maggiori costi degli utensili influiscono maggiormente su piccole quantità sia in termini economici che temporali.
- Essendo la polvere non fusa riutilizzabile, si ha miglior uso del materiale riducendo gli scarti di produzione, che sono limitati alla polvere adesa e ai supporti.

In letteratura si hanno vari esempi di componenti prodotte con successo tramite SLM. Alcuni studi sullo sviluppo indipendente dei vari componenti del sistema di alimentazione di antenna, ovvero guide d'onda rettilinee, filtri, antenne e guide curve, hanno validato la fattibilità delle singole parti, a cui si aggiungono studi sulla possibile integrazione delle varie parti. L'obiettivo finale è riuscire a costruire una intero sistema di alimentazione di antenna in un solo blocco.

Si riportano brevemente alcuni esempi che si ritengono particolarmente interessanti perché esemplificativi dei vantaggi ottenibili tramite una corretta progettazione e SLM.

1.3.1 Filtro curvo e torto

Interessante dal punto di vista dell'integrazione è l'esempio dello studio di Peverini et al. [13] in cui si mostra come sia stato possibile miniaturizzare e integrare diversi componenti producendone uno singolo tramite SLM. In particolare sono state unite funzioni di filtering, bending e twisting in un singolo componente, ottenendo una dimostrazione dei vantaggi ottenibili con additive manufacturing.

Con un attento studio degli angoli da adottare per soddisfare i requisiti elettromagnetici è stato possibile arrivare a una geometria estremamente compatta (in basso a destra nell'immagine 1.7). Tale forma è molto complessa per tecniche tradizionali, è difficilmente producibile sia tramite lavorazione meccanica che elettroerosione, inoltre richiederebbe almeno la generazione di due parti da unire tramite viti. Risulta invece fattibile in fabbricazione additiva in un singolo pezzo, con le dovute complicazioni riguardanti l'orientamento in macchina e supporti interni non rimovibili.

Si riesce quindi a mantenere il corretto funzionamento elettromagnetico con riduzione di:

- Massa da 191 g a 50-70 g a seconda del raggio di curvatura;

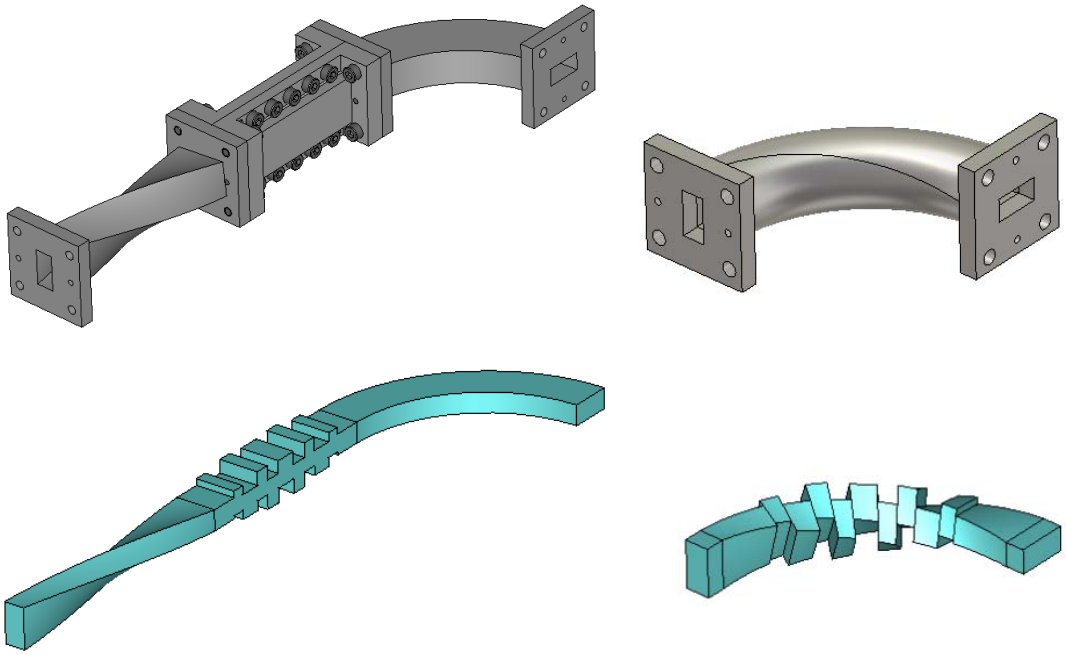

Figura 1.7: Dispositivo tradizionale in confronto al nuovo design

- Volume da 65×30×210 mm a 50×30×50 - 70×30×70 mm a seconda del raggio di curvatura.

Per ovviare alla limitata qualità della fabbricazione additiva in questo studio, e altri analoghi, si esegue un'analisi della robustezza della geometria, ovvero andando a variare la geometria in un intervallo di [-0,1 0,1] mm si valuta come cambia il funzionamento elettromagnetico. Ad analisi conclusa si è riscontrato che tutti i casi soddisfano i parametri di riferimento e pertanto la geometria è sufficientemente permissiva da essere prodotta tramite SLM. I prototipi testati risultano coerenti con le simulazioni.

1.3.2 Filtro progettato per la fabbricazione additiva

Si riporta inoltre l'analisi di filtri con risuonatori step/stub. Questi hanno tradizionalmente una geometria con rientranze perpendicolari al canale principale con dimensioni ben precise in base alle frequenze di interesse. La costruzione di questa tipologia non può avvenire lungo la direzione ottimale di crescita del componente poiché richiederebbe supporti interni non rimovibili (figura 1.8). L'inclinazione per la costruzione senza supporti determina un inevitabile errore di scala che va a ridurre la qualità e precisione superficiale diminuendo le prestazioni.

La soluzione adottata per evitare tale inconveniente è stato l'utilizzo di rientranze

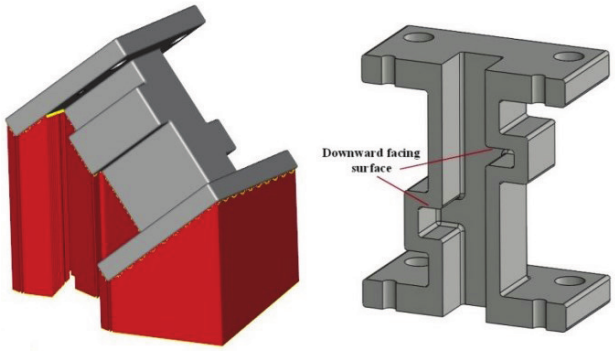

Figura 1.8: Filtro di riferimento, a sinistra dettaglio dei supporti, a destra sezione [10]

non più perpendicolari ma inclinate a sufficienza da essere autosupportanti, considerando il pezzo costruito con asse parallelo alla direzione di crescita (figura 1.9). Questo consente di produrre tutte le superfici verticali nella direzione di massima precisione e di ottenere quindi un filtro più performante.

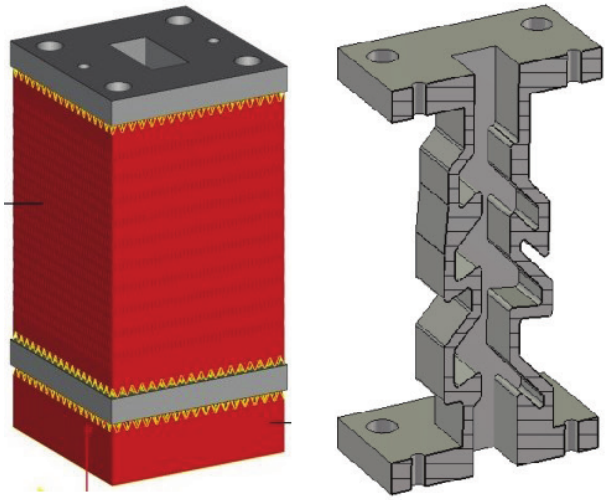

Figura 1.9: Filtro del sesto ordine con rientranze angolate, a sinistra dettaglio con i supporti, a destra la sezione [10].

Nello studio di Peverini et al. [10] si riporta che il filtro del quinto ordine prodotto tramite fabbricazione additiva pesa 27 g, mentre prodotto tradizionalmente tramite macchine utensili 70 g. Considerando che le proprietà elettromagnetiche sono in ogni caso soddisfatte, è evidente il notevole guadagno della fabbricazione additiva.

Capitolo 2

Design for additive manufacturing

2.1 Principi

Motivate le ragioni tecnologiche ed economiche che determinano l'interesse per la fabbricazione additiva è utile capire quali sono effettivamente le libertà geometriche consentite e quali invece sono i vincoli imposti dalla tecnologia.

Per progettare un componente per la fabbricazione additiva non è sufficiente soddisfare i requisiti richiesti alla parte in termini di forze, stress e deformazioni. Bisogna, come nelle altre tecniche produttive, anche tenere in considerazione la fattibilità della geometria e delle possibili criticità legate intrinsecamente al processo di costruzione per strati. Per esempio, non si può costruire fondere uno strato direttamente appoggiato su polvere non fusa in quanto rischia di non essere sostenuto e di deformarsi in seguito alla solidificazione. Da considerazioni tecnologiche e esperienza si possono definire delle linee guida che consentono di evitare i problemi principali, tali regole sono note sotto il nome di design for additive manufacturing (DFAM).

La progettazione di un componente in AM prevede solitamente l'analisi del componente, seguita da ottimizzazione topologica e generazione del disegno 3D del componente che può poi essere preparato per la costruzione. In questo modo è possibile ottenere tramite simulazioni una geometria teoricamente ottimale da cui ottenere la forma definitiva ricostruita.

Attualmente si progetta rispettando le regole del DFAM e si verifica la fattibilità producendo dei prototipi. Si analizzano gli eventuali difetti e, dopo averne identificate le cause, si correggono gli errori di design o di definizione dei parametri. Sono presenti sul mercato alcuni recenti software per la simulazione della costruzione

in macchina, si tratta di simulazioni complesse che tengono in considerazione la costruzione strato per strato e la distribuzione termica derivata dal fascio laser. I risultati di tali simulazioni possono essere le deformazioni, tensioni e distribuzione termica, da cui è possibile capire i punti critici e correggerli a priori. Al momento si è solo agli inizi e non si hanno applicativi soddisfacenti, ma si aspetta un netto miglioramento in futuro che consentirà di velocizzare il lavoro di progettazione e preparazione del job, di ridurre gli scarti e i prototipi, rendendo il processo più semplice.

Si possono individuare alcuni principi base e concetti fondamentali del DFAM che sono riportati qui di seguito e che saranno poi brevemente richiamati nella spiegazione della geometria del componente nel capitolo successivo.

2.1.1 Direzione di costruzione

La massima qualità delle superfici si ottiene in superfici parallele alla direzione di costruzione. Per componenti con superfici prismatiche, piane o cilindriche che necessitano buona qualità superficiale è quindi utile tenere in considerazione questo aspetto, allineandole alla direzione di crescita.

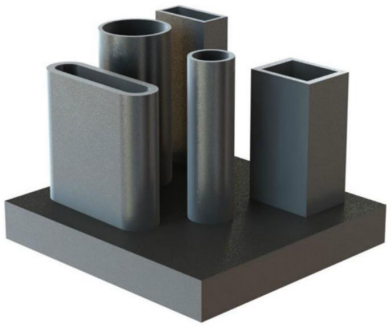

Figura 2.1: Direzione di costruzione [1]

2.1.2 Superfici angolate

Ogni materiale ha un tipico angolo limite rispetto all'orizzontale oltre il quale è in grado di sostenersi senza crollare, al di sotto del quale invece sono indispensabili supporti. Si tratta di un parametro molto importante da tenere in considerazione quando si progetta un componente in fabbricazione additiva per ridurre tempo e materiale richiesto e ottenere superfici di buona qualità superficiale.

Il limite angolare è dettato dal fatto che a causa dello slicing e della costruzione per strati si ha una parte di materiale fuso che poggia su polvere non fusa. La polvere non è in grado di reggere ampie superfici senza deformazioni e warping, è quindi

limitata la distanza massima dal profilo per ogni strato e di conseguenza l'angolo di costruzione.

Si deve considerare che ad angoli minori corrisponde una peggiore qualità superficiale a causa del minor sostegno degli strati sottostanti e dell'adesione di polvere non fusa al di sotto degli strati aggettanti.

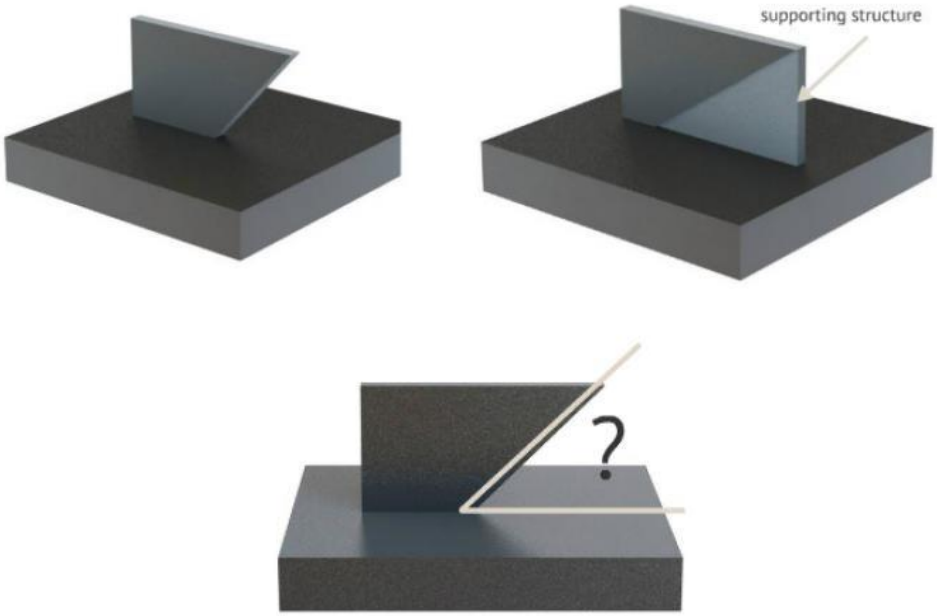

Figura 2.2: Superfici angolate [1], in ordine da in altro a sinistra: Superfice inclinata generica, esempio di struttura di supporto, angolo caratteristico della superficie aggettante.

