

POLITECNICO DI TORINO

Facoltà di Ingegneria
Laurea Magistrale
INGEGNERIA AEROSPAZIALE



Ottimizzazione di metamateriali acustici per applicazioni aeronautiche

Candidato:
Interrante Emanuela

Relatore:
Prof.ssa Cinefra Maria

A.A. 2018 - 2019

Indice

Elenco delle figure	III
Elenco delle tabelle	VI
1 Introduzione	1
2 Acustica	5
2.1 Leggi di bilancio	6
2.2 Equazioni dell'onda sonora	8
2.3 Comportamento delle onde acustiche	12
2.4 Materiali acustici	15
2.5 Sound Transmission Loss	18
3 Metamateriali	21
3.1 Caratteristiche metamateriali	23
3.2 Metamateriali acustici	27
3.3 Metamateriale scelto	29
4 Ottimizzazione	36
4.1 Teoria OPTIMUS	38
4.1.1 Design of Experiments	40
4.1.2 Numerical Optimization	45
5 Optimus	54
5.1 MUL2toACTRAN	58
5.2 Prove in Optimus	61
5.3 Configurazione finale di Optimus	64
6 Ottimizzazione e risultati	72
6.1 Risultati di Optimus	72

6.2	Metodi di ottimizzazione utilizzati	78
6.2.1	Metodi Nominal e Table	79
6.2.2	Metodo DOE	79
6.2.3	Multi-Objective Optimization	82
7	Conclusioni	88
	Bibliografia	90

Elenco delle figure

1.1	Logo di Clean Sky2 Programme	1
1.2	Andamento mercato turboprop nei prossimi vent'anni [1]	2
1.3	Emissione di CO_2 in base alle miglia nautiche percorse [1]	3
2.1	Volume di controllo infinitesimo	6
2.2	Sinusoide onda sonora	9
2.3	Pressione sonora in funzione del tempo	10
2.4	Curve di Fletcher e Munson	11
2.5	Onda sonora che incontra un ostacolo	13
2.6	Diffrazione al variare della dimensione dell'apertura del divisorio e della lunghezza d'onda	14
2.7	Materiali porosi con diversa resistenza al flusso	16
2.8	Configurazione tipica delle fusoliere	17
2.9	Andamento della Sound Transmission Loss teorica per un pannello omogeneo infinito	18
2.10	Calcolo sperimentale della trasmissione del suono tra stanze adiacenti	19
3.1	Primo esempio di metamateriale proposto da Pendry	22
3.2	Suddivisione dei materiali in base alla permeabilità magnetica e permitti- vità elettrica	24
3.3	Illustrazione grafica della legge di Snell	26
3.4	Array fili metallici per ottenere la permittività elettrica negativa	27
3.5	Rappresentazione di un singolo split ring resonator e di un suo insieme periodico	28
3.6	Metamateriale acustico con piastrine rigide	29
3.7	Immagine al microscopio della schiuma di melammina	30
3.8	Curva stress-strain per la schiuma di melammina a 24	31

3.9	Unità periodica del metamateriale con matrice in schiuma di melammina e inclusioni cilindriche di alluminio	32
3.10	Materiale periodico utilizzato da Langlet	33
3.11	Piastra con inclusioni ed omogenizzata	35
3.12	Piastra con ripetizioni periodiche di celle unitarie forate e singola cella unitaria	35
4.1	Collocazione Optimus all'interno di un ciclo produttivo	39
4.2	Two level full factorial design per 3 fattori	41
4.3	Three level full factorial design	42
4.4	Fractional factorial design	42
4.5	Latin-hypercube design	43
4.6	Adaptive DOE Flow chart	44
4.7	Esempio di Least Squares Fitting	44
4.8	Esempio di linea di Pareto	46
4.9	Normal Boundary Intersection	47
4.10	Weighted Objective Method	47
4.11	Weighted Tchebycheff Method	48
4.12	Algoritmo Fast-non-dominated-sort	50
4.13	Rappresentazione grafica del calcolo della distanza di affollamento	50
4.14	Algoritmo di assegnazione della distanza di affollamento	51
4.15	Algoritmo di Main Loop alla generazione t_{th}	52
4.16	Metodo Monte-Carlo per modelli lineari	53
5.1	Analisi tramite MUL2-UC	55
5.2	MUL2-UC	56
5.3	File Effective-stiffness.dat	59
5.4	Schermata di apertura Optimus	61
5.5	Prima configurazione di Optimus	62
5.6	Configurazione con l'eseguibile di MatLab	62
5.7	Workflow Optimus con 3 input e un solo Action2	63
5.8	Configurazione con i blocchetti Action per ogni file da leggere	63
5.9	Workflow Optimus con un solo valore di Vf e il calcolo di tutte le sound transmission loss tramite blocchi di output	64
5.10	Configurazione con un solo valore di Vf per schema e il calcolo di tutte le sound transmission loss tramite vettori	65
5.11	Configurazione con un solo valore di Vf e i tre vettori per l'ottimizzazione	65
5.12	Configurazione senza il vincolo della densità in Optimus	66
5.13	Configurazione finale implementata in Optimus	66
5.14	Schermata dei valori della volume fraction introdotti in Optimus	67

