



UNIVERSITA' POLITECNICA DELLE MARCHE

FACOLTA' DI INGEGNERIA

Corso di Laurea triennale in **ingegneria meccanica**

**PROGETTO ED OTTIMIZZAZIONE TOPOLOGICA DI UNALENTE ACUSTICA
REALIZZATA IN ADDITIVE MANUFACTURING**

**DESIGN AND TOPOLOGY OPTIMIZATION OF AN ACOUSTIC LENS REALIZED IN
ADDITIVE MANUFACTURING**

Relatore: Chiar.mo

Prof. **Castellini Paolo**

Tesi di Laurea di:

Ciaffoni Giovanni

A.A. 2019 / 2020

Sommario

Introduzione	4
1. Materiali e metodi	6
1.1. Acustica e studio in frequenza	6
1.1.1. Cos'è un'onda	6
1.1.2. Dominio della frequenza	8
1.1.3. Riflessione e trasmissione	9
1.1.4. Interferenza e diffrazione	10
1.2 Ottimizzazione Topologica	11
1.2.1. Ottimizzazione topologica meccanica	11
1.2.2. Ottimizzazione topologica acustica	12
1.2.3. Density method	14
1.2.4. Shape optimization.....	16
1.3. Usuali tecnologie di additive manufacturing	18
2. Metodo di ricerca usato	22
2.1. Realizzazione del modello con Comsol Multiphysics	22
2.2. Ottimizzazione topologica, density method	24
2.3. Estensione dello studio con Matlab	26
2.4. Ottimizzazione topologica di forma	28
2.5. Stampa del prototipo	31
3 . Conclusioni	34
3.1. Discussione dei dati ottenuti.....	34
3.2. Limiti della ricerca	35
Bibliografia	36
Indice delle immagini	38

Introduzione

Alla base dello studio presentato in questo elaborato vi è il progetto di una lente acustica sottoposta ad ottimizzazione topologica per densità e forma; il modello ottenuto sarà poi stampato grazie a tecnologie di manifattura additiva (AM).

L'analisi e lo sviluppo di questo progetto sono frutto di un'esperienza formativa presso il Dipartimento di Ingegneria Industriale e Scienze Matematiche (DIISM) della sede di Ancona dell'Università Politecnica delle Marche.

Le motivazioni dietro la scelta di questa ricerca sono da ricondurre a curiosità personali nate man mano affrontando l'intero percorso di studi: l'interesse nei confronti della sempre più innovativa tecnologia di additive manufacturing mi ha portato a trovare entusiasmante l'esperienza di tirocinio vissuta.

L'obiettivo del lavoro svolto è stato quello di migliorare l'efficienza di una lente acustica, massimizzando la pressione acustica nel punto di focalizzazione; questo progetto è stato realizzato tramite ottimizzazione topologica acustica grazie all'utilizzo del software di analisi agli elementi finiti Comsol Multiphysics.

La tesi è articolata in 3 capitoli: nel primo vengono presentati in maniera completa e sintetica richiami di teoria necessari alla comprensione del progetto di ricerca, dallo studio delle onde acustiche ad un'introduzione al concetto di ottimizzazione topologica acustica, per poi concludere con una presentazione di alcune tecnologie di stampa additiva. Nel secondo capitolo viene presentato il metodo con cui è stato condotto il progetto di ricerca fino all'ottenimento del modello, da stampare poi alla macchina di AM. Nel terzo e ultimo capitolo vengono avanzate delle conclusioni in merito ai dati ottenuti tramite una loro discussione, arricchita poi da una relazione sui limiti della ricerca.

Questo elaborato mostra l'utilità dell'ottimizzazione topologica nel progetto e ne porta a favore dati numerici e grafici, dimostrando quanto questa tecnica sia uno strumento fondamentale per il progettista, sia per la sua versatilità che per la concretezza dei risultati.

1. Materiali e metodi

1.1. Acustica e studio in frequenza

1.1.1. Cos'è un'onda

Un'onda è definita come una perturbazione della materia da una condizione preesistente, il cui moto consiste nel trasferimento di segnali da un punto all'altro dello spazio. In base alla sorgente e alla loro natura si definiscono diversi tipi di onde: dalle ben note onde meccaniche, come le onde sismiche, alle onde sonore, come quelle generate da un amplificatore o da un qualsiasi strumento musicale. In ogni caso un'onda ha bisogno di un mezzo materiale attraverso il quale propagarsi, fluido o solido che esso sia. Dall'osservazione del moto del mezzo si può definire un'onda come una vibrazione delle particelle della materia. [1]

È utile rappresentare quest'oscillazione su di un piano cartesiano, nei cui assi delle ascisse e ordinate si trovano, rispettivamente, il tempo e lo spostamento della particella.

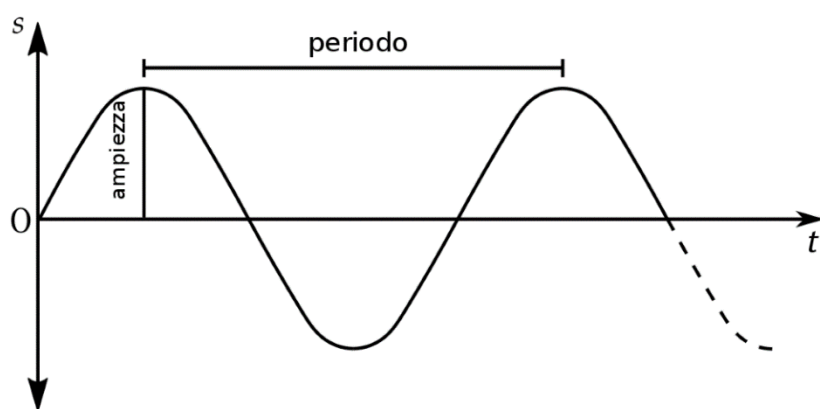


Fig.1.1. Rappresentazione grafica di un'onda nel dominio del tempo [1]

Da questa analisi si possono determinare vari indicatori, come il periodo, cioè il tempo che impiega la particella a compiere un'oscillazione completa, espresso in secondi; la distanza

percorsa, invece, è la lunghezza d'onda, definita anche come la distanza fra due creste nel profilo spaziale dell'onda stessa. Un'altra caratteristica di un'onda è l'ampiezza, la distanza, cioè, tra la cresta e l'asse delle ascisse e si misura in metri (o nei suoi sottomultipli). Da questi valori principali se ne possono ricavare molti altri, come la frequenza, data dal reciproco del periodo, la cui unità di misura è s^{-1} , ovvero Hz, la pressione acustica, cioè l'ampiezza della dell'onda di pressione, espressa in Pascal o più comunemente in Decibel.

Dallo studio di questi valori si definiscono due tipi di onde: quelle periodiche, definite da frequenza costante e dalla legge $y(t) = A(\omega t + \varphi)$, in cui $y(t)$ è l'entità del segnale, A è l'ampiezza, ω è la frequenza e φ la fase, e quelle aperiodiche, o casuali, che non seguono una legge del moto precisa. Le prime sono quelle emesse da una sorgente fissa, come un diapason, le seconde sono associate al concetto di rumore.

Un'ulteriore caratterizzazione delle onde ci è data dal tipo di sorgente, la quale ci permette di classificare onde piane, cilindriche e sferiche. Le prime si muovono in una sola direzione e i fronti d'onda sono tutti paralleli tra loro, le seconde sono caratterizzate da fronti d'onda cilindrici e viaggiano in 2 dimensioni, mentre le ultime si spostano nelle 3 dimensioni dello spazio e i fronti d'onda sono rappresentati da sfere concentriche divergenti da un punto.

1.1.2. Dominio della frequenza

Spesso è utile ricorrere ad un altro tipo di rappresentazione, anch'essa di tipo cartesiano, sul cui asse delle ascisse non è più indicato il tempo, ma la frequenza. Tramite l'analisi di Fourier è possibile, infatti, trasformare un segnale dal dominio del tempo a quello della frequenza. Da considerazioni fatte precedentemente si possono trarre subito delle utili osservazioni: avendo definito le onde periodiche come segnali la cui frequenza è costante, è facile intuire che le stesse, nel dominio in frequenza, sono caratterizzate da una linea verticale alla frequenza data. Un segnale casuale, o random, è un segnale composto da un ampio spettro in frequenza e perciò è rappresentato da una linea orizzontale del dominio in frequenza.

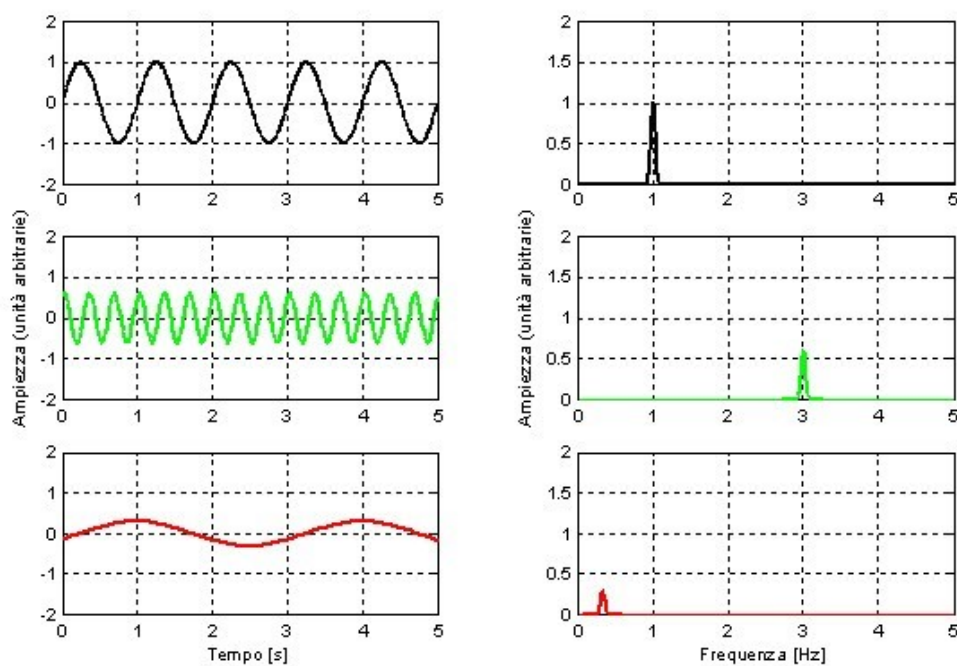


Fig.1.2. Rappresentazione nel dominio del tempo e in frequenza di onde a differenti frequenze [2]

In generale studiare un'onda nel dominio in frequenza permette un'analisi più immediata del segnale nelle sue componenti armoniche.