Per l'AlSi10Mg, considerato nella presente tesi, si ha un angolo limite di 45° per ottenere una sufficiente qualità superficiale, mentre è riportato nello studio di Calignano [3] che sarebbe possibile costruire senza supporti fino a 30° ma con una maggiore rugosità superficiale. Si noti che una possibile alternativa per migliorare l'accuratezza è prevedere la deformazione e compensarla costruendo una geometria con deformazione opposta a quella prevista o simulata, in questo modo in seguito alla solidificazione si ottiene la geometria desiderata [3]. Questo metodo è in fase di sviluppo in vari software a causa della elevata complessità.

2.1.3 Fori

Direttamente dipendete dal ragionamento sulle superfici angolate è quello dei fori con asse orizzontale: oltre a una certa dimensione, solitamente 6mm di raggio,

le superfici non sono più autosupportanti e risulta necessario inserire supporti o variare la geometria per avere una buona qualità.

In generale, per evitare un processo di rimozione di supporti o perché i fori sono interni e non raggiungibili con utensili, si preferisce adottare una geometria autosupportante. La condizione di fattibilità per tali superfici è che la parte superiore della sezione abbia superfici a più di 45° rispetto all'orizzontale e che il raccordo superiore abbia diametro minore di 12 mm, si possono quindi usare geometrie a goccia, rombi, quadrati o simili a seconda della esigenza (figura 2.3).

Figura 2.3: Fori [1], in ordine da in alto a sinistra: Foro generico, evidenza dell'influenza delle dimensioni del foro, foro supportato, struttura autosupportante.

Si ricorda che una soluzione alternativa, soprattutto nel caso di fori necessariamente precisi o non variabili come geometria, è possibile orientare il pezzo in modo da avere l'asse parallelo alla verticale di costruzione.

2.1.4 Superfici orizzontali

Discorso analogo vale per superfici orizzontali, per cui se possibile si favorisce una riprogettazione o un orientamento differente piuttosto che il semplice inserimento di supporti. I supporti determinano infatti maggior materiale sprecato, operazioni di finitura addizionali e possibile distorsione della parte quando rimossi a causa delle tensioni residue rimanenti. In figura 2.4 si mostrano alcune possibili alternative.

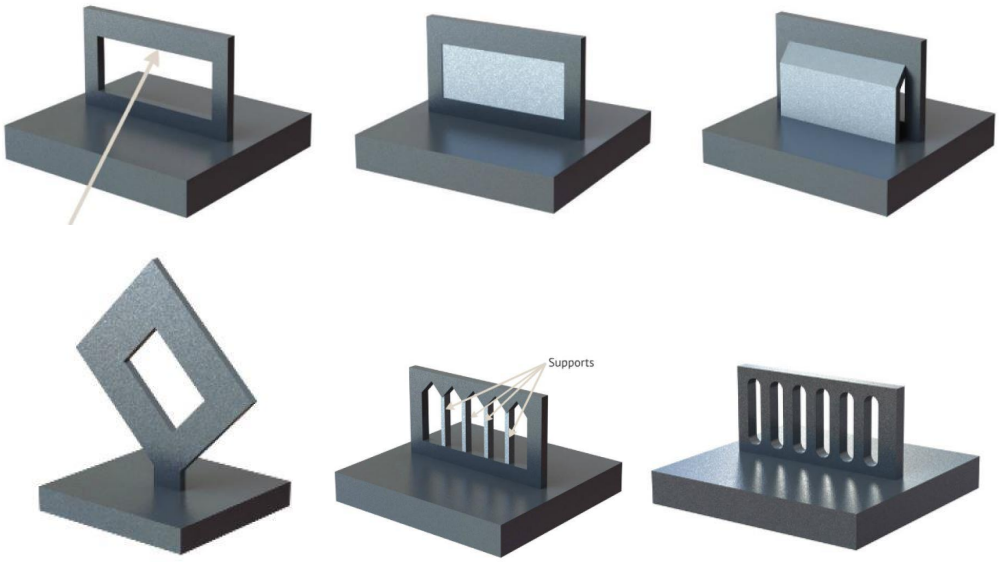

Figura 2.4: Superfici orizzontali [1], in ordine da in alto a sinistra: Superficie orizzontale generica, supporti interni, supporti angolati esterni, riorientamento della parte, progettazione per la riduzione di supporti, progettazione per la rimozione dei supporti.

2.1.5 Orientamento

Nel pensare all'orientamento del pezzo per minimizzare i supporti, bisogna anche evitare di avere sezioni troppo massicce. Sezioni piene causano un accumulo di calore concentrato in alcune zone, con conseguenti tensioni e deformazioni al raffreddamento. Il difetto tipico di questo caso è il cosiddetto warping, che consiste nella piega verso l'alto della parte orizzontale con conseguente possibile distacco o rottura dei supporti. Bisogna quindi inclinare il pezzo perché le sezioni piene siano oblique o verticali (figura 2.5) e supporti per favorire il raffreddamento e la diffusione del calore.

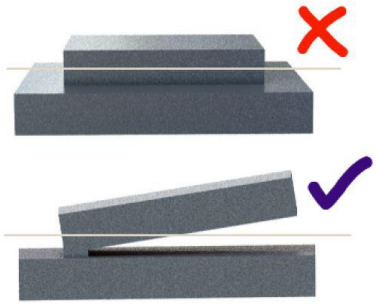

Figura 2.5: Orientamento verticale [1]

Oltre a tenere in considerazione l'effetto della fusione del materiale bisogna anche pensare all'azione della lama che distribuisce la polvere. Si deve favorire che la lama impatti su un singolo pezzo per volta, che la superficie di contatto sia progressiva, preferibilmente tonda o raccordata e che il ricoprimento inizi sul lato corto per favorire la stabilità (figura 2.6). Il rischio altrimenti è che il contatto tra lama e pezzo porti al sollevamento dell'ultimo strato o alla deformazione del pezzo. Nel caso di superfici parallele alla lama sufficiente una rotazione di pochi gradi per rendere progressivo il ricoprimento e risolvere il problema.

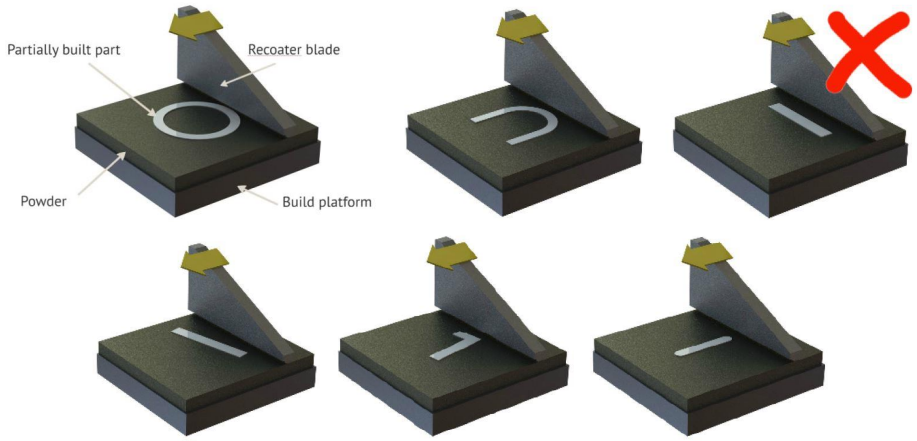

Figura 2.6: Orientamento nel piano [1], in ordine da in alto a sinistra: Definizione delle parti, esempio di geometria ottimale curva, orientamento non accettabile, soluzione per il riorientamento con rotazione di pochi gradi, orientamento corretto con impatto sul lato corto, geometria ottimale sottile e raccordata.

2.1.6 Strutture Snelle

Le strutture sottili e alte sono soggette a una possibile deformazione a causa della lama, infatti basta una piccola sollecitazione per andare a curvare il pezzo. Le possibili soluzioni sono creazione di supporti rimovibili, strutture per irrigidire interne o la riprogettazione delle parti. Si considera come dimensione critica un rapporto tra altezza e sezione pari a 8. Alcuni esempi sono mostrati in figura 2.2.

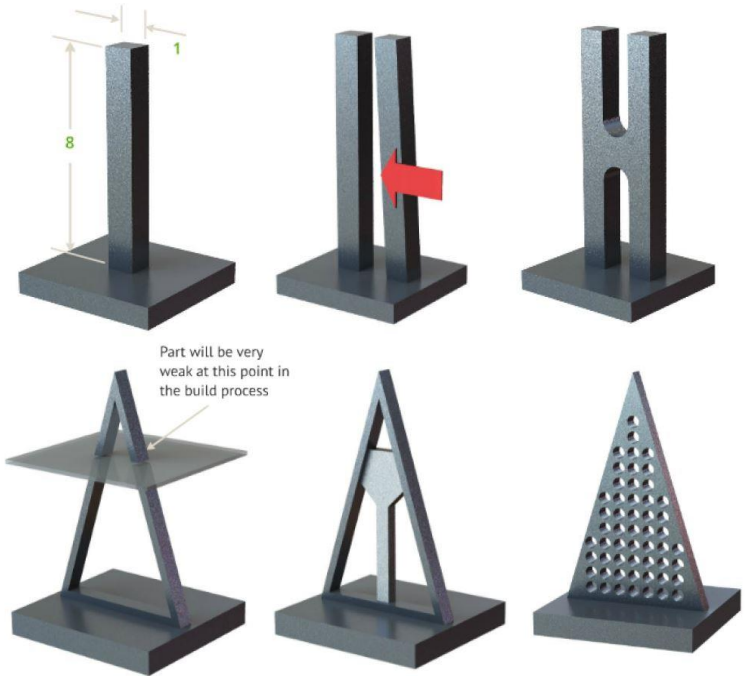

Figura 2.7: Strutture snelle [1], da in alto a sinistra: Proporzioni critiche per strutture snelle, possibile deformazione a causa della lama, possibile sistema di irrigidimento, evidenza dell'instabilità della struttura durante la costruzione, supporto rimovibile, progettazione per la rimozione di supporti.

È bene evitare che la lama proceda in opposizione a una superficie angolata in quanto è più semplice avere una deformazione con conseguente impatto e interruzione del job (figura 2.8).

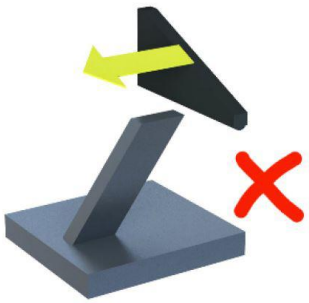

Figura 2.8: Orientamento da evitare per strutture snelle angolate [1]

2.2 Supporti

È bene evidenziare la funzione e le problematiche legate ai supporti poiché sono un punto critico della progettazione. Si tratta di parti essenziali della progettazione poiché servono a:

- Supportare nuove superfici fuse;
- Prevenire deformazioni in seguito a ritiro;
- Dissipare calore dal bacino di fusione;
- Supportano e ancorano la geometria rispetto al passaggio della lama e al peso proprio.

Non si possono quindi rimuovere completamente ma si vogliono minimizzare tramite il corretto design e orientamento, poiché richiedono tempo e energia per essere costruiti e rimossi e costituiscono materiale di scarto. Se i supporti sono insufficienti può avvenire la rottura degli stessi o la deformazione del pezzo durante la costruzione, causando la perdita del componente. Bisogna quindi trovare il giusto compromesso.

Per ridurre il materiale usato e semplificare la rimozione, i supporti sono studiati con una struttura reticolare detta block. Questa è caratterizzata dalla suddivisione in blocchi con una sezione perpendicolare alla direzione di costruzione a "rete" con maglie quadrate e vari fori a forma tipicamente esagonale lungo la direzione di costruzione, come mostrato in figura 2.9. Per semplificare la rimozione tipicamente l'interfaccia con il pezzo è costituita da un profilo a triangoli che intersecano il pezzo. Una corretta calibrazione della struttura, di cui bisogna scegliere diversi parametri come la frammentazione, dimensione dei denti, forma dei fori e hatching, consente di ottenere un supporto rigido ma rimovibile manualmente. Un esempio si trova nello studio di Calignano [3] in cui si mostra uno studio statistico volto a trovare la combinazione ottimale dei parametri.

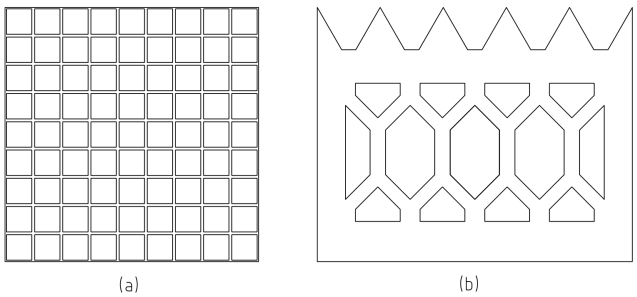

Figura 2.9: Cella del supporto a blocchi: (a) Vista superiore, (b) vista laterale

In casi particolari è possibile usare anche semplicemente dei supporti lineari o punti.

Si noti che non è consigliato usare supporti rimovibili interni, ovvero che sono ancorati da entrambi i lati al pezzo, poiché si potrebbero avere deformazioni in seguito alla rimozione a causa di tensioni residue. È quindi preferibile generare supporti che si ancorino direttamente alla base oppure delle strutture da non rimuovere che irrigidiscano il pezzo.