5.15	Schermata del file Input Volume Fraction in Optimus	67
5.16	Schermata degli output delle densità in Optimus	68
5.17	Schermata dell'Output dei vincoli in Optimus	69
5.18	Schermata dell'Output TrueFalse in Optimus	69
5.19	Schermata di Action1 in Optimus	70
5.20	Schermata del file Mean-TL.plt in Optimus	71
6.1	Andamento della densità per i diversi valori di Volume fraction ottenuti da Optimus	73
6.2	Andamento della densità per i diversi valori di Volume fraction ottenuti da Optimus	73
6.3	Andamento della sound transmission loss e della densità al variare di tutti i valori della volume fraction in Input in Optimus	74
6.4	Andamento dell'intensità sonora incidente al variare della frequenza	75
6.5	Andamento dell'intensità sonora trasmessa al variare della frequenza per i diversi valori di Vf	76
6.6	Andamento della sound transmission loss al variare della frequenza per i diversi valori di Vf	77
6.7	Andamento della sound transmission loss al variare della frequenza per tre valori di Vf	78
6.8	Bubble plot per Fractional Factorial DOE con $Vf = 0.015$ in ascissa e il TL corrispettivo in ordinata	82
6.9	2D plot per Fractional Factorial DOE con $Vf = 0.015$ in ascissa e il TL corrispettivo in ordinata	83
6.10	Andamento della sound transmission loss in funzione della volume fraction, ottenuti in Optimus in seguito all'ottimizzazione con l'algoritmo NSEA+	84
6.11	Andamento della sound transmission loss e della densità in funzione della volume fraction, ottenuti in Optimus in seguito all'ottimizzazione con l'algoritmo NSEA+	85
6.12	Pareto in Optimus, in seguito all'ottimizzazione con l'algoritmo NSEA+ per $Vf = 0.015$ e la sound transmission loss corrispondente	86
6.13	Bubble plot in seguito all'ottimizzazione multi-obiettivo con algoritmo NSEA+	87
6.14	Optimum plot in seguito all'ottimizzazione multi-obiettivo con algoritmo NSEA+	87

Elenco delle tabelle

3.1	Dimensioni metamateriale in esame	34
3.2	Proprietà alluminio	34
5.1	File DATA-MELAMINE-FOAM.dat	58
5.2	File METAMATERIAL-Vf.dat	60
5.3	Densità calcolate in Optimus in funzione delle volume fraction	68
5.4	File Mean-TL.plt ottenuto tramite l'eseguibile all'interno di Action1 in Optimus	71
6.1	Densità e Sound Transmission Loss al variare della frequenza ottenuti in Optimus	72
6.2	Densità e Sound Transmission Loss per tutti i valori di input in Optimus .	74
6.3	Densità e Sound Transmission Loss per tre valori di Volume fraction	77
6.4	Summary del Nominal method	79
6.5	Esempio di Input durante l'esperimento Fractional Factorial DOE	81
6.6	Valori volume fraction e sound transmission loss in seguito a Fractional Factorial DOE	81
6.7	Valori volume fraction, sound transmission loss e densità in seguito a Fractional Factorial DOE contenuti nel Bubble plot	82
6.8	Esperimenti eseguiti in Optimus per l'ottimizzazione multiobiettivo tramite l'algoritmo NSEA+	84
6.9	Valori volume fraction e sound transmission loss per $Vf = 0.015$ in seguito a MOO NSEA+ contenuti nel grafico Pareto	85
6.10	Valori volume fraction e sound transmission loss per $Vf = 0.015$ in seguito a MOO NSEA+ contenuti nel grafico Bubble plot	86

Alla mia famiglia

Introduzione

Nel settore aeronautico negli ultimi anni si è sviluppata una crescente consapevolezza sulla necessità della riduzione dei costi sia economici che ambientali, segnando così un percorso ben definito da seguire per la progettazione dei velivoli del presente e del futuro. L'attenzione non è posta solo sul consumo del carburante, principale causa dell'aumento di entrambi i costi, ma su ogni segmento della produzione, dal concept del design fino allo smaltimento dei componenti a fine vita. In molti Paesi si ha già una visione comune degli standard aeronautici da perseguire in termini di impatto ambientale, ciò è attestato dalla presenza di programmi condivisi, come Clean Sky Joint Undertaking (giunto al Clean Sky2 Programme) che è il frutto dell'incontro tra la Commissione Europea e l'industria aeronautica europea. Questo progetto ha come obiettivo principale la riduzione del 75% delle emissioni di CO_2 , del 90% di NO_x e riduzione del 65% del rumore emesso dai velivoli, con l'utilizzo di aspetti innovativi quali strutture più leggere, motori più efficienti, controlli avanzati e un più sostenibile fine vita dell'aereo.