Nello studio di un'onda nel dominio del tempo la fase è definita come la frazione di periodo trascorsa rispetto ad un tempo fissato, o più semplicemente come il ritardo dell'onda stessa. Nel passaggio da dominio del tempo a quello della frequenza la fase è rappresentata come angolo e viene rappresentata in un grafico differente da quello dell'ampiezza.

1.1.3. Riflessione e trasmissione

Ponendosi in un'ottica prettamente geometrica è possibile affermare che un'onda viaggia in linea retta; ciò porta all'introduzione dei concetti di riflessione e trasmissione. Si definisce la riflessione come il fenomeno per cui una parte di onda incidente una superficie tra due mezzi viene deviata e riflessa, come nel caso di un fascio di luce che colpisce uno specchio. La trasmissione, invece, riguarda la parte che, nelle condizioni precedenti, attraversa l'interfaccia pur venendo debolmente deviata.

Valutare questi fenomeni su un'interfaccia fra due fluidi ideali è possibile grazie ai coefficienti di trasmissione T e riflessione R ; definite le pressioni dell'onda incidente, riflessa e trasmessa, p_i , p_r e p_t rispettivamente, il calcolo dei coefficienti sarà

$$R = p_r/p_i \quad T = p_t/p_i$$

Le espressioni di R e T richiedono che la pressione su ogni parte dell'interfaccia sia la stessa e, quindi, che valga l'equazione $p_t = p_i + p_r$, da cui, dividendo per la pressione incidente si ricava $T = 1 + R$. [2]

1.1.4. Interferenza e diffrazione

Uno studio più approfondito suggerisce un'ottica ondulatoria: osservando un'onda da più vicino si nota che non si propaga in linea retta, bensì il suo fronte d'onda cambia forma nell'interazione con la materia. Tutti i fenomeni di tipo ondulatorio possono essere ricondotti ai concetti di interferenza e diffrazione: la prima condizione si verifica nel caso di sovrapposizione di onde generate da singole sorgenti puntiformi (come nella formazione di arcobaleni), la seconda è scaturita dalla sovrapposizione di onde generate da sorgenti continue estese (come nella formazione di onde marine in presenza di scogli).

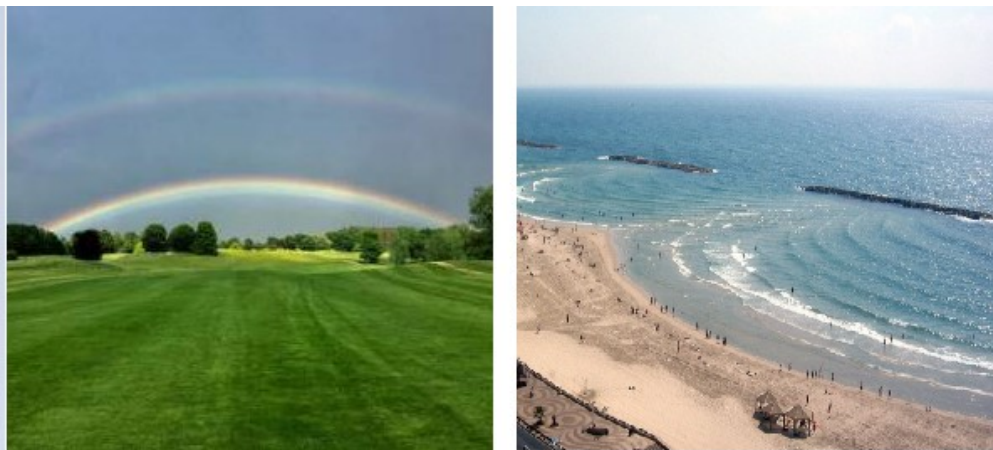


Fig.1.3. Fenomeni di interferenza e diffrazione a confronto [3]

Nel caso di diffrazione quando le onde incontrano un ostacolo sul proprio cammino tendono ad oltrepassarlo, modificando ampiezza e fase dei fronti d'onda; in queste condizioni si dice che l'onda viene diffratta dall'ostacolo.

Il fenomeno della diffrazione avviene con onde di qualsiasi natura (acustiche, elastiche, elettromagnetiche, ecc.). La diffrazione è più evidente quando la lunghezza d'onda incidente sull'ostacolo è confrontabile con le dimensioni dell'ostacolo stesso.

In entrambi i casi è importante precisare che l'intensità risultante è diversa dalla somma delle intensità delle singole onde interagenti. [3]

1.2 Ottimizzazione Topologica

1.2.1. Ottimizzazione topologica meccanica

L'ottimizzazione topologica è un complesso di tecniche basate sull'utilizzo di software di modellazione e simulazione mediante il quale, partendo da componenti di forma generica semplice e nota, si mira a modificarne il volume e la distribuzione di materia, migliorando le performance degli stessi. L'ottimizzazione topologica è incentrata sullo studio agli elementi finiti di un modello ed è in grado di ridefinirne la forma tramite sottrazione di materiale in base a ben determinate funzioni obiettivo definite in modo accurato; come risultato il pezzo presenterà migliori qualità e una riduzione del proprio peso.

Questo metodo è molto flessibile e si adatta a differenti campi, il più comune fra tutti quello meccanico.

L'ottimizzazione topologica si compone di diverse fasi: si parte da un modello 3D realizzato su un software, si individuano le zone che saranno oggetto di studio e si impongono le condizioni per cui è stato progettato il componente (nel caso meccanico sarà un insieme di forze, momenti e vincoli); a questo punto si ricorre ad analisi FEM iterative, che permettono di prevedere il comportamento del sistema e di calcolarne la risposta. Sulla base dei risultati ottenuti il software si occuperà di rimuovere il materiale in eccesso, impiegando degli algoritmi detti di penalizzazione, in accordo con le tecnologie di produzione del pezzo.

I vantaggi di questa strategia sono una sensibile riduzione del peso del componente e maggiori qualità strutturali, nonché un'estrema libertà progettuale che trova il massimo del suo rendimento se affiancata alle moderne tecnologie di stampa additiva.

Come è facile intuire i campi di applicazione di questa analisi sono molteplici, dal più comune studio strutturale di un componente meccanico a quello fluidodinamico, o, come nel caso d'interesse di questo documento, quello acustico.

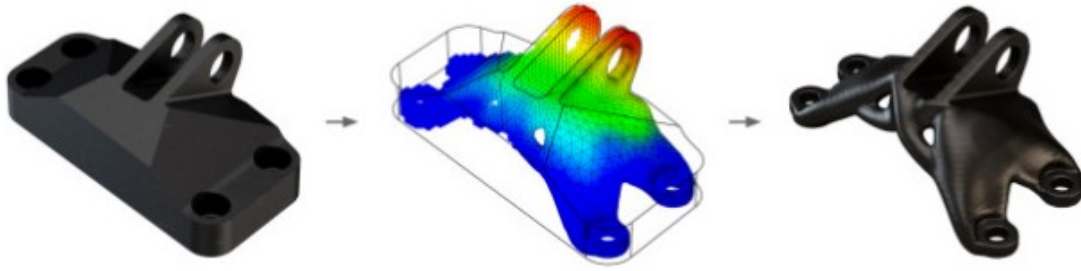


Fig.1.4. Diverse fasi di un'ottimizzazione topologica meccanica [4]

L'ottimizzazione topologica nasce alla fine degli anni ottanta come analisi meccanica strutturale, formulata come un problema di distribuzione di densità, ma poi estesa ad un'ampia gamma di aree di competenza. Molti hanno contribuito al perfezionamento di questa tecnica, ma la sua paternità è stata riconosciuta a ricercatori quali Bendsoe, Kikuchi e Sigmund (1988). [4]

1.2.2. Ottimizzazione topologica acustica

L'ottimizzazione topologica acustica vanta numerosi campi di applicazione, dalla scienza degli strumenti musicali allo sviluppo di sonde acustiche.

Determinato il tipo di studio su cui concentrarsi sono necessarie alcune fasi preliminari: prima di tutto è fondamentale definire una geometria 2D o 3D, che rappresenti fedelmente le condizioni di progetto ed utilizzo. Costruito un dominio Ω è necessario circoscrivere un dominio Ω_d più piccolo, zona in cui si andrà a modificare la distribuzione di materia al fine dell'ottimizzazione; generalmente Ω_d è un sottoinsieme appartenente a Ω , come mostrato in figura 1.5.

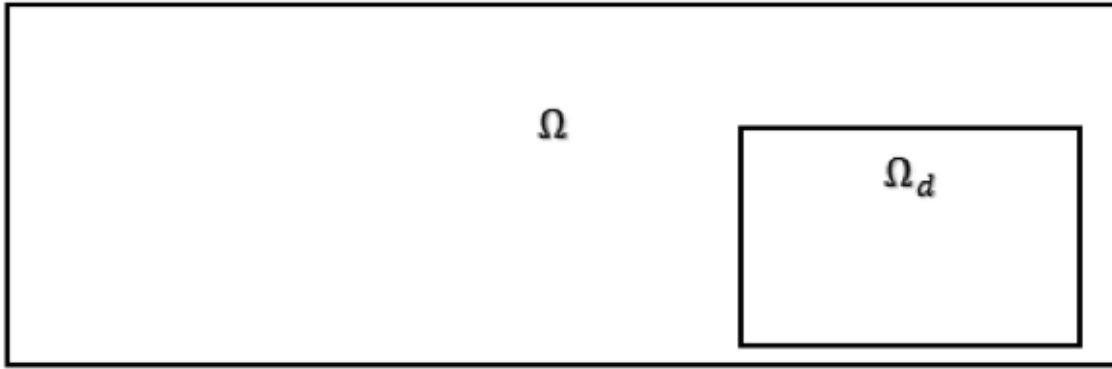


Fig.1.5. Schema del dominio d'interesse dell'ottimizzazione topologica [5]

Un altro step è definire una o più funzioni obiettivo, come per esempio il quadrato dell'ampiezza di un'onda acustica o la sua pressione. Questa fase è molto importante per l'ottimizzazione, perché decide le sorti di tutto il processo. Tipicamente, il vincolo che si introduce in ogni ottimizzazione topologica è quello di minimizzare o massimizzare la funzione obiettivo in un determinato dominio d'interesse. Per quanto riguarda il problema acustico potrebbe essere importante minimizzare il livello di pressione acustica in un determinato dominio, mentre in quello strutturale minimizzare lo stress meccanico in una regione di un componente. [5]

Successivamente si passa a realizzare quella che si chiama *mesh*, una sorta di griglia che può avere forme e dimensioni imposte da progetto, la quale determina un certo numero di nodi: sarà proprio in questi punti che il software andrà a calcolare i valori della funzione obiettivo sulla base della teoria dell'interpolazione. Decidere la densità della mesh non è affatto banale: avere una mesh molto fitta significa avere molti più nodi e quindi più punti in cui il software andrà a risolvere un complesso sistema di equazioni, il che porta a tempi di calcolo lunghi e una maggior mole di dati gestiti, mentre una mesh poco fitta porta a difetti in risoluzione, compromettendo l'efficienza dell'ottimizzazione stessa. Nel caso dell'acustica è bene avere 6-7 elementi di mesh per ogni lunghezza d'onda al fine di ottenere una soluzione accurata del campo acustico.