Capitolo 3

Caso studio: sistema a microonde in doppia banda e doppia polarizzazione

3.1 Analisi della geometria

Poste le basi del design per la fabbricazione additiva si può passare ad analizzare la geometria del caso studio per capire quali sono i punti critici e le difficoltà.

Si tratta di una intero antenna feed-chain integrato in un singolo componente, in particolare è il sistema in doppia banda (K e Ka) e doppia polarizzazione mostrato riportata nello studio di Peverini et al. [11]. Inizialmente l'idea era di produrla in due pezzi come si vede nella figura 3.1, ma in seguito si è riusciti a comporre un singolo componente escludendo l'antenna. Sono stati prodotti con successo le singole parti e altri componenti analoghi, come riportato in altri studi, per verificare la fattibilità, rimane quindi da produrre il componente completo.

Lo studio elettromagnetico ha portato a una geometria delle cavità interne (figura 3.2) che è stata esportata come solido STEP dal software dedicato. Si vuole quindi generare una struttura che presenti internamente la geometria fornita, mentre esternamente deve soddisfare i criteri di costruzione.

Dallo schema in figura 3.1, che si traduce nelle cavità in figura 3.2, si comprende la complessità della struttura. Si hanno infatti integrati in una singola parte:

- Septum: Uno al centro in banda Ka e uno inferiore in banda K;
- Accoppiatori: Uno superiore in banda K/Ka e uno centrale in banda K;

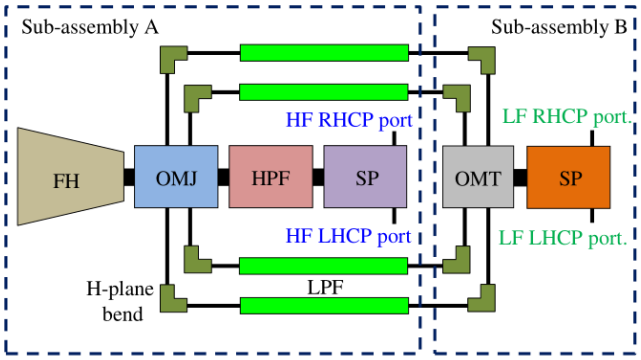

Figura 3.1: Schema del componente proposto nello studio [11]

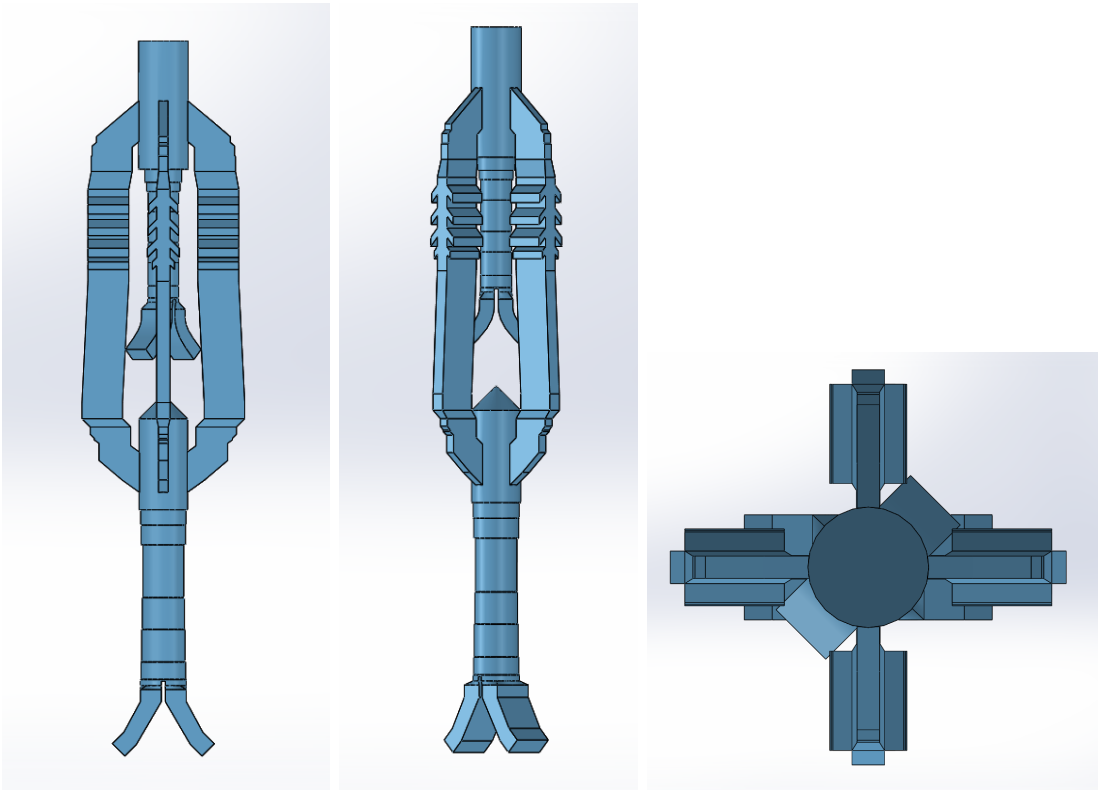

Figura 3.2: Viste laterali e superiore della geometria interna del componente

- Bend: Che consentono di deviare l'onda elettromagnetica;
- Filtri: Quattro filtri passa banda nelle quattro guide laterali;
- Guide d'onda: Si hanno varie guide d'onda a sezione rettangolare e circolare che consentono di connettere i vari componenti.

A tali funzioni si deve aggiungere nella parte superiore tramite flangia circolare l'antenna horn.

I parametri dell'ottimizzazione del componente elettromagnetico sono stati impostati in modo tale che fosse costruibile in verticale, ovvero con asse parallelo alla direzione di costruzione. Visto che si hanno parecchie superfici interne prismatiche o cilindriche o con angoli limitati rispetto alla verticale questa scelta consente di avere la massima qualità superficiale, che si ricorda avere lungo la direzione di costruzione. Per rendere possibile la costruzione lungo tale direzione è necessario evitare di avere supporti interni che risulterebbero non rimovibili, e quindi tutte le superfici aggettanti devono avere inclinazione superiore o uguale a 45 ° rispetto all'orizzontale oppure avere un'estensione molto limitata. Su piccole regioni si può accettare anche un'inclinazione inferiore a 45° che, come riportato precedentemente, è autosupportante fino a circa 30°, ma con qualità superficiale inferiore.

La geometria interna, e quindi anche quella esterna, è molto snella, come spiegato nella sezione di DFAM ha il rischio di deformarsi e flettere a causa dell'azione laterale della lama. Ciò non può essere cambiato orientando diversamente la parte e bisogna quindi prevedere dei supporti che consentano di irrigidire il pezzo. In particolare si è scelto di non agire con supporti rimovibili interni poiché trattandosi di una parte che necessita elevata precisione si rischia di avere deformazione alla rimozione dei supporti. Nonostante il trattamento termico di distensione si rischia di avere delle tensioni residue che determinano discrepanze dalla geometria originale non recuperabili, non avendo possibilità di lavorare la geometria interna.

Si andrà quindi a agire tramite nervature o strutture che consentano di irrigidire, costruite in modo da essere autosupportanti e concentrate sul fatto di bloccare reciprocamente elementi per impedire movimenti relativi tra le varie parti. Tali rinforzi non saranno rimossi e causeranno quindi un leggero aumento del peso della geometria, che però risulta inevitabile per cercare di ridurre errori geometrici. Una possibile soluzione alternativa potrebbe essere l'uso di strutture reticolari, ma si tratta di una soluzione più generica e meno mirata, si preferisce quindi sfruttare strutture non reticolari.

Si noti che lo spessore richiesto minimo è di circa 1mm sia dal reparto elettromagnetico per garantire il corretto funzionamento, sia dal punto di vista tecnologico, in quanto non è possibile fare superfici troppo sottili con altezze elevate. Per cercare di alleggerire la struttura e ridurre il peso che grava sulla base si è scelto di usare uno spessore di 1mm nella parte superiore, mentre si usa uno spessore di 2mm nella parte inferiore, consentendo di avere maggior rigidezza. Si noti che utilizzare spessori limitati consente di evitare accumuli di materiale che potrebbero generare deformazioni in seguito al ritiro da solidificazione, dovrebbe quindi semplificare la precisione geometrica dal punto di vista termico.

È quindi opportuno iniziare a analizzare la geometria interna per capire quali sono le criticità e ce ci sono problemi che potrebbero pregiudicare la riuscita corretta del componente. Per comodità si è scomposto in tre parti il componente (inferiore, centrale e superiore).

Gli angoli delle superfici angolate interne, che non possono essere supportate, sono particolarmente critici, per questo si è svolta un'analisi degli angoli tramite il software Autodesk Netfabb impostando come angolo limite 45°. Si hanno alcune superfici che non rispettano questo requisito, come sarà riportato in seguito. Si noti che essendo la geometria interna descritta come un solido bisogna ragionare al contrario per trovare i problemi di inclinazione, saranno infatti le superfici superiori quelle che diventeranno le superfici aggettanti interne.

3.1.1 Parte inferiore

Si tratta della parte più vicina alla piattaforma, come si nota dall'immagine 3.3 si hanno due guide d'onda a profilo rettangolare secondo lo standard EIA WR42, che lavora con banda K e ha dimensioni 10,7 × 4,32 mm. Le parti terminali sono a 45° dalla verticale e quindi le guide inferiori sono autosupportanti, mentre risulta oltre il limite il loft agli angoli, come mostrato in figura 3.3. Essendo una superficie di ridotte dimensioni e con strutture circostanti che rapidamente aumentano l'angolo e che contribuiscono a sostenere si ritiene accettabile l'inclinazione, sebbene ci sia il rischio di peggior qualità superficiale.

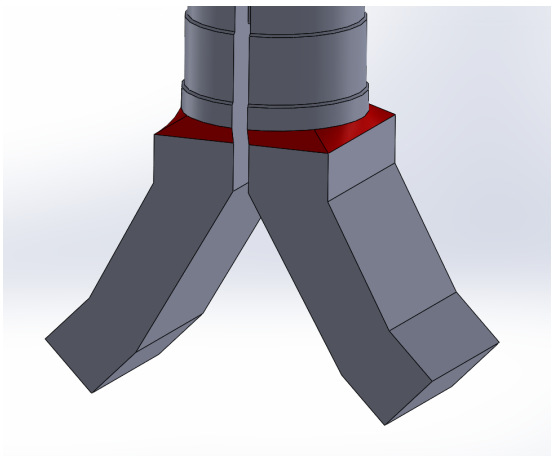

Figura 3.3: Vista del seputm evidenziando in rosso la superficie al di sotto dei 45°

La struttura interna "a gradini" è una lamina di spessore 1mm ed è quindi costruibile senza particolari criticità. Si nota che le estremità delle guide rettangolari possono essere allungate o accorciate secondo necessità. Questa parte di componente sarà ancorata alla piattaforma e dovrà essere sufficientemente robusta da reggere il resto del componente.

Si ha una sezione cilindrica con raggi variabili, prima decrescenti da 5,5 mm a 5 mm e poi crescenti fino a 6 mm (figura 3.4). Nella parte decrescente i cambi dimensionali sono effettuati tramite dei tronchi di cono con angolo di 45° di piccole dimensioni, che risultano quindi autosupportanti e non danno problemi.

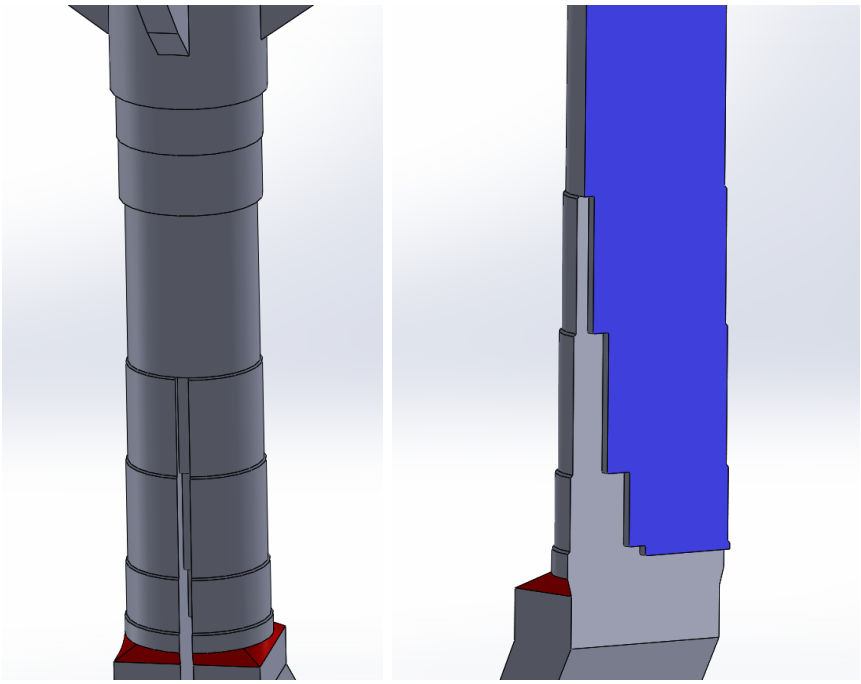

Figura 3.4: Parte cilindrica con diametri variabili, nella seconda immagine è evidenziato il dettaglio in sezione della lamina scanalata interna.

Si noti che la parte cilindrica è lunga circa 45 mm e con diametro circa 11 mm, risulta quindi piuttosto snella. Tale aspetto combinato con il peso della parte superiore più massiccia e la forza laterale della lama si teme che possa causare una deformazione flessionale del pezzo. Nella fase di design bisognerà quindi trovare delle soluzioni per irrigidire questa zona e evitare che si pieghi.

3.1.2 Parte centrale

Si hanno quattro vie a sezione rettangolare che divergono dal canale centrale circolare (figura 3.5). Si nota che la giunzione tra la guida rettangolare e il cilindro presenta il profilo superiore che teoricamente non è autosupportante, non presenta infatti materiale sottostante ed è orizzontale, ma vista la forma acuminata e la limitata larghezza (2,4mm) si ritiene che sia costruibile. Si ha in particolare che il primo strato dello spigolo sarà una breve linea tra le due parti solide laterali, il ridotto peso e il sostengo dai lati dovrebbero essere sufficienti a far si che riesca a essere retto dalla polvere non fusa sottostante. Si osserva inoltre che ci sono dei

brevi tratti, di circa 2,2 mm di lunghezza evidenziati in figura 3.5, in cui l'angolo è inferiore a quello limite di 45°, ma essendo 35,75° rispetta il limite di fattibilità di 30° e risulta quindi costruibile per quanto si possa perdere un po' in qualità superficiale. Anche in questo caso si ha la limitata larghezza del canale che aiuta a ridurre la criticità della geometria. Le successive variazioni di sezione nei canali rettangolari non presentano particolari criticità e rispettano l'angolo limite.

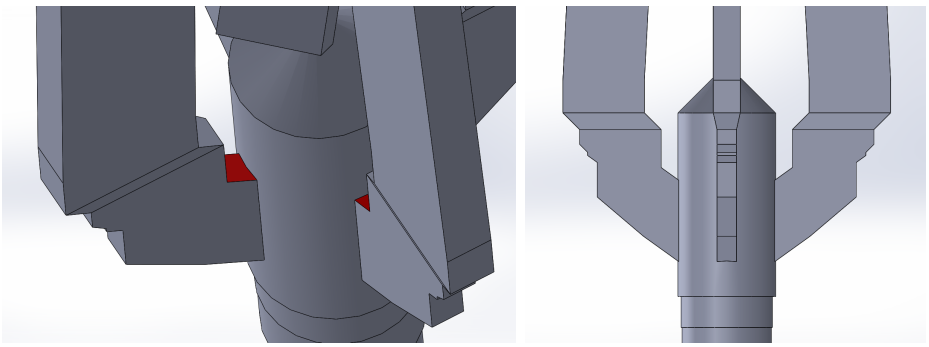

Figura 3.5: Vista del coupler inferiore, nella prima immagine si evidenzia in rosso la superficie al di sotto dei 45°, nella seconda la variazione geometrica.

Le quattro guide rettangolari (figura 3.6) non sono perfettamente verticali ma hanno un angolo di circa 2,8° rispetto alla verticale, essendo limitato non si aspettano effetti negativi sulla qualità superficiale. Si noti che tale angolo è derivato dal fatto che inizialmente si pensava di scomporre il sistema di alimentazione di antenna in due parti, dall'unione delle quali è risultato il piccolo disallineamento. Prese singolarmente le 4 parti sono molto sottili e allungate, si sospetta quindi la possibilità di deformazioni a causa di tensioni o passaggio della lama, sono quindi da irrigidire.

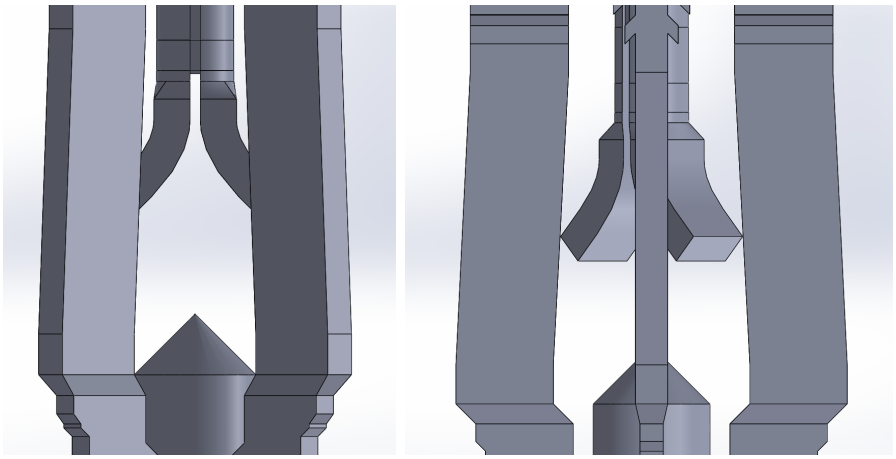

Figura 3.6: Viste laterali della parte centrale, si notino il tappo e la giunzione delle guide oblique superiori.

La parte conica al termine della sezione circolare è un tappo che ha lo scopo di bloccare le onde elettromagnetiche (figura 3.7), non si tratta dunque di una parte particolarmente critica. È stato costruito in modo da essere autosupportante con diametro circa 12 mm, angolo di 45° e con il vertice smussato tramite una semisfera. C'è il rischio di adesione delle polveri all'interno del vertice a causa della limitata dimensione e profondità (raggio pari a 0,1 mm) ma non si dovrebbe avere effetto negativo sulle prestazioni.

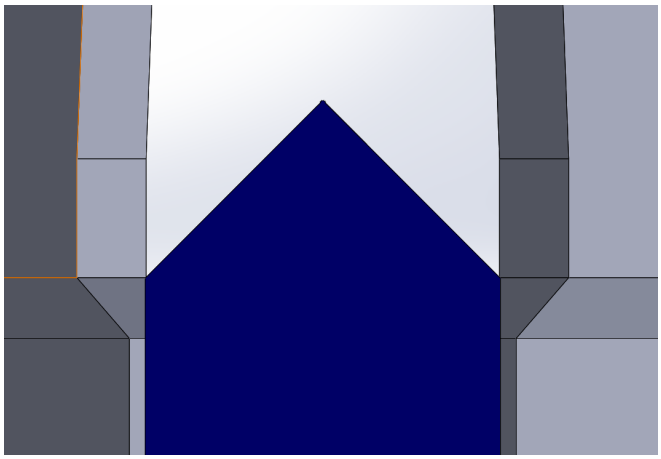

Figura 3.7: Vista in sezione del tappo conico

I filtri (figura 3.8) sono stati generati a seguito di vari studi volti a ottenere la costruibilità con asse verticale, come riportato precedentemente. In particolare si hanno quattro rientranze di profondità tra 1,08 mm e 2,25 mm e spessore tra 1,84 mm e 2,23 mm, distanti 2,3 mm - 3,3 mm, che non si aspetta creino problemi rispettando i valori minimi del dettaglio e degli angoli. Le pareti sono verticali e quindi hanno buona qualità.

Le guide rettangolari uscenti nella parte centrale (figura 3.6) presentano una geometria analoga a quella inferiore, ma questa volta la guida rispetta lo standard EIA WR28, per la banda Ka e con sezione 7,11 × 3,56 mm. Si nota che le guide terminano a 45 gradi e da qui potranno essere allungate secondo necessità, come quelle inferiori, l'unica differenza riscontrata è che in questo caso anziché avere dei cambi direzionali ad angolo si ha una curvatura che porta al septum.

Si ha poi come sotto un cilindro con raggio variabile 3,8 mm - 3,5 mm - 6,1 mm (figura 3.9) tramite smussi a 45° e quindi costruibili senza difficoltà. Si nota però che la differenza di raggio è anche molto inferiore a 0,01 mm tra alcune sezioni, tale distanza é inferiore alla accuratezza dell'SLM e perfino alla dimensione della polvere, non si è quindi sicuri di riuscire a ottenere una geometria reale che rispetti quella teorica. Anche in questo caso il cilindro è verticale e quindi avrà buona qualità superficiale. Vista l'apertura superiore direttamente in asse con il cilindro è

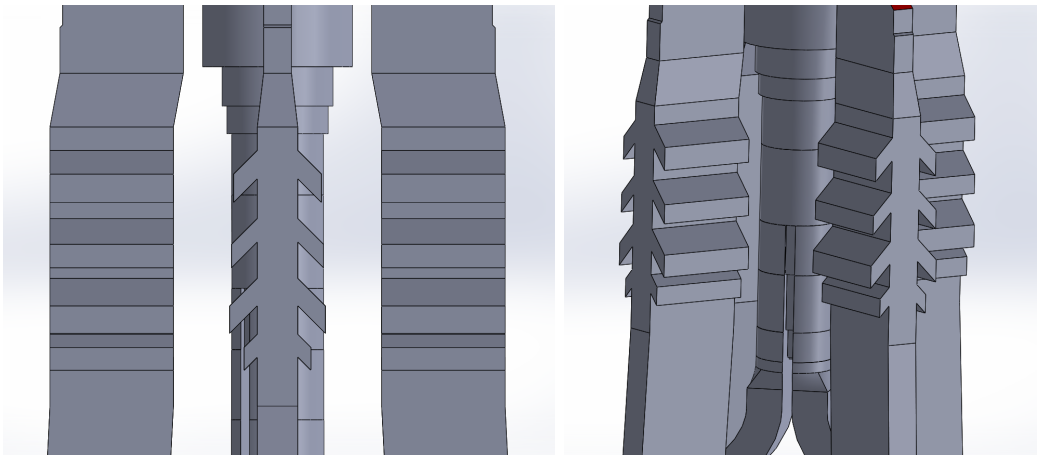

Figura 3.8: Dettaglio dei filtri

possibile in questa zona accedere per poter fare una pallinatura o per controllare la geometria. La lamina centrale all'interno della sezione cilindrica ha come sotto ha spessore 1 mm e presenta dei gradini smussati che soddisfano i requisiti di fattibilità.

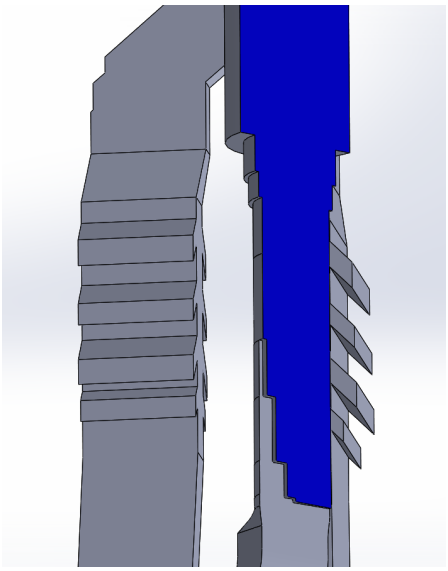

Figura 3.9: Parte cilindrica superiore, nella seconda immagine si evidenzia in sezione la lamina interna.

3.1.3 Parte superiore

Nella parte superiore (figura 3.10) si ha di nuovo una giunzione tra canali laterali e centrale cilindrico, la geometria è approssimativamente simmetrica rispetto a quella inferiore, non si ha più la criticità dello spigolo superiore dell'intersezione ma è

amplificato il problema della superficie inclinata. In questo caso si ha un piano a 40°, quindi migliora l'angolo che si avvicina alle condizioni ottimali di qualità superficiale, ma è più esteso (10,5 mm sull'orizzontale) e quindi aumenta il rischio di difetti superficiali. Analogamente a prima il canale è molto stretto misurando 2,3 mm di larghezza e quindi si dovrebbe avere un errore contenuto grazie alle prossime superfici verticali. Il componente termina nella parte superiore con un cilindro con asse verticale di diametro 6,2 mm che non presenta particolari criticità. Anche questa parte può essere accorciata o allungata secondo necessità.

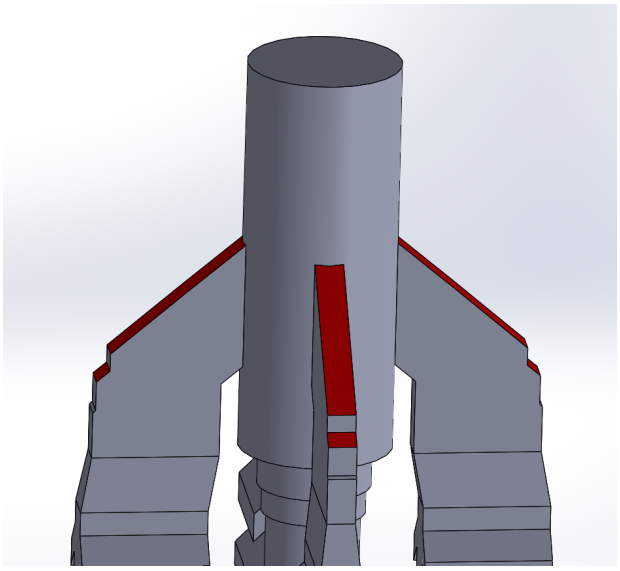

Figura 3.10: Parte superiore, septum e parte finale della cavità cilindrica

3.2 Ricostruzione della geometria

Una volta analizzate le varie criticità e difficoltà intrinseche nella geometria interna è possibile passare alla generazione di una possibile struttura esterna. Sono state costruite varie ipotesi prima di scegliere la più promettente, qui si riporta il risultato finale.

Il primo approccio comune nell'ambito dei sistemi a microonde è partire dall'offset della geometria interna, che consente di ottenere una geometria molto leggera da cui procedere con la ricostruzione. Si ha come spessore indicato circa 1 mm, che soddisfa sia l'aspetto elettromagnetico che di fattibilità per SLM.

Per evitare errori nella superficie interna si è generato dapprima un solido pieno corrispondente alla geometria esterna, in seguito si è effettuata un'operazione di sottrazione della geometria interna. In questo modo si ha la certezza che l'interno sia esattamente corrispondente a quello richiesto, fornito sotto forma di solido. In

particolare sono state generate tutte le varie parti solide e solo alla fine unite, in modo tale da rendere più semplice la modifica e evitare cavità interne per errori di ricostruzione.