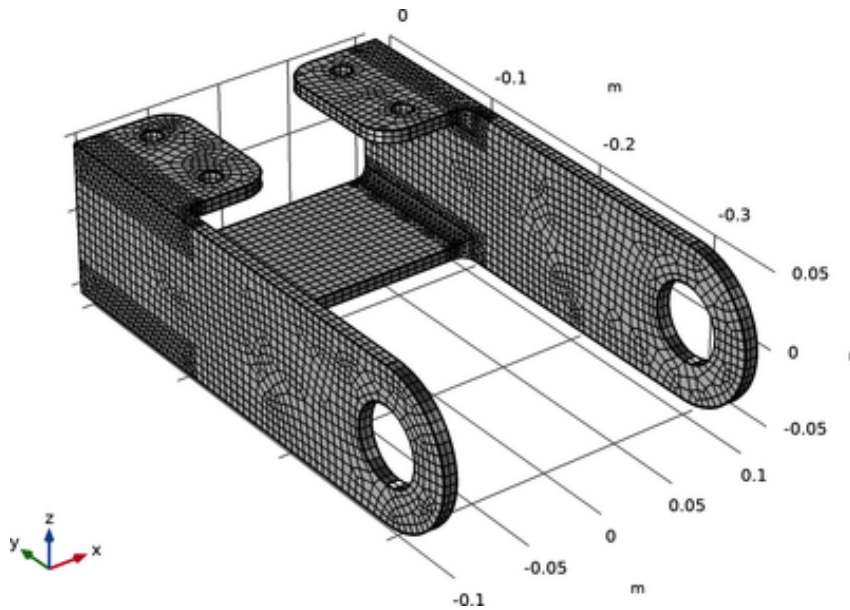


Fig.1.6. Mesh di tipo misto di un componente meccanico 3D [6]

Definiti i materiali e le condizioni di progetto si passa alla vera e propria analisi FEM; l'output di questo processo è un'ottimizzazione della distribuzione di materia nel dominio Ω_d , la quale ci fornisce le migliori condizioni per i vincoli imposti alla funzione obiettivo.

1.2.3. Density method

La teoria dell'ottimizzazione topologica suggerisce diversi approcci a questo tipo di analisi: in questa sezione viene suggerito il cosiddetto "density method", in quanto è quello seguito per la realizzazione del progetto di questo documento.

Considerando questo approccio, il problema relativo all'ottimizzazione topologica è tipicamente risolto discretizzando il dominio in un ampio numero di elementi finiti e lasciando variabile la distribuzione di densità; per far ciò è necessario introdurre delle variabili di progetto che descrivano la presenza o assenza di materiale all'interno del dominio, calcolate su di ognuno dei punti nodali della mesh. Cambiare il valore delle variabili – e quindi la densità nei nodi – significa cambiare la topologia del modello: variando la densità possono apparire o scomparire dei "buchi" all'interno della figura del componente, così come tendono a restringersi i contorni dello stesso.

È importante sottolineare che la matematica dietro all'ottimizzazione topologica è complessa, quindi il software FEM è costretto a compiere un processo di calcolo iterativo fino ad arrivare ad un valore di convergenza.

L'output di questo metodo, però, fornisce solo una distribuzione di materia tra 0 (densità dell'aria) a 1 (densità del materiale del pezzo), la quale è impossibile da realizzare nel pratico; sarà quindi necessario impostare un livello di soglia (compreso tra 0 e 1) grazie al quale è possibile ottenere una geometria ben definita, in codice binario, data dalla sola presenza di materiale o aria. [6]

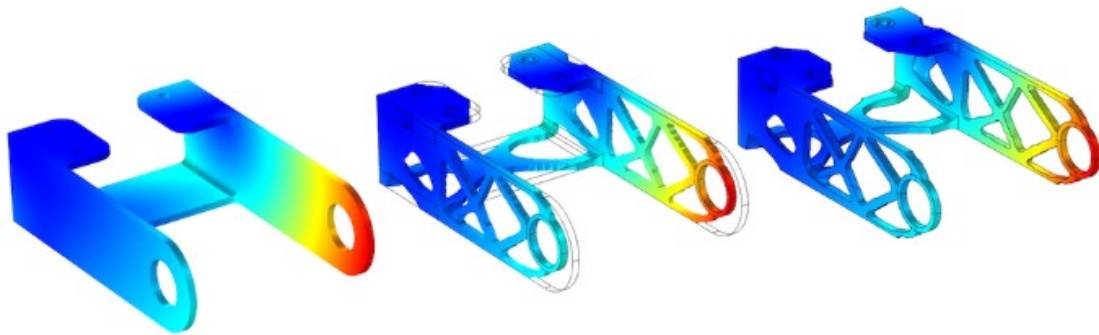


Fig.1.7. Ottimizzazione topologica con il density method [7]

Esistono vari metodi per l'ottimizzazione topologica: un esempio è il SIMP (Simplified Isotropic Material with Penalization) di Bendsøe e Sigmund, definito da due valori. Il primo è il coefficiente "pp", un esponente che indica la penalizzazione nella rimozione di materiale, definito nella seguente formula:

$$E(\rho_i) = \rho_i^{pp} E_0$$

In cui ρ_i è la variabile di densità, E_0 è il modulo di Young del materiale e $E(\rho_i)$ è il modulo di Young equivalente del materiale ottimizzato.

La seconda variabile è il projection sharpness “beta”, che indica la rigidità con cui viene tagliata la sagoma a determinati valori di threshold. Questo termine è legato alla variabile di densità ρ e al livello di threshold η dalla relazione

$$\rho = \frac{\tanh(\beta\eta) + \tanh[\beta(\rho - \eta)]}{\tanh(\beta\eta) + \tanh[\beta(1 - \eta)]}$$

Un altro metodo è il RAMP (Rational Approximation of Material Properties) di Stolpe e Svanberg, caratterizzato invece dal fattore di penalizzazione q , regolato dalla relazione

$$E(\rho_i) = \frac{\rho_i}{1 + q(1 - \rho_i)} E_0$$

L'ultimo passo prevede l'applicazione di 2 filtri: il primo detto di Helmholtz serve per 'ammorbidire' il primo risultato dell'ottimizzazione; il secondo (in cui si usa il coefficiente beta) a definire i bordi.

1.2.4. Shape optimization

Fin qui è stata descritta l'ottimizzazione topologica secondo il density method; in questa sezione viene introdotto un altro approccio, detto “shape optimization” o di forma. Questo metodo è simile al precedente, ma la variabile di ottimizzazione non è più la densità, bensì la sagoma del modello.

L'ottimizzazione topologica di forma è affrontata in generale all'inizio del processo di progettazione e comporta un'alterazione sensibile dell'aspetto dell'oggetto. Le variabili di progetto devono essere scelte con attenzione, dato che l'obiettivo è quello di migliorare la forma senza porre ulteriori vincoli al progetto.

Con questo tipo di ottimizzazione è possibile imporre un valore di deformazione puntuale massima del contorno della geometria, la quale, variando, restituisce ottimizzazioni diverse.

Questo metodo può essere affrontato in più modi, in base alla strategia risolutiva del problema. [7] [8]

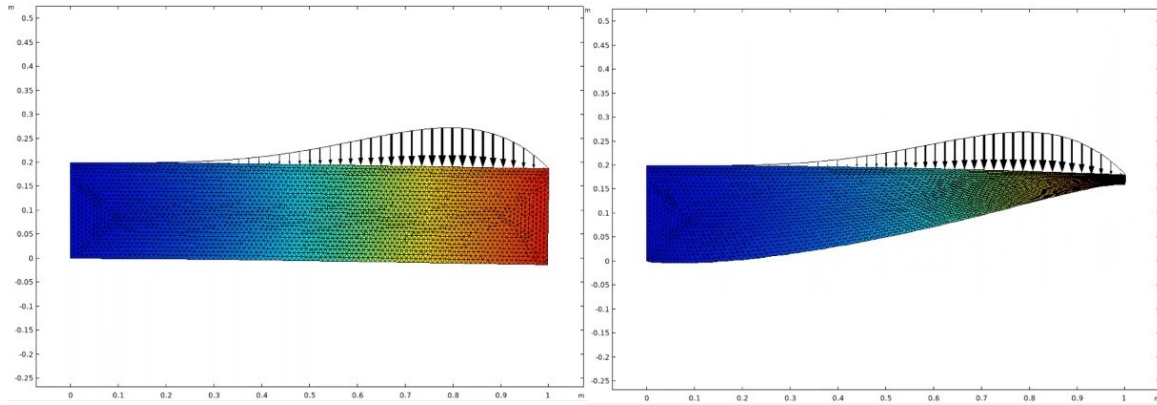


Fig.1.8. Ottimizzazione topologica di forma di un pezzo sottoposto ad un carico distribuito [8]

L'ottimizzazione di forma ha solide basi matematiche e cambiano in base al metodo scelto: in generale si può riassumere il problema di ottimizzazione 2D, una volta definita la funzione obiettivo $J(\Omega)$, con la relazione

$$\text{Min: } J(\Omega) = \int_{\Omega} \frac{1}{2} (\varepsilon^T D \varepsilon) d\Omega$$

Dove ε è il tensore di deformazione e D è la matrice di elasticità del materiale.

Anche questo è un processo iterativo e si conclude quando lo spostamento minimo dei punti del contorno rientra nel valore di deformazione assegnato. In questi casi si dice che l'ottimizzazione converge. [9]

1.3. Usuali tecnologie di additive manufacturing

L'additive manufacturing è una famiglia di tecnologie basate sul principio di funzionamento della stratificazione progressiva di materiale su livelli sovrapposti lungo "l'asse Z" (verso l'alto), al fine di ottenere un oggetto tridimensionale. I singoli strati sovrapposti possono essere generati con diversi metodi, basati sulla tecnologia e sui materiali applicati.

L'additive manufacturing offre numerosi vantaggi nella progettazione e realizzazione di un qualsiasi pezzo: uno degli elementi peculiari di tutte le tecnologie AM è la possibilità di creare, in un unico processo di stampa, oggetti che tradizionalmente sono realizzati in diverse componenti singole, successivamente da assemblare oppure componenti non realizzabili con le tradizionali tecniche di lavorazione.

Ulteriori vantaggi sono dati dall'incredibile libertà di progettazione, dalla riduzione dei costi del materiale, dalla diminuzione degli sfridi e dall'alleggerimento dell'oggetto stampato.

Le varie tecnologie AM si distinguono principalmente in base alla tecnologia utilizzata, al materiale usato, alla finitura superficiale e alle caratteristiche meccaniche del pezzo.

Una delle tecnologie più usate è la Fused Deposition Modeling (FDM), o material extrusion: in questa lavorazione additiva una resina termoplastica malleabile in uno stato semi-solido viene depositata, attraverso un estrusore, su uno strato di materiale sottostante depositato in precedenza. Per conferire rigidità al pezzo in fase di realizzazione è possibile sfruttare un materiale di supporto, per evitare il collasso della struttura. La finitura superficiale è relativamente grezza, data l'evidenza degli strati dei filamenti; necessità quindi di processi successivi come sabbiatura o abrasione chimica.

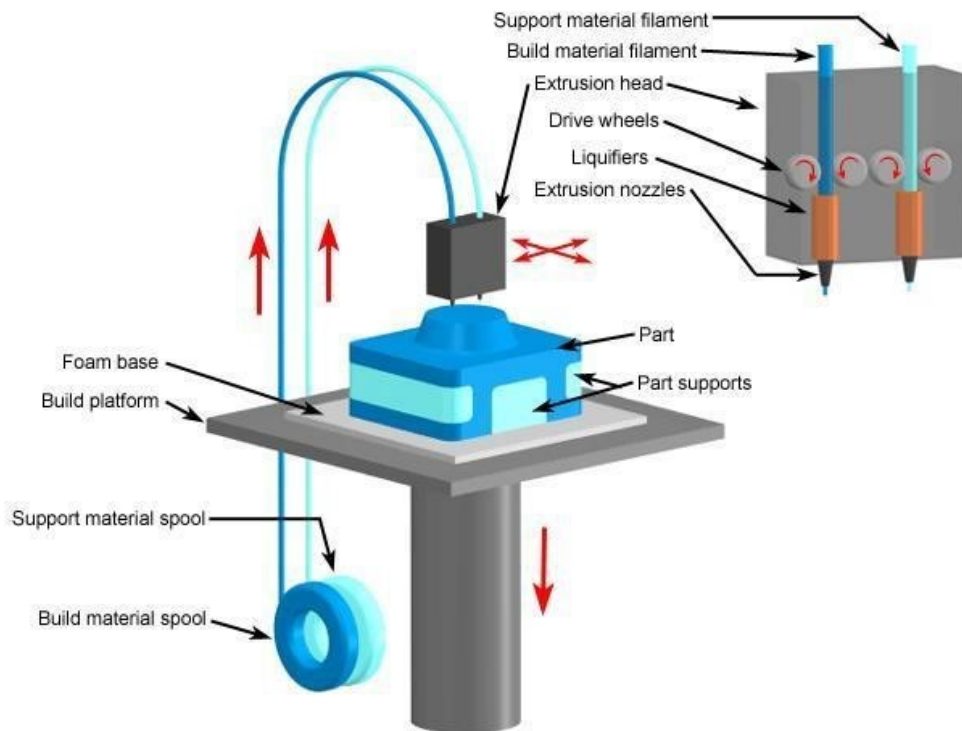


Fig.1.9. Schematizzazione funzionale della Fused Deposition Modeling [9]

Un'altra tecnologia molto usata è la Photopolymer Jetting (Polyjet), in cui il materiale è un fotopolimero attivato da una fonte di luce UV; anche questa tecnologia prevede l'utilizzo di un materiale di supporto, generalmente solubile, così da facilitarne l'eliminazione in fase finale.

Questa tecnica permette una finitura superficiale di buon pregio e, a seconda del materiale, medio/elevate proprietà meccaniche.

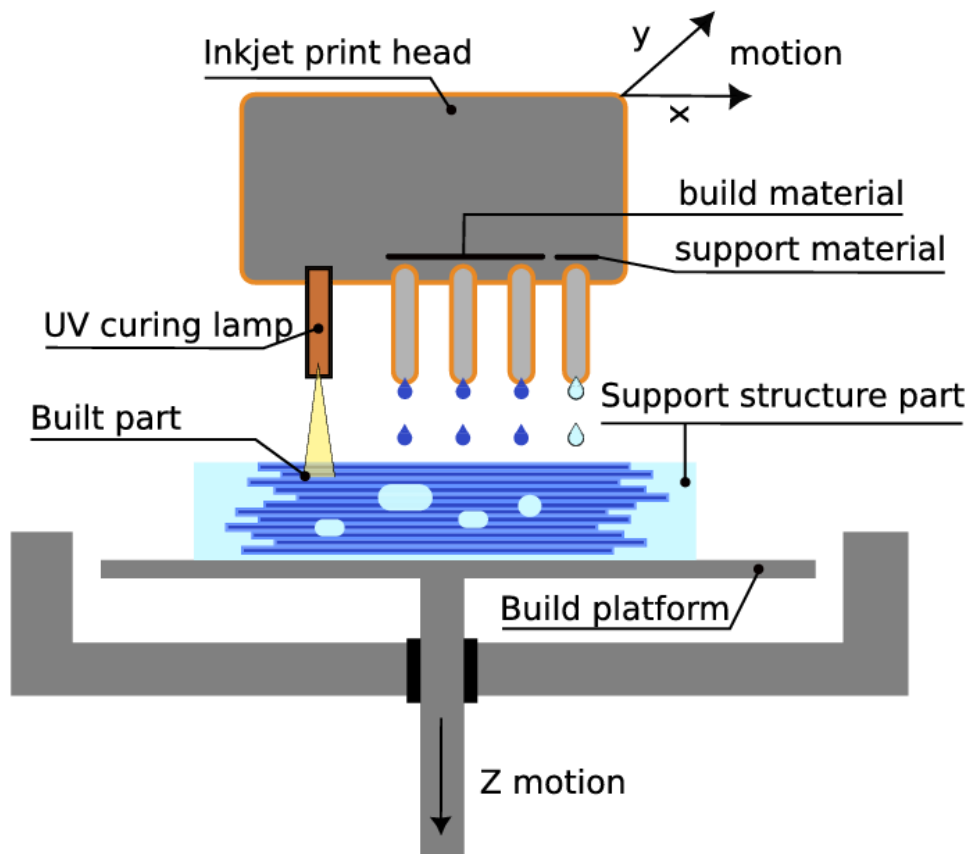


Fig.1.10. Schematizzazione funzionale della Photopolymer Jetting [10]

Un'ultima tecnologia presentata in questo documento è la Powder Bed Fusion, la quale sfrutta energia termica per fondere e solidificare una regione di un letto di polvere, posizionata su un piano mobile in direzione verticale; completato uno strato, la piattaforma mobile si muove verso il basso e un elemento mobile orizzontale deposita nuova polvere per lo strato successivo. La polvere non processata viene recuperata e riutilizzata.

Questo processo è molto versatile perché permette la realizzazione di pezzi con diversi materiali, quali polimeri come Nylon, HDPE o PLA, oppure metalli come Acciaio, alluminio o titanio. [10]

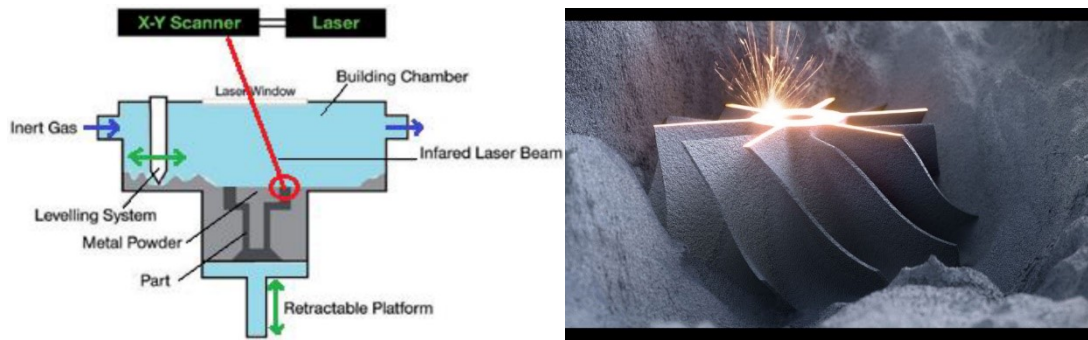


Fig.1.11. Schema di funzionamento della Powder bed fusion e pezzo finito [11]

2. Metodo di ricerca usato

2.1. Realizzazione del modello con Comsol Multiphysics

Il progetto di ricerca è consistito nell'ottimizzazione topologica di una lente acustica tramite il software Comsol Multiphysics; per fare ciò è stato necessario prima di tutto costruire il modello della lente. Per la sua realizzazione si è optato per una struttura rettangolare (1), la quale è stata la zona interessata da ottimizzazione topologica. La lente acustica è stata progettata per focalizzare la pressione dell'onda acustica proveniente dal basso in una zona ristretta (2), detta "spot". A racchiudere il tutto è stata costruita una struttura semicircolare, al cui esterno (3) si è reso necessario porre una condizione di PML (perfectly matched layer), ovvero una zona che simulasse la condizione di contorno e assorbimento delle onde, necessaria nel metodo agli elementi finiti.

Per semplicità il modello è stato realizzato solo per metà, vista la sua specularità, e viene proposto in figura 2.1.