La ricostruzione è stata eseguita tramite il software di modellazione parametrico SolidWorks. Spesso per l'additive sono utili e interessanti software che consentano maggiore libertà nelle geometrie, ma in questo caso si ha a che fare con una struttura ben precisa e quindi si ha meno interesse nella libertà creativa che invece è utile nel caso di ottimizzazione topologica. Le immagine mostrano in blu le cavità e in grigio semitrasparente la geometria ricostruita, consentendo di mostrare come la geometria generata si adatta a quella interna.

3.2.1 Parte inferiore

La prima operazione svolta è stata creare le flange (figura 3.11) come richiesto dallo standard EIA WR42, che regola distanza e dimensione dei fori oltre che larghezza e altezza della flangia completa. Lo spessore è stato fissato a 5 mm, dimensione che è già stata usata con successo in altri studi in quanto buon compromesso tra massa e rigidezza. In seguito è stata regolata la lunghezza delle due guide in modo da consentire il montaggio senza il contatto dei bulloni e evitando di allungare eccessivamente il componente, visto che l'altezza è una dimensione critica per la costruzione.

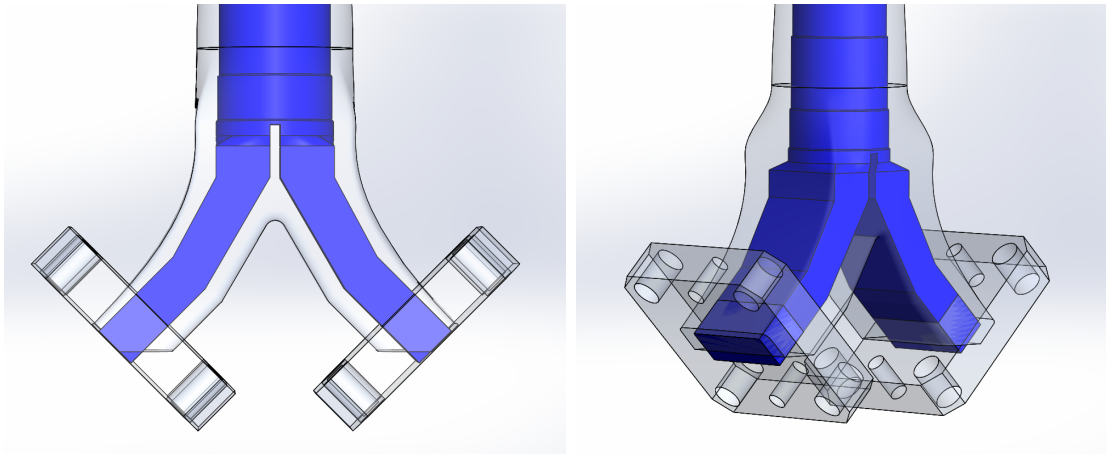

Figura 3.11: Dettaglio della parte inferiore

Si è scelto di distinguere lo spessore in due zone, nella parte superiore, oltre il septum inferiore, si usa uno spessore da 1mm, mentre sotto si usa uno spessore di 2mm. Questa scelta è dettata dal fatto che nella parte inferiore si ha la struttura cilindrica molto stretta rispetto alla parte sovrastante e si teme una certa instabilità che si può manifestare con una flessione a causa delle forze laterali della lama. Si

va quindi a inspessire la zona dove si teme che possa avvenire la flessione. Gli spessori sono indicativi, poiché non facendo un offset fedele si hanno alcuni tratti con spessore superiore e altri minore.

Si è quindi generata una geometria di spessore circa 2 mm attorno alla cavità. Tramite smussi e loft sono stati ridotti gli spigoli che non sono funzionali, quindi le pieghe delle due guide inferiori sono state ammorbidite con una curva, il passaggio tra sezione quadrata e circolare è stato reso meno brusco tramite un loft più allungato e le variazioni di sezione sono state distribuite tramite una superficie di rivoluzione (figura 3.12) ottenuta con una curva distante circa 2 mm dai cilindri interni. L'inserto interno è costruito pieno per via del limitato spessore.

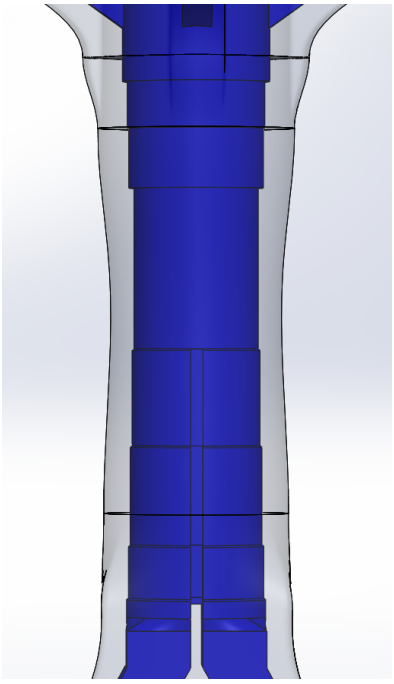

Figura 3.12: Parte cilindrica

3.2.2 Parte centrale

La parte centrale è la parte più complessa del componente, avendo più canali paralleli risulta difficilmente fabbricabile con altre tecnologie con questo design ed è quindi interessante trovare soluzioni per SLM. In particolare sono state identificate due possibili soluzioni (figura 3.13): la prima prevede l'unione dei vari canali in un singolo monoblocco, la seconda il mantenimento della separazione tra i canali con una geometria più prossima all'offset.

La prima soluzione ha il vantaggio di irrigidire maggiormente la struttura, risultando massiva e collegando fortemente le varie parti, ma la concentrazione di massa

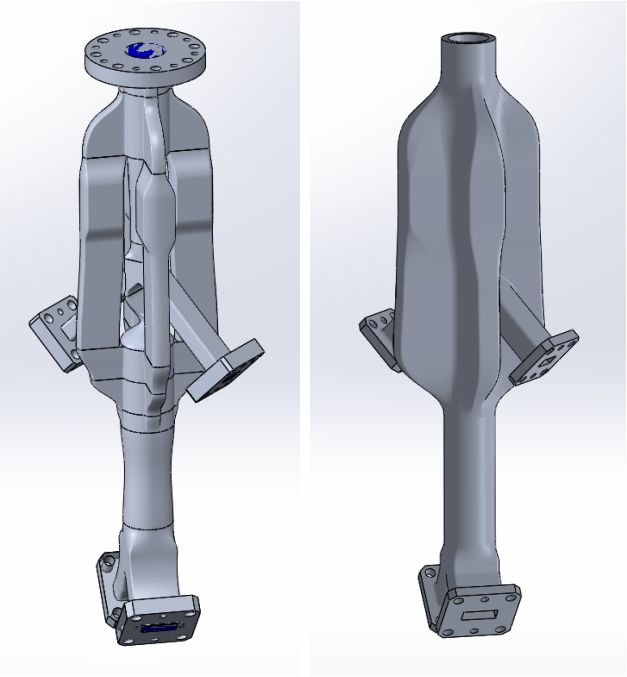

Figura 3.13: Due differenti geometrie ipotizzate per gestire i vicini canali centrali

può essere sfavorevole poiché si alza significativamente il baricentro e si aumenta l'instabilità del pezzo. Inoltre si ha a tratti materiale pieno che potrebbe dare origine a deformazioni a seguito del ritiro da fusione.

La seconda risulta notevolmente più leggera, non ha concentrazione di materiale ed è quindi più facilmente costruibile. Ha però bisogno di qualche sistema per irrigidire la struttura, che risulterebbe troppo a rischio di deformazioni relative tra le varie parti, ovvero si potrebbero avere deformazioni che portano a disallineamenti dei canali e quindi a malfunzionamenti.

Si è scelto di utilizzare la seconda soluzione.

La ricostruzione è quindi stata effettuata analogamente alla parte inferiore tramite loft e estrusioni che si posizionano a circa 1 mm dalla superficie interna e che ammorbidiscono spigoli e dettagli di piccole dimensioni. La lamina interna è stata ricostruita piena visto il limitato spessore. I filtri sono stati ricostruiti esternamente come dei solidi semplici (figura 3.14), non è stata seguita la geometria interna in quanto si tratta di piccole lamine di spessore 2 mm che sarebbe stato complesso alleggerire con fori o altro senza portare alcun vantaggio effettivo.

Osservando la parte interna (figura 3.15) si vede che le guide oblique sono state generate tramite offset di 1mm e seguono fedelmente l'interno fino alla giunzione. Il loft tra sezione rettangolare e circolare è stato reso più progressivo, analogamente

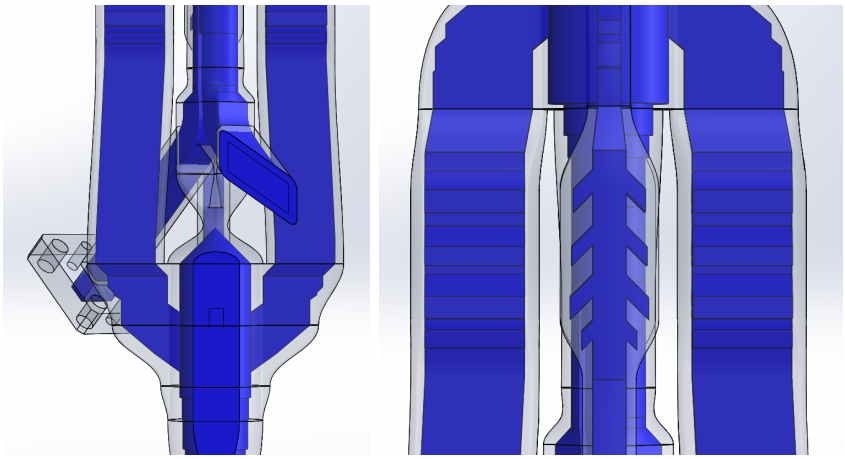

Figura 3.14: Dettaglio del septum inferiore e dei filtri

alla parte inferiore, e le variazioni di diametro sono state smussate tramite un solido di rivoluzione generato da una spline. È stato conservato per ora il gradino superiore poiché significativamente più grande degli altri e si cerca una soluzione alternativa per evitare di inspessire troppo la parte.

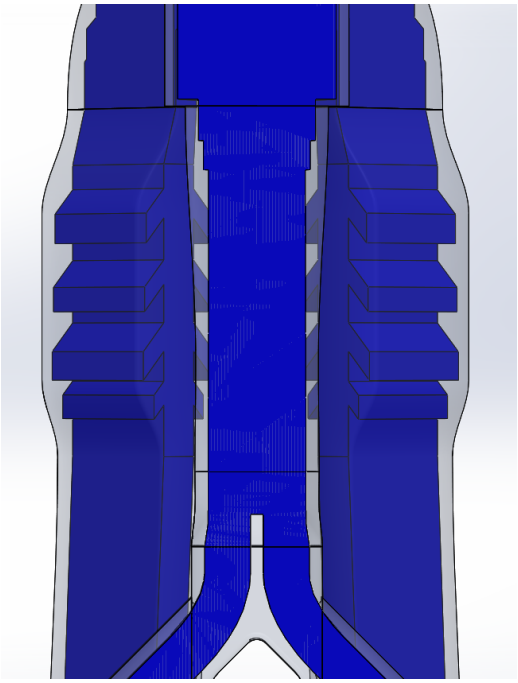

Figura 3.15: Dettaglio del canale cilindrico superiore

Si noti che già in questa fase si è iniziato a generare un supporto che consenta di irrigidire la struttura, in particolare tra il "tappo" e la giunzione delle guide

sono state generate due superfici che consentono di bloccare le due zone (figura 3.16), prevenendo spostamenti relativi. Presentando una sezione molto ridotta non si ha resistenza flessionale che sarà gestita dalle parti più esterne che hanno intrinsecamente maggior inerzia.

Sono state aggiunte come alla base le flange WR28 come da standard e con spessore 5 mm come quelle sottostanti (figura 3.16). La lunghezza delle guide è regolabile ed è stata impostata in modo che la flangia fosse esterna al pezzo, per non creare problemi di montaggio, ma non troppo lunga in modo da non creare complicazioni di costruzione o aumentare senza necessità gli ingombri del pezzo. Si osserva che le guide oblique sono abbastanza lunghe e sottili, questo aspetto associato all'inclinazione in direzioni opposte obbliga una delle due a essere in opposizione alla lama, ovvero si rischia il sollevamento della parte e la conseguente deformazione e possibile impatto con la lama. Risulta quindi importante pensare a un sistema per ancorare le guide in modo da impedirne il libero sollevamento, sebbene avendo inclinazione di 45° esse siano autosupportanti.