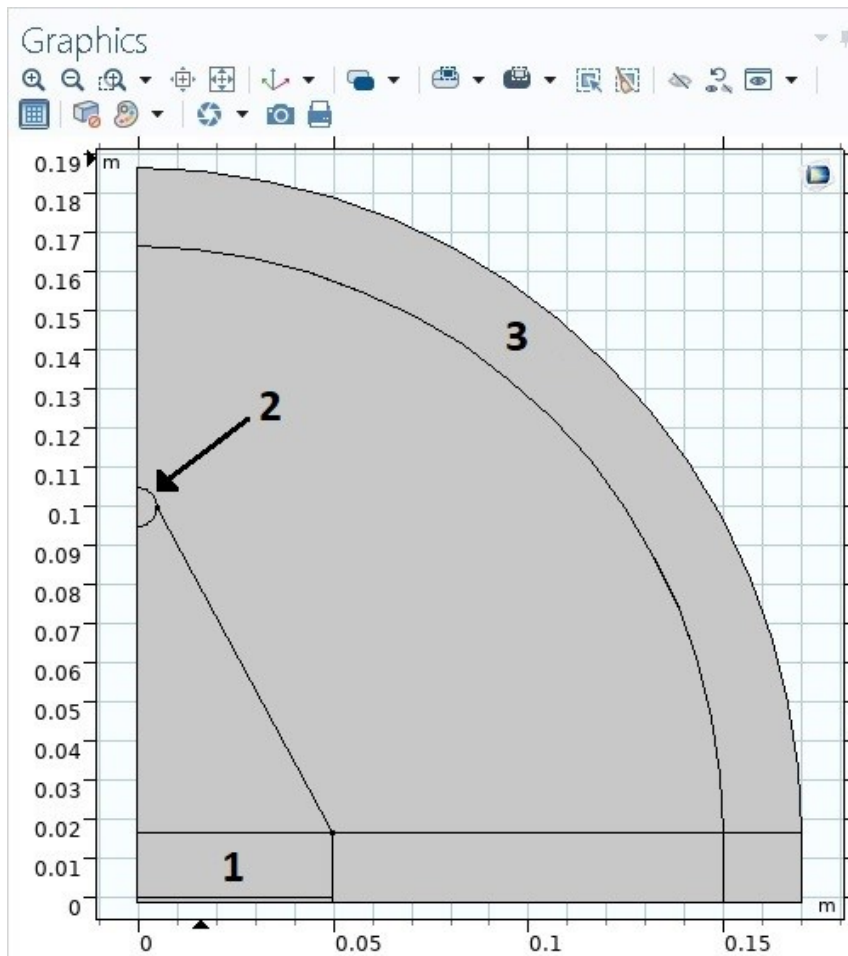


Fig.2.1. Disegno iniziale del modello su Comsol

Una volta costruita la geometria sono state definite le condizioni di funzionamento della lente: per la frequenza dell'onda piana incidente si è scelto il valore di 25kHz (f_0), con una fisica "ideale", ovvero in assenza di perdite termoviscose.

È stato necessario anche definire le proprietà dei materiali necessarie per il calcolo del modello: per la regione 1 viene impiegato PLA (acido polilattico), un tipico materiale impiegato nell'additive manufacturing di tipo FDM; nel resto del dominio è presente aria.

2.2. Ottimizzazione topologica, density method

Ultimata la preparazione del modello, introducendo tutte le variabili del caso, si è passati alla prima ottimizzazione topologica. Per questo processo si è optato per il cosiddetto approccio del “density method”: lasciando variare, infatti, la variabile di densità all’interno della regione 1 e imponendo le varie funzioni obiettivo, il software ha restituito una geometria con una distribuzione di densità davvero complessa.

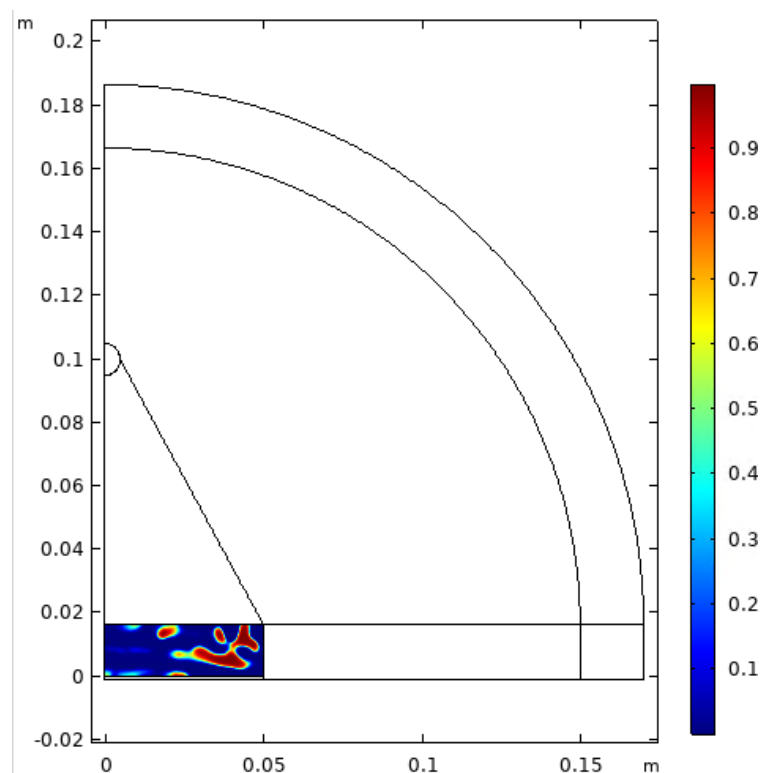


Fig.2.2. Ottimizzazione topologica della lente

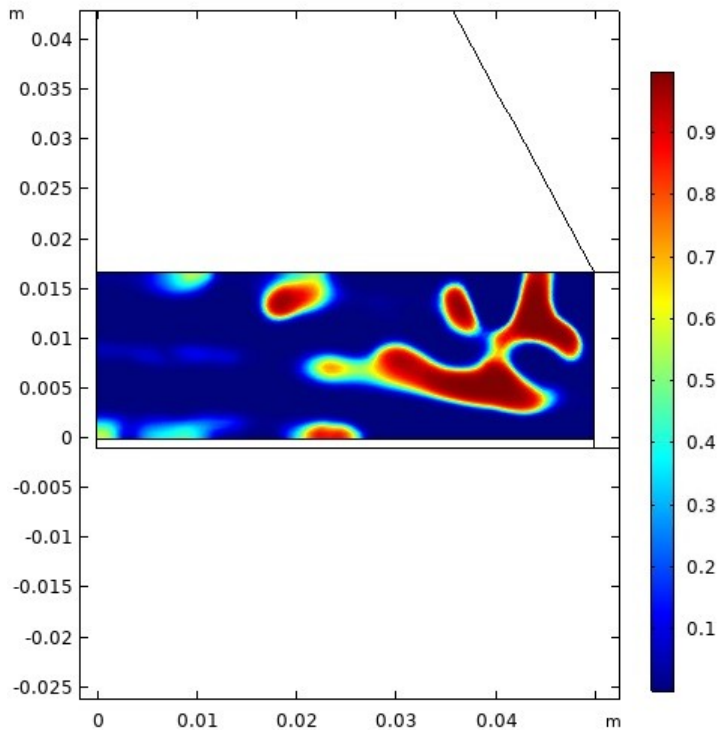


Fig.2.3. Dettaglio della lente ottimizzata con il density method

Le figure 2.2 e 2.3 mostrano come la distribuzione di materiale sia non omogenea all'interno della regione 1, in cui la variabile di densità assume puntualmente valori compresi tra 0 e 1, corrispondenti alla densità dell'aria e del PLA, rispettivamente.

Il problema di questo metodo è che restituisce una geometria ben ottimizzata, ma impossibile da stampare o più in generale da realizzare, proprio per la sua densità variabile; è necessario, quindi, introdurre un filtro col quale si possa imporre un livello del suddetto valore, al fine di ottenere un modello composto da soli aria e PLA. Questo valore di soglia è detto "threshold".

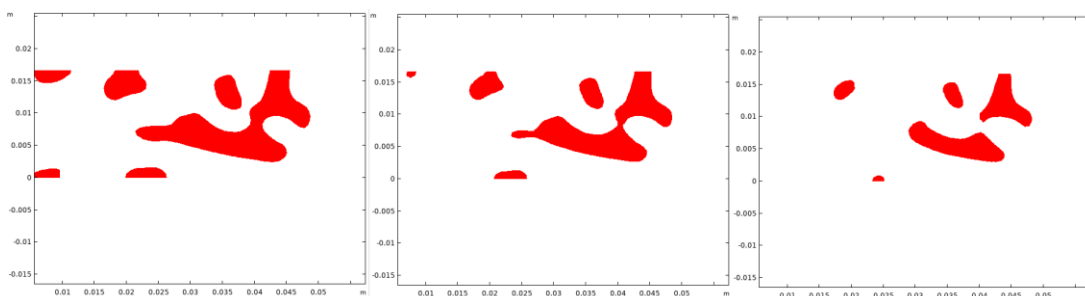


Fig.2.4. Variazione della geometria del modello al variare del threshold

Per condurre uno studio il più accurato possibile sono state prese in considerazione anche altre variabili derivanti dalla teoria dell'approccio SIMP: la prima è il coefficiente "pp", un esponente che indica la penalizzazione nella rimozione di materiale, il quale in questo studio assume i valori di 2,3,4 e 5.

La seconda variabile è il projection sharpness "beta", la quale indica la rigidità con cui viene tagliata la sagoma e nel progetto varia tra 4, 8, 12 e 16. [11]

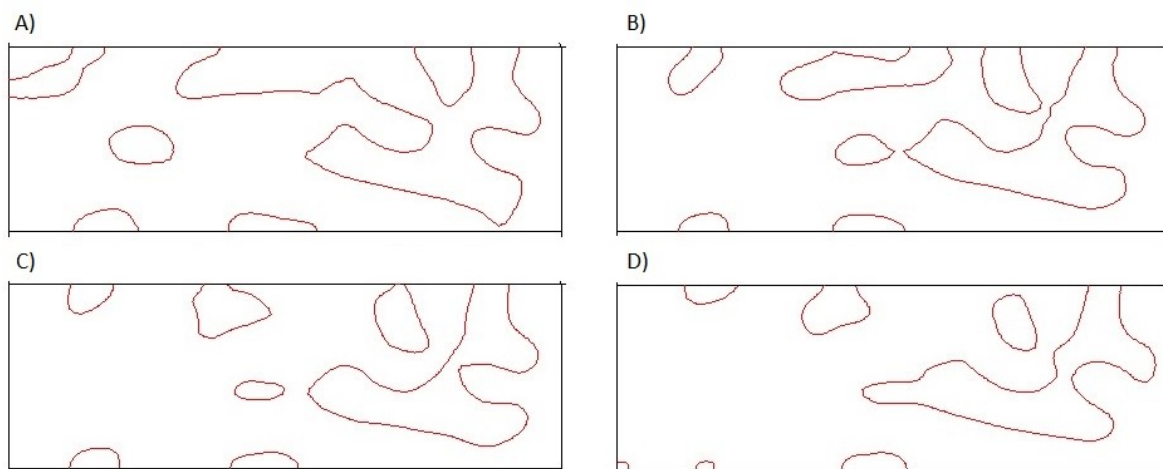


Fig.2.5. Esempio di geometrie con stesso valore di threshold e differenti valori di pp e beta