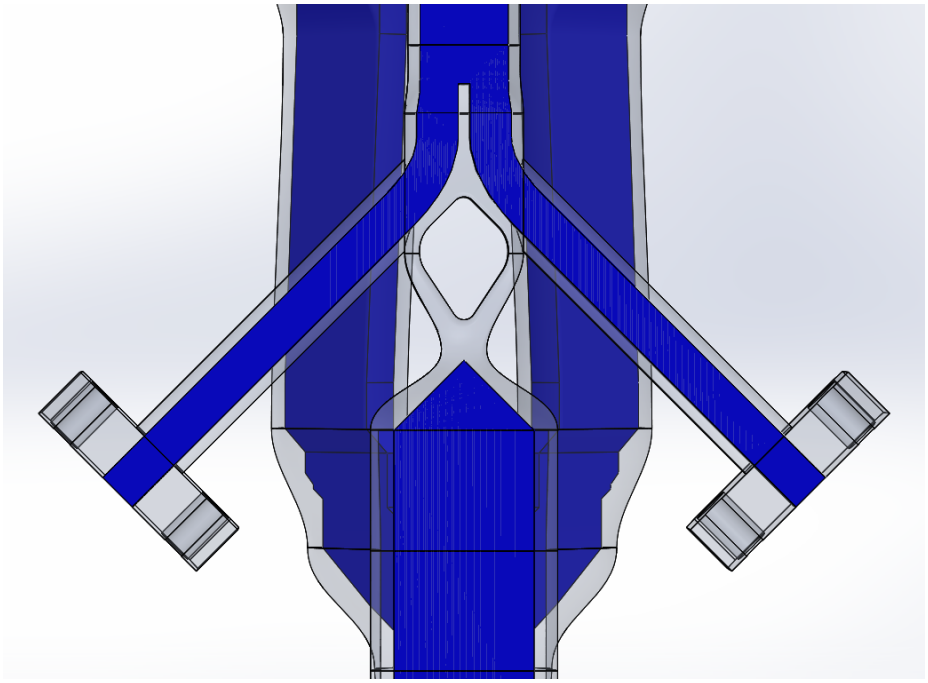

Figura 3.16: Dettaglio delle guide con le flange terminali e del tappo con il relativo rinforzo

3.2.3 Parte superiore

La parte superiore (figura 3.17) è stata costruita in modo analogo al septum inferiore, mantenendo uniti i quattro canali laterali con quello centrale fino a quando

non si raggiunge una distanza sufficiente. Come indicato precedentemente in questa parte è critica la diagonale superiore che rischia di non avere una buona qualità superficiale. Si è cercato di rendere abbastanza omogeneo per mezzo di un loft che smorza i vari spigoli in una curva più morbida.

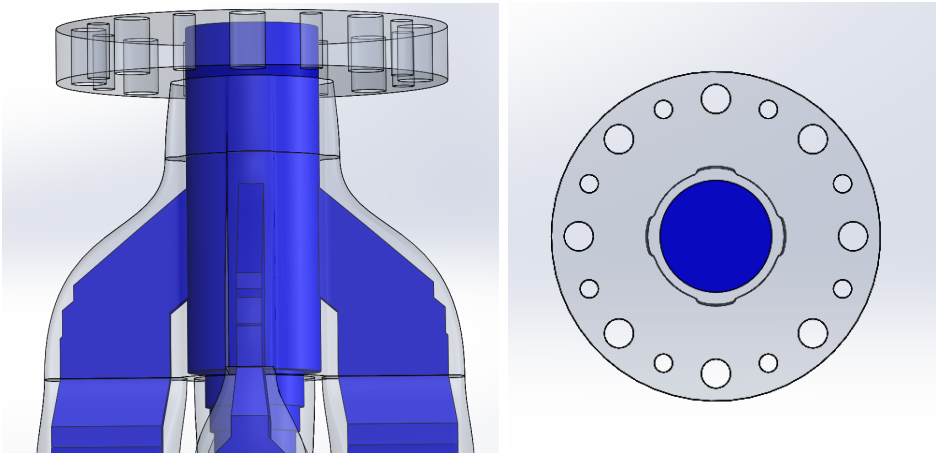

Figura 3.17: Dettaglio del septum superiore e della flangia circolare

All'estremità circolare va aggiunta una flangia (figura 3.17), anch'essa circolare, che consenta il montaggio. In questo caso è orizzontale e quindi è necessario pensare a un sistema di supporti o modificare la geometria perché sia autosupportante, inoltre bisogna evitare eccessivo accumulo di materiale in superfici orizzontali perché si è a rischio di deformazioni da ritiro.

3.2.4 Risultato preliminare

Ne risulta quindi una geometria provvisoria piuttosto snella che è molto aderente alla geometria interna (figura 3.18).

3.2.5 Irrigidimento

Bisogna quindi iniziare ad agire per rinforzare la struttura nei punti evidenziati nella sezione precedente. Si nota come questa operazione sia possibile grazie alla libertà geometrica offerta dalla fabbricazione additiva, in quando si disegnano superfici difficilmente generabili altrimenti, con conseguente guadagno principalmente in peso. Importante è costruire strutture che siano autosupportanti, non sarebbe utile generare rinforzi che a loro volta devono essere supportati. Non è necessario sviluppare geometrie particolarmente robuste in quanto devono solo reggere il peso della struttura o sopportare gli stress determinati dalla lama. Un altra azione da eseguire in questa fase è il raccordare i vari spigoli, in particolare quelli concavi, che

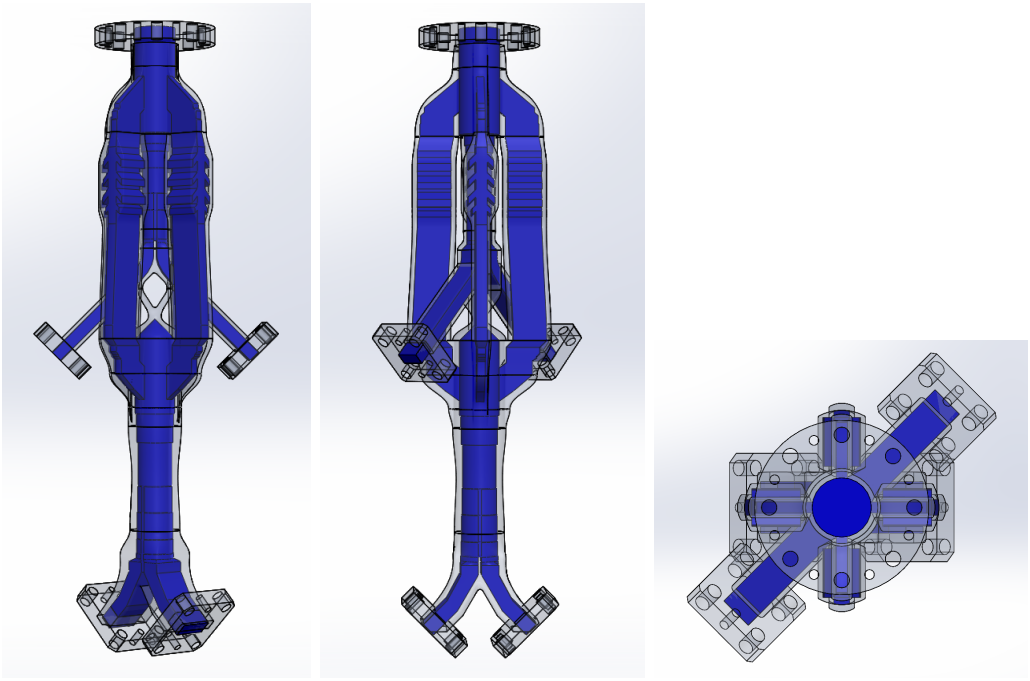

Figura 3.18: Viste laterali e superiore del componente provvisorio

possono generare accumuli di tensioni e determinare una rottura del pezzo durante la costruzione, come si trova nello studio di Kranz et al. [7].

Si è quindi partiti dalle flange inferiori (figura 3.19), in primo luogo sono stati effettuati degli scavi nelle flange, riducendo l'accumulo di materiale e diminuendo leggermente il peso. Questa operazione è effettuata comunque mantenendo una certa superficie su cui appoggia la testa della vite e per garantire una certa rigidità della flangia. La forma rettangolare piena è infatti nata per comodità per la lavorazioni alle macchine utensili, ma non è funzionale.

Sono quindi state creati due piccoli collegamenti tra le flange (figura 3.19), per limitare possibili deformazioni che portino al disallineamento delle flange durante la rimozione dei supporti, come riscontrato su un componente prodotto precedentemente. Si noti che sono stati fatti di spessore limitato per evitare di avere sezioni fuse troppo piene e per non disturbare il montaggio dei connettori.

Per iniziare a irrigidire a flessione la parte cilindrica si usano dei supporti che collegano la parte superiore delle flange al canale centrale (figura 3.20). La sezione di tali travi è circa 3×3 mm, crescente verso il cilindro in modo tale da rendere più progressivo il raccordo con la superficie cilindrica. Si è scelto di usare due supporti di piccole dimensioni distanziati tra loro per consentire di avere una certa inerzia senza avere concentrazioni di materiale. Sono stati costruiti con angolo 45° in modo tale da essere autosupportanti.

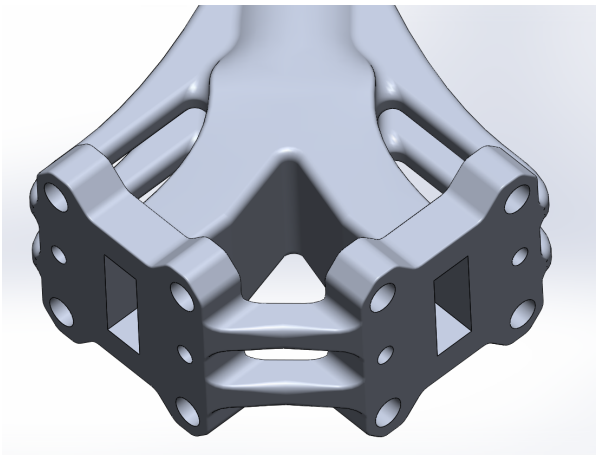

Figura 3.19: Dettaglio delle flange inferiori

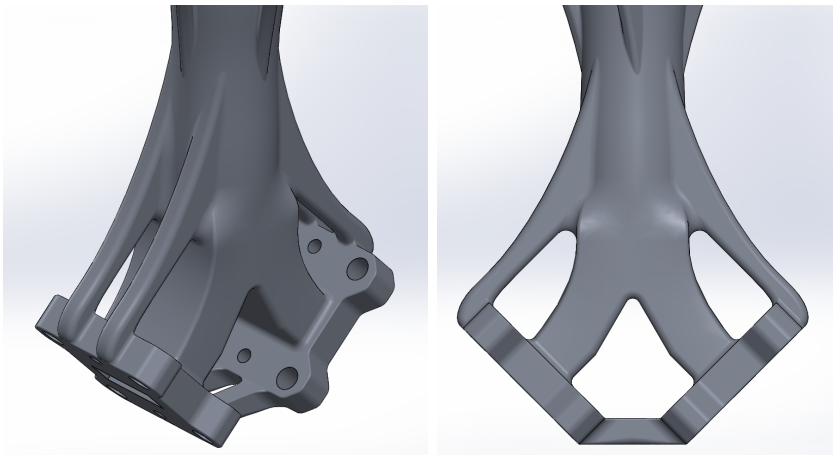

Figura 3.20: Dettaglio dei rinforzi delle flange inferiori

Analogamente sono stati creati i rinforzi tra parte cilindrica e flange superiori (figura 3.21), utili a bloccare le flange superiori rispetto al corpo cilindrico. In questo caso sono un po' più spessi ma più stretti, poiché sono stati costruiti con lo stesso spessore della flangia, e risultano sfalsati rispetto a quelli inferiori di 45°. Sono state create delle ramificazioni per consentire una maggior distribuzione della superficie di ancoraggio con la flangia. Si noti che visti gli angoli e gli archi sarebbe possibile costruire direttamente le flange superiori supportando solamente lo spigolo superiore del termine della cavità, infatti si hanno solo superfici a 45° e archi inferiori a 6 mm di raggio. Si preferisce usare un supporto block per la superficie della flangia in modo tale da aumentare la rigidità della struttura. Similmente alle flange inferiori i rettangoli sono stati scavati lateralmente.

Le guide con sezione rettangolare superiori sono supportate tramite una lamina

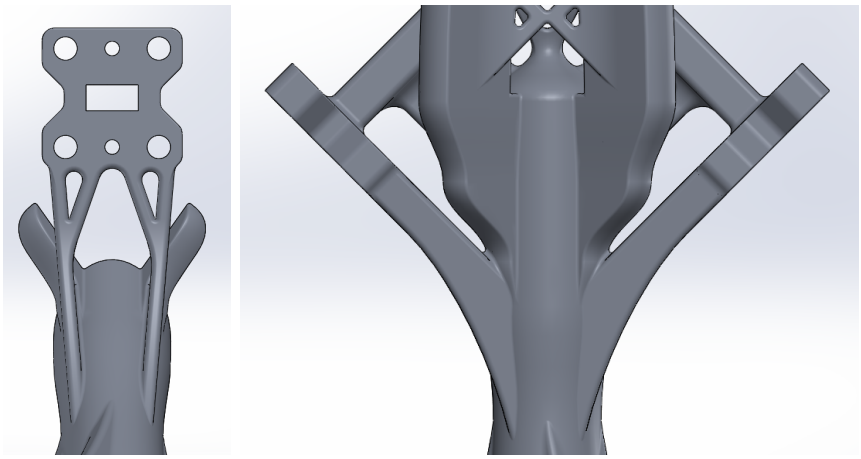

Figura 3.21: Dettaglio dei rinforzi delle flange superiori

di 2 mm forata (immagine 3.22), ciò consente di evitare spostamenti durante la stesura della polvere tramite la lama, per la quale risulta critico il movimento in opposizione ad una superficie inclinata che può risultare in un sollevamento della parte. Ancorando la superficie obliqua alla parte centrale, più solida, si risolve il problema. Il rinforzo tra il termine del cilindro inferiore e la giunzione delle guide superiore è effettuato con due curve sottili che partono dal vertice del cilindro, costruite in modo da essere autosupportanti.