A) pp = 2, beta = 4; B) pp = 3, beta = 8; C) pp = 4, beta = 12; D) pp = 5, beta = 16

2.3. Estensione dello studio con Matlab

A questo punto del progetto è stato fondamentale capire quale fosse il miglior valore di threshold, quello, cioè, in grado di restituire la geometria con la miglior focalizzazione per le condizioni di utilizzo della lente. Dopo un'attenta osservazione si è deciso di selezionare più geometrie, date da valori di soglia compresi tra 0.40 e 0.60, e di esportarle nel software Matlab. Su questo programma è stato possibile realizzare un codice complesso che ha permesso uno studio più completo. Innanzitutto, si è deciso di condurre lo studio in maniera più estesa, non considerando soltanto la frequenza di funzionamento imposta f_0 (25 kHz), ma di studiare il comportamento della lente in un range centrato in f_0 , intorno più o meno 2 kHz

e risoluzione 100 Hz. Dopodiché è stato necessario introdurre la funzione obiettivo "p_avg_spot", definita come la media del valore assoluto della pressione dell'onda acustica nello spot ad ogni frequenza, cioè $p_{avg_{spot}} = \frac{1}{\Omega} \int_{\Omega} |p| d\Omega$

, calcolata sullo spot.

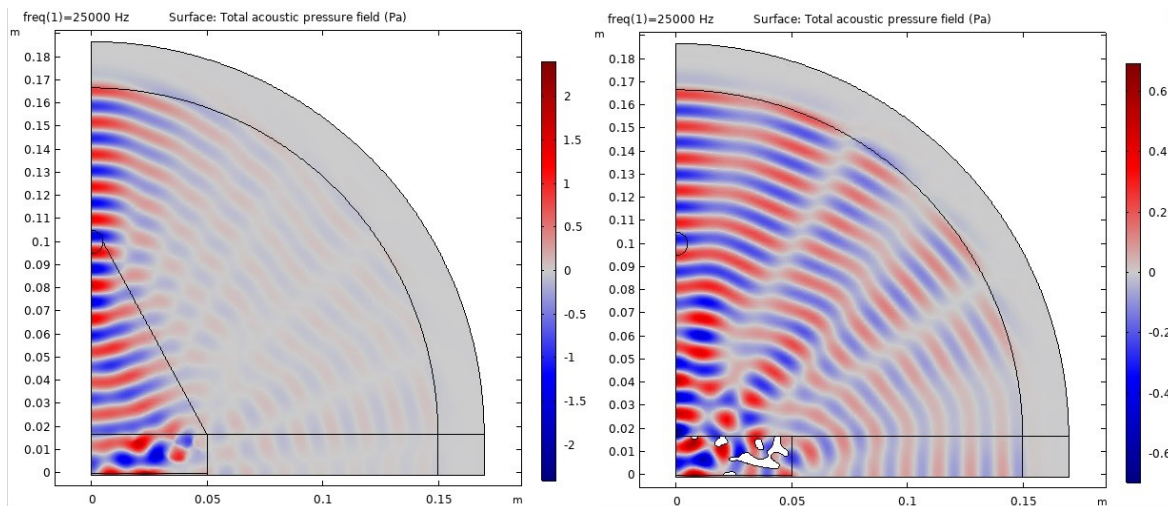


Fig.2.6. Esempio di due geometrie differenti con relativi grafici di pressione acustica

Dall'introduzione di questa variabile è stato possibile valutare il comportamento di diverse geometrie. In figura sono mostrati i grafici di pressione di due di queste: quella a sinistra presentava un valore della funzione obiettivo maggiore di quella a destra, in accordo con l'evidenza data dalla focalizzazione dell'onda acustica.

Una volta scritto il codice su Matlab è stato possibile calcolare il valore della funzione obiettivo per ognuna delle geometrie esportate precedentemente, al variare della frequenza di studio.

Mettendo a confronto i dati ottenuti si è dimostrato immediato trovare la geometria migliore, quella, cioè, a cui corrispondesse il massimo del valore della funzione obiettivo: il valore massimo riscontrato in questo studio è stato di 0,680 Pa ad una frequenza di 23kHz, con un livello di threshold di 0,40 e valori di pp e beta pari, rispettivamente, a 3 e 8.

Un'altra geometria di interesse per lo studio è stata quella con picco della funzione obiettivo (0.469 Pa) proprio a 25kHz, cioè alla frequenza definita ad inizio progetto: questa era stata definita da una soglia di threshold di 0,40 e valori di p0p e beta anch'essi pari a 3 e 8.

Per conferire maggiore affidabilità all'ottimizzazione in questa parte del processo è stato affrontato con Comsol uno studio che tenesse in considerazione effetti di tipo interazione solido/acustico ed anche perdite di energie dovute a dissipazioni termoviscose: lo studio ha dimostrato come, in prima approssimazione, questi effetti potessero essere trascurati date le condizioni di lavoro della lente. [12]

2.4. Ottimizzazione topologica di forma

Una volta ottenute le due geometrie migliori, al fine di massimizzare ancora la focalizzazione della lente, è stata affrontata un'ottimizzazione topologica di forma (shape optimization) per entrambe. Questo studio è stato affrontato su Comsol, il quale ha permesso di ridefinire i contorni delle geometrie rispettando i vincoli di progetto.

Questo metodo consiste nel modellare i contorni della geometria sfruttando algoritmi e curve polinomiali, ottenendo diversi valori della funzione obiettivo. Per questo studio sono stati sfruttati diversi valori di deformazione, tra cui 2,3 e 5 decimi di millimetro.

Questo approccio ha fornito risultati soddisfacenti, come mostrato dai valori della funzione obiettivo: la prima geometria ha registrato, dopo l'ottimizzazione, un valore di 1,268 Pa, mostrando quindi un aumento dell'86% in termini di focalizzazione. La seconda ha rivelato risultati ancora più apprezzabili, arrivando a valori della funzione obiettivo di 1,224 Pa, quasi il triplo di quanto non fosse col solo density method. Entrambe le geometrie hanno presentato un picco di ottimizzazione ponendo la deformazione pari a 5 decimi di millimetro.

I numeri calcolati sono stati confrontati con i grafici del Sound Pressure Level, in cui la pressione dell'onda acustica è espressa in dB e non in Pa; anche questi hanno mostrato miglioramenti dovuti all'attuazione della shape optimization e vengono riportati in figura 2.7. In alto ci sono le immagini prima e dopo l'ottimizzazione di forma per la prima geometria, in basso quelli della seconda.

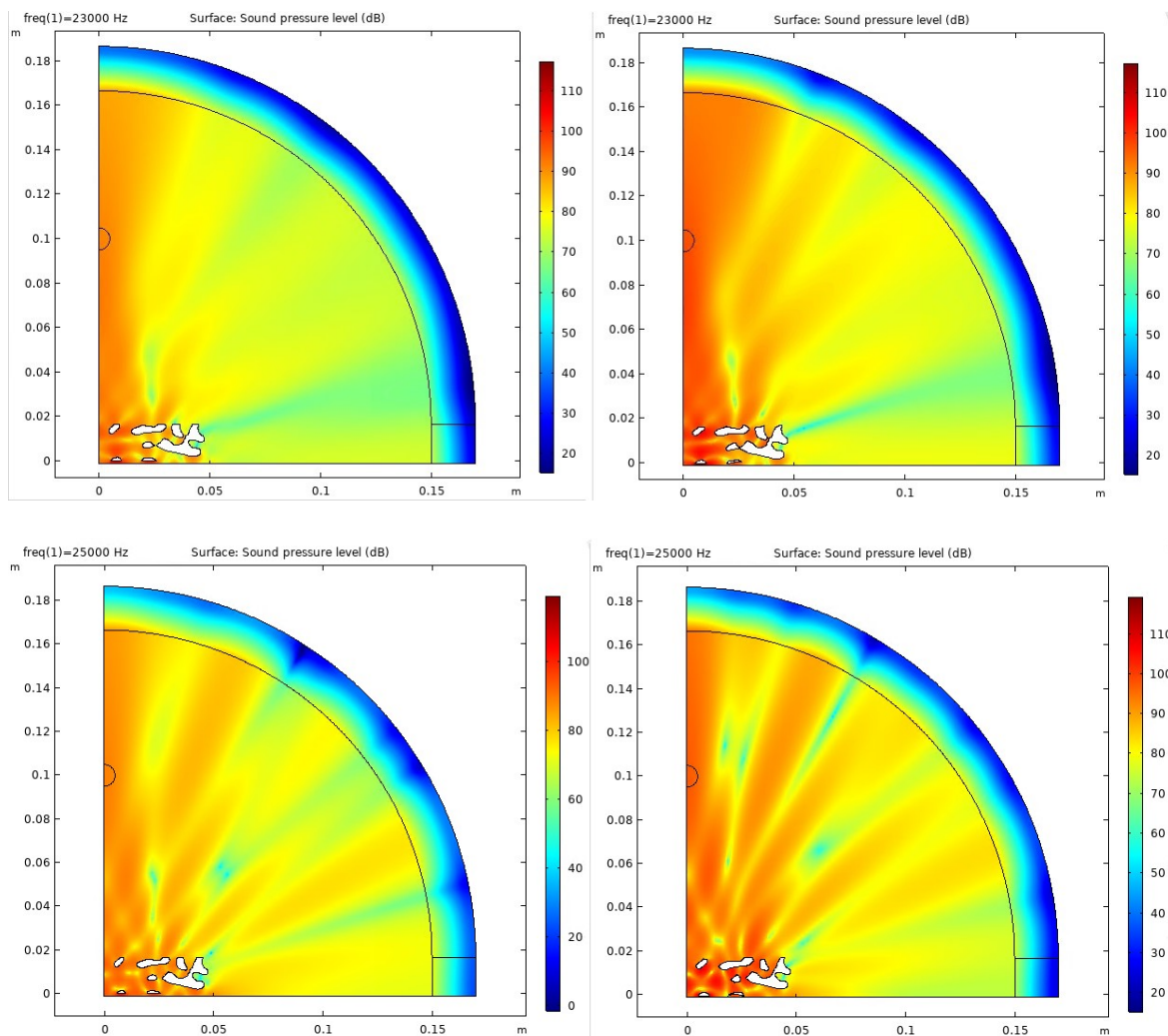


Fig.2.7. Confronto dei grafici di Sound Pressure Level delle due geometrie scelte prima e dopo l'ottimizzazione di forma

Andando a studiare più nel dettaglio gli effetti dell'ottimizzazione topologica di forma è stato possibile evidenziare i contorni delle due geometrie prima e dopo della stessa, come mostrato nelle figure 2.8 e 2.9.