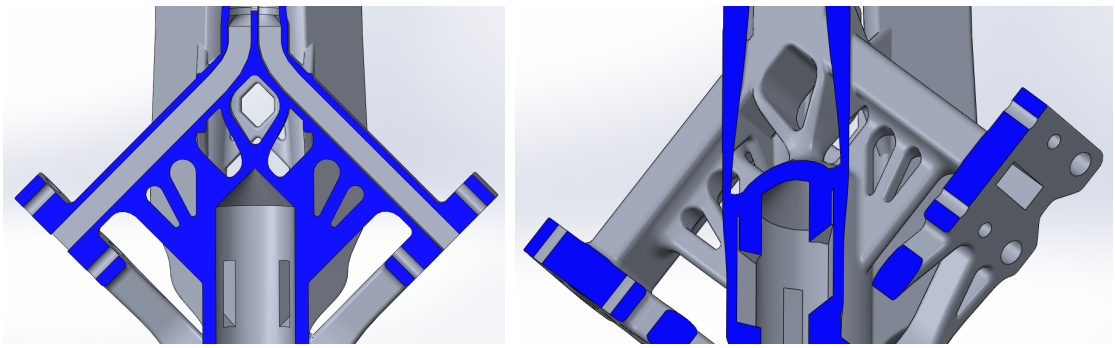

Figura 3.22: Dettaglio in sezione delle guide rettangolari superiori

Si passa quindi ai quattro canali laterali che vengono rinforzati tramite due serie di collegamenti basati su strutture angolate a 45° (figura 3.23). Si noti che tutti i punti di contatto sono fortemente arrotondati per aumentare la superficie di contatto ed evitare discontinuità. Nelle regioni dove si trovano le guide oblique sono state create semplicemente delle lamine che inglobano la guida stessa, bloccando così la posizione dei tre canali.

Si è utilizzato un supporto gusset per sostenere la superficie aggettante della parte

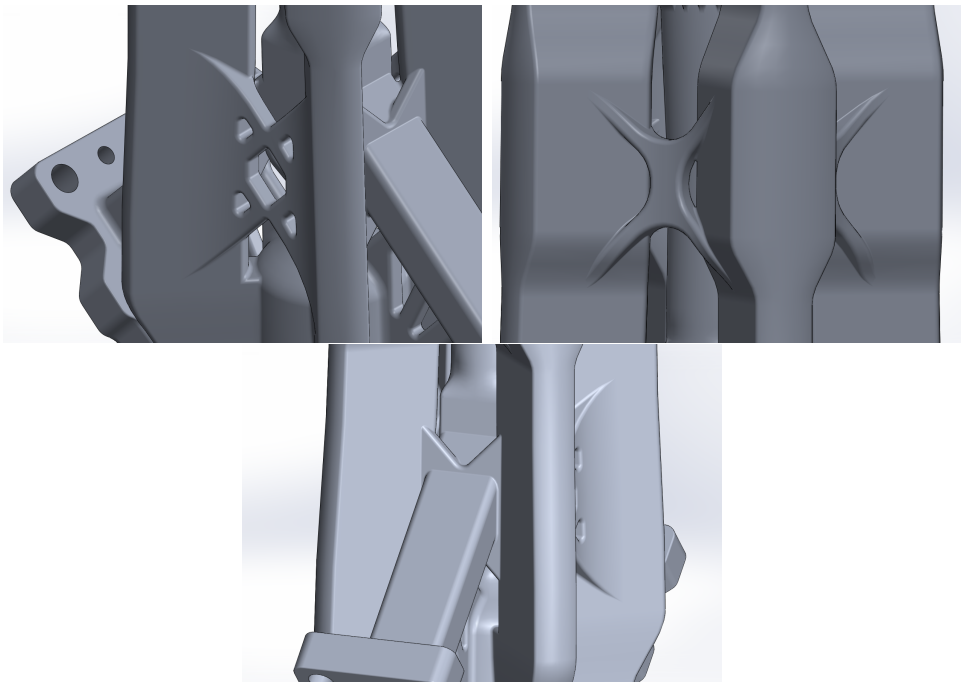

Figura 3.23: Dettaglio dei rinforzi dei quattro canali laterali

cilindrica superiore (figura 3.24). Si è quindi creato prima un cono con angolo di 45° per poi andare a scavare con delle piccole parabole che non necessitano supporti. Si sarebbe potuto creare anche una più semplice superficie conica ma si è preferito una soluzione leggermente meno massiva.

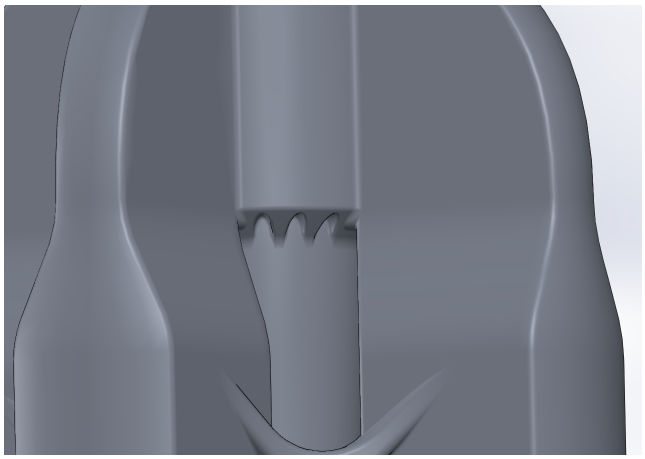

Figura 3.24: Dettaglio del supporto gusset

Per sostenere la flangia superiore (figura 3.25) si è scelto di cercare di minimizzare i supporti rimovibili, sebbene non siano eliminabili dovendo lasciar spazio per la

sede del bullone che è una superficie circolare orizzontale rivolta verso il basso. Si è quindi agito come in alcuni esempi che si trovano in letteratura generando un cono a 45 °, lasciando lo spazio per le viti. Inoltre visto che sarebbe risultato in un cono quasi pieno in alcuni tratti si è scelto di effettuare degli scavi per alleggerire, cercando di distribuirli uniformemente e di non ridurre troppo la sezione resistente. Infine si è raccordato con ampio raggio al canale circolare.

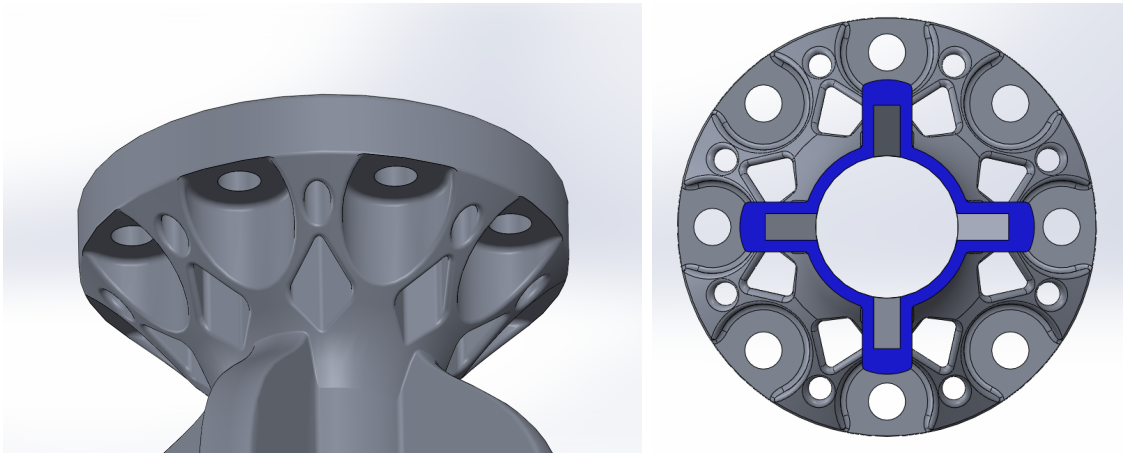

Figura 3.25: Dettaglio e vista in sezione della struttura di supporto della flangia circolare.

Successivamente è stata eseguita l'unione delle varie parti e quindi la generazione di alcuni raccordi mancanti. Una volta completate le ultime operazioni è possibile effettuare un'operazione di sottrazione per ricreare la geometria interna del componente e effettuare i controlli finali.

3.2.6 Verifica assemblaggio e performance elettromagnetica

Si verifica la possibilità di montaggio, ovvero si controlla che ci sia abbastanza spazio per i bulloni che andranno inseriti. Per fare ciò si crea un assieme (figura 3.26) inserendo nei punti critici i dadi previsti e si controlla che non ci siano interferenze. Si verifica il montaggio con dadi DIN934 M3 e DIN934 UNC4-40.

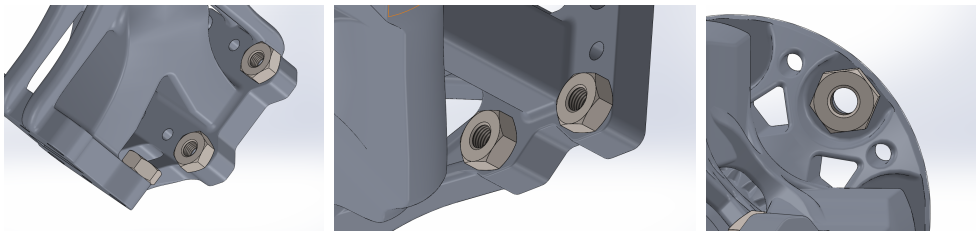

Figura 3.26: Dettaglio del montaggio dei dadi

Una simulazione sul comportamento elettromagnetico ha confermato la correttezza della geometria che viene quindi validata.

Il componente finale risulta quindi essere quello mostrato in figura 3.27.

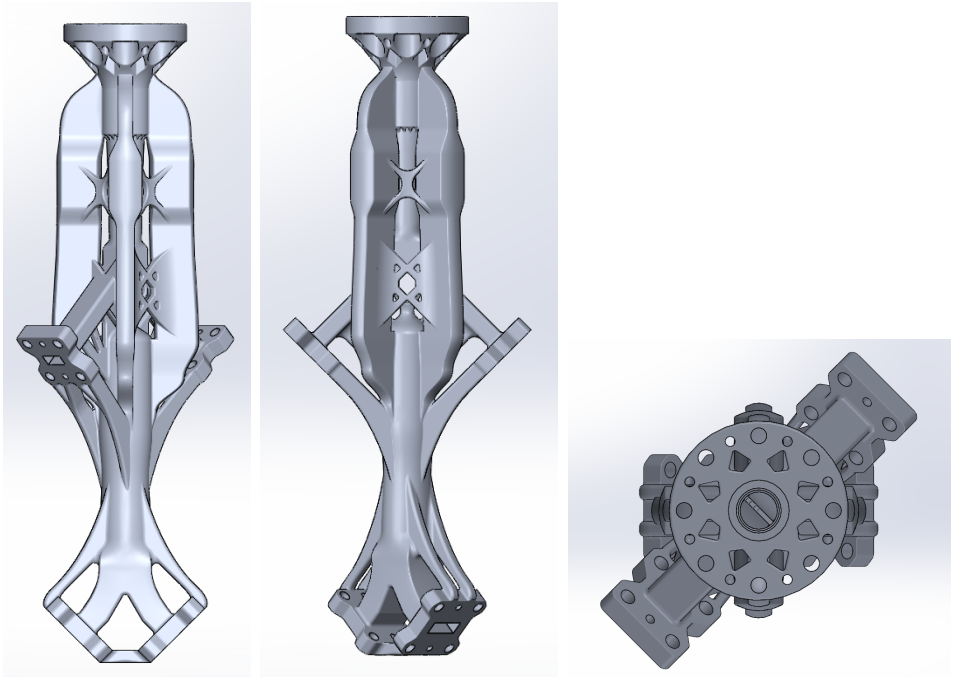

Figura 3.27: Componente finale

L'ingombro è di circa 72,7 × 46,3 × 187,5 mm, la massa 120 g.

3.3 Generazione STL e preparazione del job

Un aspetto importante per la corretta riuscita del componente è la generazione di un corretto file STL.

Ciò significa creare una triangolazione sufficientemente fine da avere una superficie approssimata molto simile a quella teorica, spesso è usato come indice il raggiungimento di una qualità per la quale non sono visibili i triangoli e quindi non saranno presenti nemmeno nel pezzo. Si vuole però evitare di raggiungere dimensioni di file troppo elevate che possono talvolta essere difficilmente gestiti tramite i software di modifica dell'STL, senza portare vantaggio dal punto di vista di qualità superficiale.

Devono essere poi eliminati alcuni problemi tipici dell'STL, tra cui l'intersezione tra triangoli, fori o normali invertite. Questi errori sono gestiti tramite il software

Magics in modo quasi automatico, presenta infatti una serie di algoritmi che permettono di risolvere in successione le diverse problematiche rilevate e produrre un STL valido.

L'esportazione dell'STL da SolidWorks consente la modulazione su due parametri: la deviazione che indica la distanza massima del triangolo rispetto alla geometria ideale e l'angolo che identifica l'angolo tra triangoli adiacenti, in particolare il secondo serve ad affinare i dettagli più piccoli. Si è arrivati a un risultato soddisfacente utilizzando deviazione di 0,01 mm e angolo 5°.

Risulta quindi possibile preparare il job, ovvero, sempre nel software Magics, si inserisce il componente nel formato STL generato precedentemente e si sfruttano gli algoritmi di generazione dei supporti secondo i parametri ottimizzati per la specifica macchina e materiale. Data la necessità di ancorare il componente alla piattaforma di costruzione, vengono inseriti dei supporti alle flange, sia rettangolari che circolare. Si può quindi esportare il file in formato compatibile con il software di costruzione della specifica macchina che provvederà allo slicing e infine all'avvio del job.

3.4 Prototipo

Per verificare la fattibilità della geometria si è prodotto il componente tramite Selective Laser Sintering (SLS), tecnica analoga all'SLM come funzionamento ma che lavora con polveri di polimero termoplastico. Le temperature e le potenze sono inferiori, inoltre non necessita supporti e quindi si hanno difficoltà produttive e di progettazione inferiori. Si verifica che il componente (figura 3.28) rispetta tutti i criteri dell'SLM ed è quindi producibile.