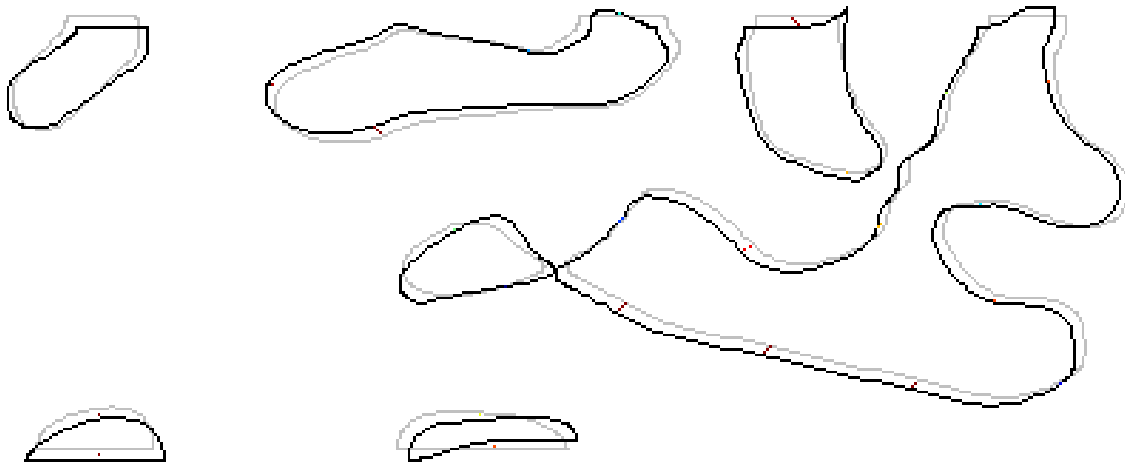


Fig.2.8. Confronto dei contorni della prima geometria prima e dopo il processo di ottimizzazione di forma a 23kHz. Geometria data da threshold 0.40, pp 3 e beta 8

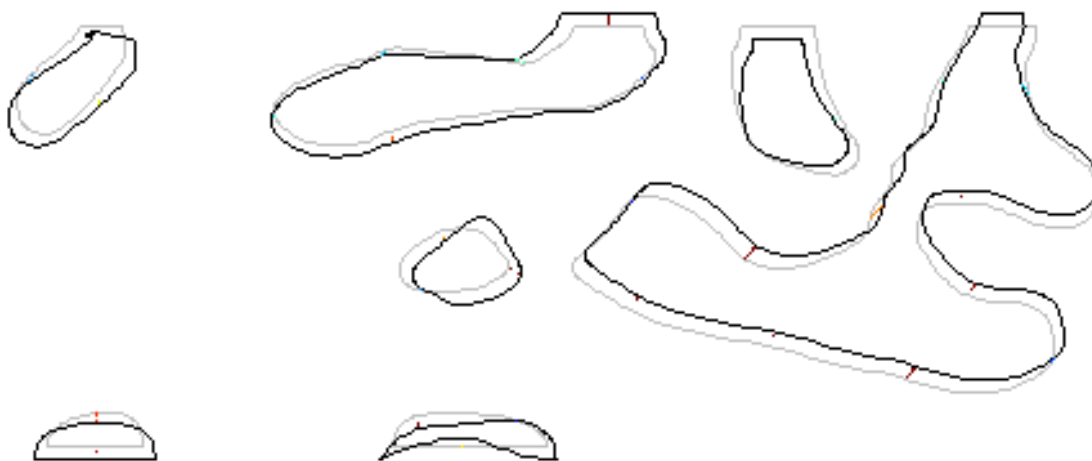


Fig.2.9. Confronto dei contorni della seconda geometria prima e dopo il processo di ottimizzazione di forma a 25kHz. Geometria data da threshold 0.46, pp 3 e beta 8

2.5. Stampa del prototipo

L'ultima fase del progetto ha visto la realizzazione del modello 3D delle lenti date dalle due geometrie d'interesse e la loro realizzazione tramite tecnologie di additive manufacturing. Su Comsol è stato possibile isolare i contorni della lente e, tramite un processo di estrusione, costruirne i modelli tridimensionali mostrati nelle figure 2.10 e 2.11.

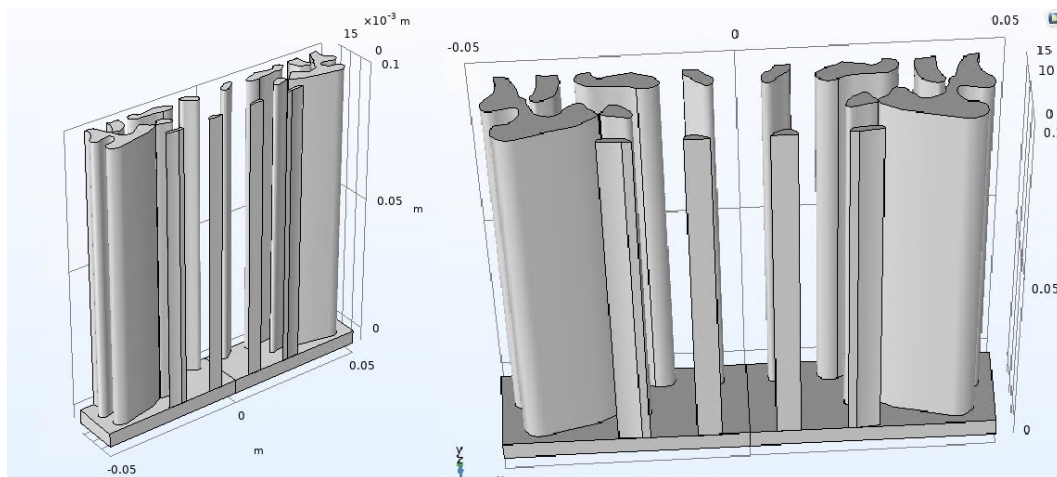


Fig.2.10. Modello 3D della lente data dalla prima geometria

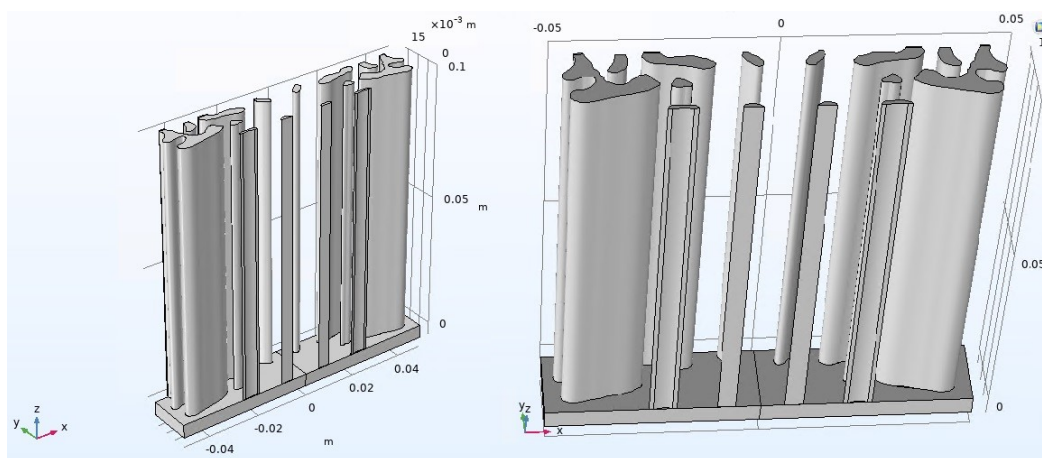


Fig.2.11. Modello 3D della lente data dalla seconda geometria

Il passo successivo è stato quello di esportare le geometrie ottenute in file .stl e utilizzare il programma "Ultimaker Cura" per progettare lo slicing utile alla realizzazione del prototipo alle macchine di stampa additiva. Inserendo infatti le caratteristiche della macchina come la dimensione dell'ugello, la temperatura del materiale e la velocità di stampa il software

restituisce il prototipo pronto da realizzare. Nelle figure di seguito vengono presentate le varie fasi dello slicing di una delle due geometrie e la tabella delle caratteristiche della macchina.