3.5 Modifica del componente

Per consentire la produzione del pezzo si deve abbassare l'altezza in modo da arrivare a circa 180 mm, altezza limite considerando che il volume di lavoro della EOS M270 disponibile è di 250 x 250 x 214 mm, a cui vanno sottratti la tavola su cui è ancorato il pezzo e una distanza minima di 3 mm per i supporti inferiori. Per garantire il funzionamento sono modificabili solo le guide alle estremità, in particolare le rettangolari inferiori e la circolare superiore. Nella parte inferiore non si riesce a ridurre la dimensione garantendo il montaggio, riducendo la lunghezza si avrebbe infatti intersezione dei dadi per il fissaggio delle flange. Si effettua quindi un'abbassamento del pezzo accorciando il tubo superiore, con conseguente spostamento della flangia circolare. Si effettua una leggera variazione nel design del fori di alleggerimento per consentire una distribuzione più omogenea del materiale (figura 3.29).

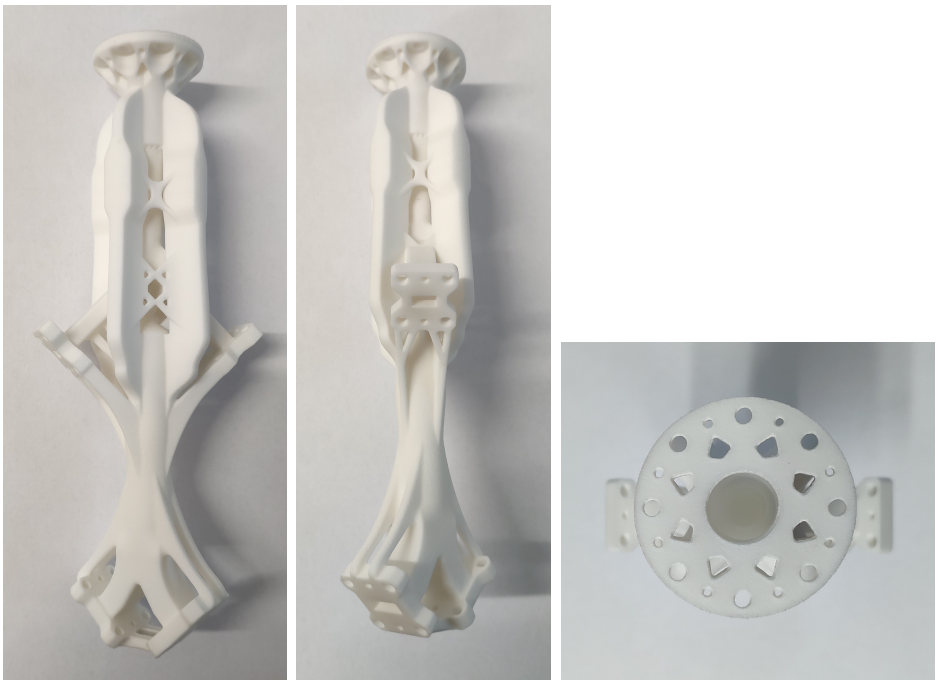

Figura 3.28: Prototipo prodotto tramite SLS

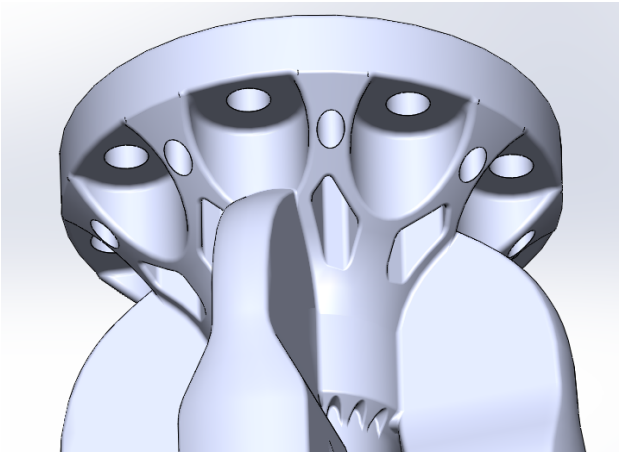

Figura 3.29: Flangia superiore modificata

Il componente finale (figura 3.30) ha ingombro di circa 72,7 × 46,3 × 180,5 mm e massa 118 g.

Si può quindi generare il file STL con le specifiche sopra evidenziate e procedere con gli step successivi.

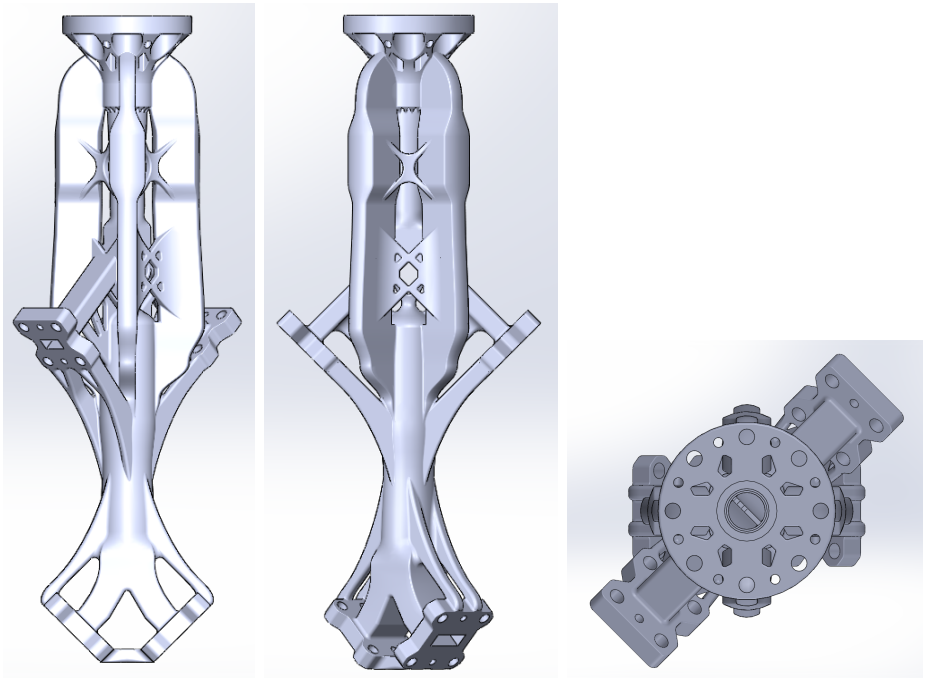

Figura 3.30: Componente finale abbassato

3.6 Descrizione processo produttivo

Dopo aver ottenuto il file STL con i supporti il processo produttivo può essere sintetizzato come:

- Elaborazione con il software del produttore per effettuare slicing;
- Costruzione del componente;
- Rimozione della polvere;
- Trattamento termico di distensione per ridurre le tensioni residue;
- Rimozione dei componenti dalla tavola e rimozione dei supporti;
- Pallinatura per rimuovere le polveri adese e migliorare ove possibile la qualità superficiale;
- Lucidatura manuale delle flange.

Capitolo 4

Conclusioni

Allo stato attuale la fabbricazione additiva ha una qualità superficiale e un'accuratezza che consentono la produzione di dispositivi che lavorano a 20-30 GHz, ovvero in banda K-Ka. Di grande interesse sono i sistemi per il metallo che consentono di produrre in materiale definitivo un componente finito, evitando processi di placcatura o metallizzazione. In particolare si ritiene che la tecnica selective laser melting (SLM) con AlSi10Mg risulti il miglior compromesso tra precisione e proprietà elettromagnetiche.

L'alta flessibilità geometrica e la possibilità di produrre superfici interne complesse sono gli aspetti chiave per l'ambito dei sistemi a microonde, consentendo:

- Riduzione di peso e volume;
- Integrazione di componenti;
- Riduzione delle operazioni di assemblaggio;
- Riduzione di costi e tempi;
- Riduzione di passive intermodulation products.

Questi aspetti combinati consentono lo sviluppo di nuovi dispositivi e quindi di migliorare sistemi di telecomunicazione.

Nel presente elaborato si analizza un antenna feed-chain progettato per essere prodotto come un singolo pezzo con conseguente applicazione dei vantaggi sopra elencati. Si tratta di un componente di interesse poiché di solito è prodotto come assieme di molte parti con conseguenti criticità e difetti, significativamente riducibili tramite fabbricazione additiva. Si ottiene così un pezzo molto più leggero e compatto rispetto a quelli tradizionali.

È importante una corretta progettazione dal punto di vista elettromagnetico, infatti già per definire la geometria della cavità è essenziale considerare direzione di costruzione e angoli limite per evitare supporti, visto che non è possibile accedere ovunque con utensili. Inoltre è utile verificare che il design sia robusto e che garantisca il corretto funzionamento anche con variazioni geometriche tipiche degli errori dell'SLM.

Data la geometria interna la ricostruzione della struttura è stata eseguita sfruttando i criteri del design for additive manufacutring DFAM. Per mantenere il peso contenuto e ridurre le concentrazioni di materiale, che possono causare deformazioni, invece di usare strutture piene sono usati dei rinforzi interni, favorendo strutture non rimovibili a supporti da asportare. Tali rinforzi sono sottili strutture autosupportanti che bloccano relativamente le varie parti del componente per prevenire deformazione. Supporti di tipo block sono usati per rendere più stabile la struttura e sono applicati solo a superfici da lavorare o inevitabilmente orizzontali.

Visto il grande interesse per la fabbricazione additiva, si prospetta un miglioramento delle varie tecnologie e quindi miglioramento della qualità dei prodotti e riduzione dei tempi di produzione. Oltre a questo aspetto ci sarà, come sta avvenendo, lo sviluppo di software di simulazione dedicati che consentiranno di velocizzare e semplificare la fase di progettazione, contribuendo a consolidare applicazioni come quella presentata in questo elaborato.

Bibliografia

[1] Mike Ayre. *Design guidelines for DMLS*. 2015. URL: https://www.crucibledesign.co.uk/guides/ (citato alle pagine 20–25).

[2] Paul Booth e Elena Valles Lluch. "Enhancing the Performance of Waveguide Filters Using Additive Manufacturing". In: *Proceedings of the IEEE* 105.4 (2017) (citato a pagina 14).

[3] Flaviana Calignano. *Design optimization of supports for overhanging structures in aluminum and titanium alloys by selective laser melting*. Rapporto tecnico. IIT, 2014 (citato alle pagine 21, 26).

[4] Flaviana Calignano et al. "Overview on Additive Manufacturing Technologies". In: *Proceedings of the IEEE* 105.4 (2017) (citato a pagina 9).

[5] EOS. URL: https://www.eos.info/ (citato a pagina 14).

[6] Ian Gibson, David Rosen e Brent Stucker. *Additive Manufacturing Technologies*. Springer, 2015 (citato alle pagine 8, 10).

[7] J. Kranz, D. Herzog e C. Emmelmann. "Design guidelines for laser additive manufacturing of lightweight structures in TiAl6V4". In: *Journal of laser applications* (2015) (citato a pagina 44).

[8] Jeff Maas, Bosui Liu, Shloke Hajela, Yilei Huang, Xun Gong e William J. Chappell. "Laser-Based Layer-by-Layer Polymer Stereolithography for High-Frequency Applications". In: *Proceedings of the IEEE* 105.4 (2017) (citato a pagina 9).

[9] Oscar A. Paverini et al. "Manufacturing of Waveguide Components for SatCom through Selective Laser Melting". In: *11th European Conference on Antennas and Propagation* (2017) (citato a pagina 12).

[10] Oscar A. Peverini, Giuseppe Addamo, Mauro Lumia, Giuseppe Virone, Diego Manfredi, Flaviana Calignano, Massimo Lorusso e Elisa Paola Ambrosio. "Selective Laser Melting Manufacturing of Microwave Waveguide Devices". In: *Proceedings of the IEEE* 105.4 (2017) (citato alle pagine 2, 5, 17).

[11] Oscar A. Peverini, Giuseppe Addamo, Mauro Lumia, Giuseppe Virone, Riccardo Tascone, Diego Manfredi e Flaviana Calignano. "Additive Manufacturing of Antenna-Feed Chains". In: *IEEE MTT-S International Microwave*

Workshop Series on Advanced Materials and Processes (2017) (citato alle pagine 13, 14, 29, 30).

[12] Oscar A. Peverini, Giuseppe Addamo, Mauro Lumia, Giuseppe Virone, Riccardo Tascone, Diego Manfredi e Flaviana Calignano. "Experimental Research Activity on Additive Manufacturing of Microwave Passive Waveguide Components". In: *Proceedings of the 47th European Microwave Conference* (2017) (citato a pagina 12).

[13] Oscar A. Peverini, Giuseppe Addamo, Mauro Lumia, Giuseppe Virone, Riccardo Tascone, Diego Manfredi, Flaviana Calignano, F. Paonessa e G. Cattano. "Integration of an H-Plane Bend, a Twist, and a Filter in Ku/K-Band Through Additive Manufacturing". In: *IEEE Transactions on microwave theory and techniques* 66.5 (2018) (citato a pagina 15).

[14] Oscar A. Peverini, Giuseppe Virone, Riccardo Tascone e Giuseppe Addamo. "Passive Microwave Feed-Chains for High-Capacity Satellite Communications Systems". In: *Advances in Satellite Communications*. A cura di Dr. Masoumeh Karimi (Ed.) InTech, 2011. ISBN: 978-953-307-562-4 (citato a pagina 2).

[15] "9 - Waveguides and Shields". In: *Electromagnetics Explained*. A cura di Ron Schmitt. EDN Series for Design Engineers. Burlington: Newnes, 2002, pagine 181 –207. ISBN: 978-0-7506-7403-4. DOI: https://doi.org/10.1016/B978-075067403-4/50010-0. URL: http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/B9780750674034500100 (citato a pagina 2).

[16] Quinstar Technology. URL: https://quinstar.com/ (citato a pagina 3).

[17] Bing Zhang, Yong-Xin Guo, Herbert Zirath e Yue Ping Zhang. "Investigation on 3-D-Printing Technologies for Millimeter-Wave and Terahertz Applications". In: *Proceedings of the IEEE* 105.4 (2017) (citato alle pagine 4, 9, 11, 12, 15).