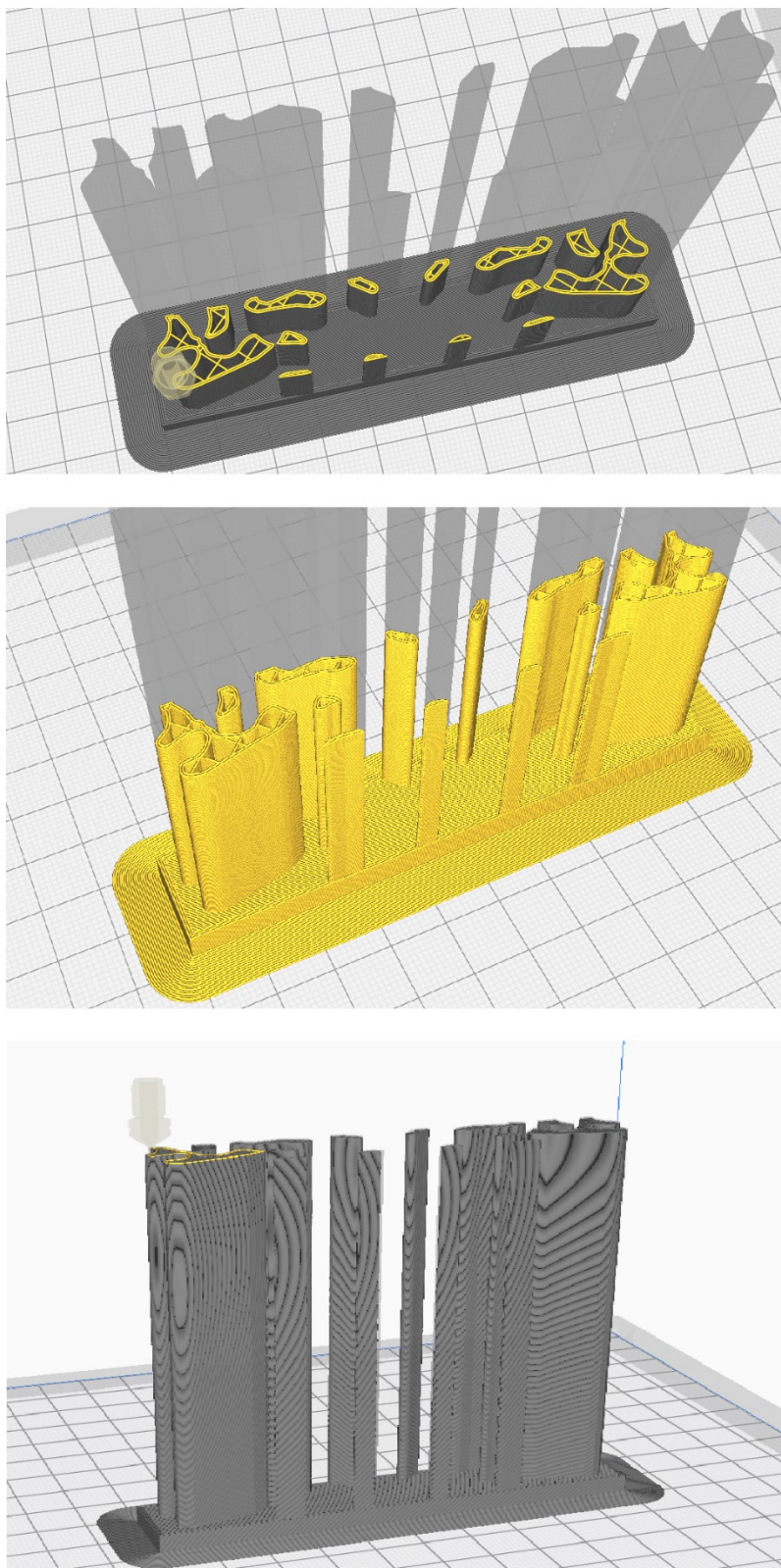


Fig. 2.12. Varie fasi dello slicing

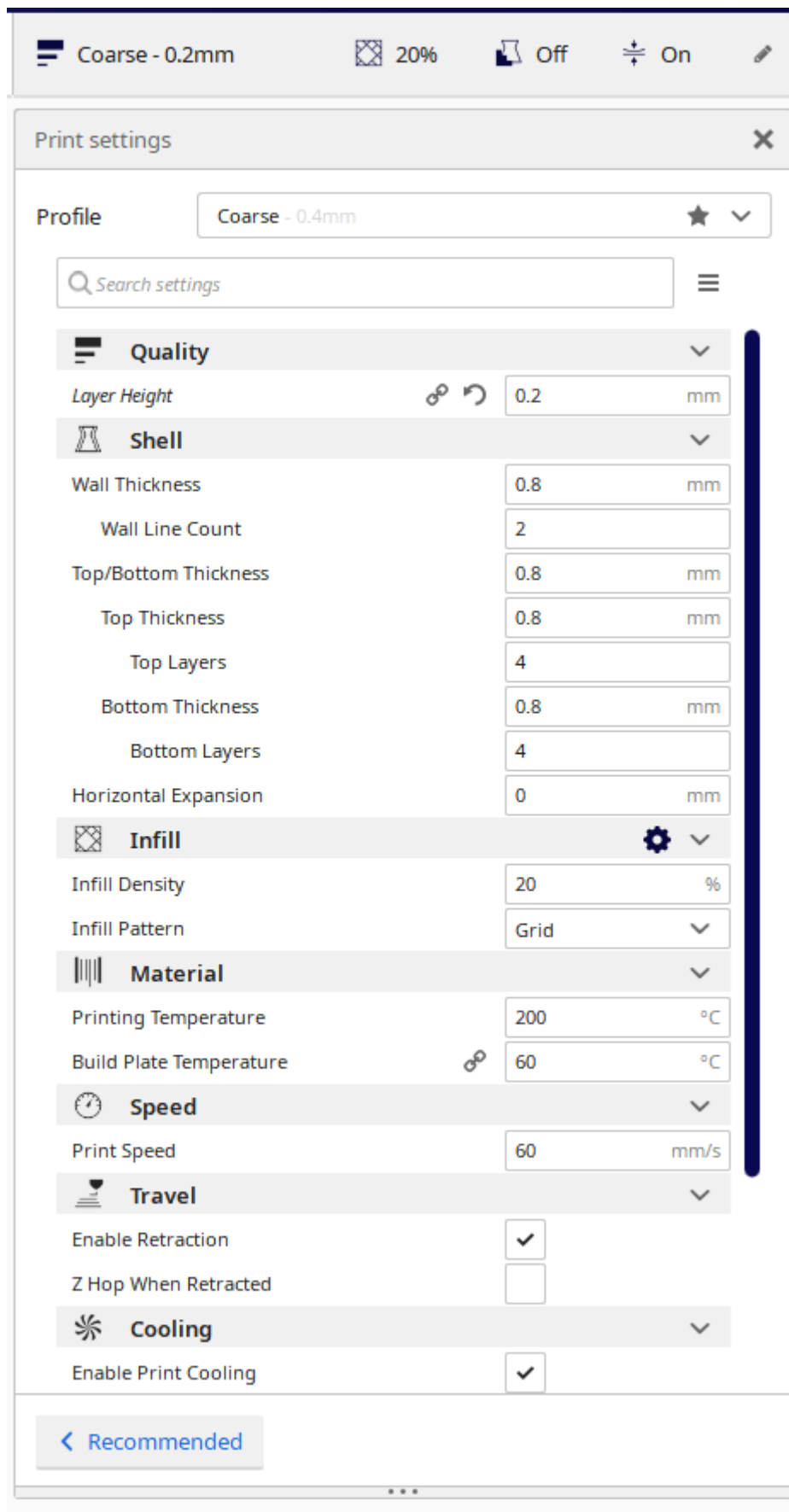


Fig.2.13. Tabella delle caratteristiche di stampa della macchina

3 . Conclusioni

3.1. Discussione dei dati ottenuti

Questo studio ha cercato di dimostrare come l'ottimizzazione topologica sia oggi uno strumento importantissimo, sia per la sua utilità sia per la versatilità nei campi di applicazione in cui può essere sfruttata.

A tal fine è stata realizzata la geometria di una lente acustica e studiata durante il suo utilizzo tramite il software di simulazione multifisica Comsol. La prima ottimizzazione topologica con il density method ha restituito geometrie complesse ma ottimali alla focalizzazione dell'onda acustica nello spot; un'attenta analisi e la redazione del codice su Matlab hanno permesso di estrarre due geometrie d'interesse, le quali presentavano picchi della funzione obiettivo a 23 kHz e 25kHz. La seconda fase del progetto ha coinvolto la teoria della shape topology optimization, la quale ha permesso di migliorare la focalizzazione della lente con entrambe le geometrie.

Il presente studio integra le conoscenze acquisite nella letteratura in merito all'ottimizzazione topologica acustica con le moderne tecnologie di simulazione agli elementi finiti e di additive manufacturing.

I risultati in termini di valori della funzione obiettivo hanno dimostrato come l'intento dell'elaborato sia stato pienamente rispettato; a favore della tesi sono stati portati anche grafici e immagini riguardanti lo svolgimento dell'ottimizzazione topologica.

Gli esiti del progetto sono coerenti con l'aspettativa inizialmente espressa nell'introduzione di questo scritto.

3.2. Limiti della ricerca

È importante precisare, però, che il progetto condotto ed esposto in questo elaborato presenta delle limitazioni di natura differente.

In primo luogo, nel calcolo dei valori della funzione obiettivo non sono stati presi in considerazione diversi fattori che potrebbero diminuire l'efficienza della focalizzazione della lente, come le inevitabili perdite termoviscose o dovute all'interazione solido – fluido, seppure siano state affrontate in prima istanza.

Un altro limite deriva dalla risoluzione della tecnologia di stampa additiva, dovute per esempio alla dimensione dell'ugello di stampa e dal materiale usato, che hanno comportato inesorabili differenze fisiche tra il modello tridimensionale virtuale e il pezzo finito.

Bibliografia

- [1]. D.T. Blackstock, *Fundamentals of Physical Acoustics*
- [2]. L. Kinsler, A.R. Frey, A.B. Coppens, J.V. Sanders, *Fundamentals of Acoustics*
- [3]. P. Mazzoldi, M. Nigro, C. Voci, *Elementi di fisica, elettromagnetismo e onde*
- [4]. F. Wang, B.S. Lazarov, O. Sigmund, *On projection methods, convergence and robust formulations in topology optimization*
- [5].<<https://www.comsol.com/blogs/how-to-use-acoustic-topology-optimization-in-your-simulation-studies/>>
- [6]. O. Sigmund · K. Maute, *Topology Optimization Approaches*
- [7].<<https://www.comsol.it/video/performing-shape-and-topology-optimization-in-comsol>>
- [8].<<https://www.comsol.it/optimization-module>>
- [9]. Z. Liu , J.G. Korvink, *Structural Shape Optimization Using Moving Mesh Method*
- [10]. L.J. Kumar, P.M. Pandey, D.I. Wimpenny, *3D Printing and Additive Manufacturing Technologies*
- [11].<<https://www.comsol.com/blogs/performing-topology-optimization-with-the-density-method/>>
- [12].<<https://www.comsol.com/blogs/theory-of-thermoviscous-acoustics-thermal-and-viscous->>

Indice delle immagini

[1]. https://it.wikipedia.org/wiki/Onda_sonora#:~:text=Nel%20caso%20del%20suono%20che,sorgente%20del%20suono%2C%20il%20quale

[2]. <https://www.vialattea.net/content/3272/>

[3]. <https://argomentidifisica.wordpress.com/category/arcobaleno/>

[4]. <https://www.foundry-planet.com>

[5]. <https://www.comsol.com/blogs/how-to-use-acoustic-topology-optimization-in-your-simulation-studies/>

[6]. <https://www.comsol.it/model/swept-meshing-of-a-bracket-geometry-69111>

[7]. <https://www.comsol.com/blogs/performing-topology-optimization-with-the-density-method/>

[8]. <https://www.comsol.it/video/performing-shape-and-topology-optimization-in-comsol>

[9]. https://www.researchgate.net/figure/Fused-Deposition-Modeling-Apparatus-15_fig3_318851030

[10]. <https://www.semanticscholar.org/paper/3-D-Printed-Phantom-Fabricated-by-Photopolymer-for-Jacquet-Ossant/948af14611d63aeb348c0f2c7d173f4382126a37>

[11]. <https://www.mdpi.com/2075-4701/9/7/731/htm>