Figura 1.1: Logo di Clean Sky2 Programme

I velivoli di questo programma spaziano dalle grandi dimensioni, ai regionali fino ai rotorcraft concentrandosi su diverse aree, dal fattore umano al rumore e vibrazioni, ai materiali organici in cabina ai sistemi di sicurezza. Inoltre, si occupa anche dei sistemi principali della cabina, dei sedili, dell'interfaccia con i passeggeri, dei pannelli di rivestimento, del sistema di isolamento termico. Clean Sky2 finanzia altri progetti che perseguono lo stesso

scopo, come CASTLE (Cabin System design Toward passenger wellBeing) che si propone l'obiettivo di sviluppare, progettare e testare una nuova cabina passeggeri ottimizzata, sia per l'aviazione regionale che business, orientata al benessere del passeggero fino ad un livello di maturità tecnologica pari a 5, TLR 5 vuol dire che deve essere effettuata anche la validazione della tecnologia nell'ambiente rilevante. Per gli aerei regionali l'ottimizzazione e le migliorie sono dovute ad un approccio progettuale innovativo ed integrato, basato su fattori umani quali l'ergonomia, l'antropometria, gli effetti delle vibrazioni, del rumore e del movimento sui passeggeri e sull'equipaggio. L'interesse nel migliorare le prestazioni di questi velivoli è dovuto alla loro crescente richiesta in campo aeronautico, questo settore comprende tipicamente aerei come jet regionali e turboprop, con una capacità da 20 a 130 posti, su rotte a corto e medio raggio. Alla fine del 2015 la flotta mondiale dell'aviazione comprendeva 9000 unità di cui 4350 turboelica e 4650 jet regionali. L'ambiente competitivo dell'aviazione regionale negli ultimi anni è il fattore chiave per lo sviluppo delle economie locali consentendo facili connessioni con le capitali regionali e viaggi veloci da aeroporti vicini. I turboprop sono candidati ideali per lo sviluppo economico di molte regioni non solo perché presentano la giusta tecnologia e capacità di carico, da 20 a 80 passeggeri nella configurazione standard, ma grazie alle loro dimensioni ridotte sono in grado di servire tutti i tipi di aeroporti. Si prevede un incremento della richiesta dei turboprop di circa il 60% rispetto all'intera flotta mondiale nei prossimi 20 anni.



Figura 1.2: Andamento mercato turboprop nei prossimi vent'anni [1]

A causa dell'aumento del prezzo del carburante, che è maggiore negli aeroporti regionali per i maggiori costi di trasporto, i velivoli che possono soddisfare le richieste, cioè consumo minore di carburante per avere una riduzione dei costi, ma poter comunque operare sulle tratte richieste, sono i turboprop che a parità di tratta consumano meno carburante dei regional jet. Infatti, ipotizzando di sostituire tutti i regional jet operanti a corto raggio con i turboprop moderni si avrebbe una riduzione del'11% delle emissioni di CO_2 . Queste 4100000 tonnellate di emissioni complessive di aviazione regionale di CO_2 equivalgono all'assorbimento annuale di 200.000.000 di alberi.

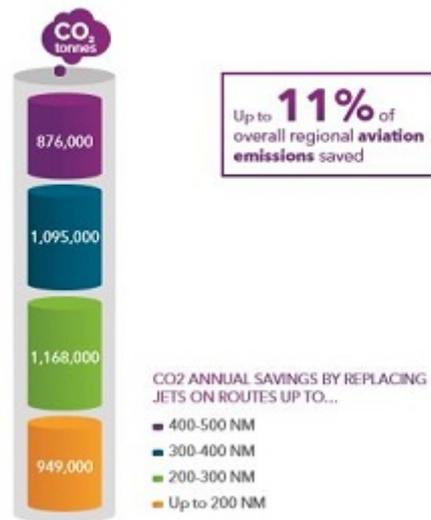


Figura 1.3: Emissione di CO_2 in base alle miglia nautiche percorse [1]

L'introduzione di nuove tecnologie favorisce non solo i produttori, in quanto aumenta l'attrattiva per i clienti, ma permette anche un'esperienza di volo migliore per i passeggeri. I velivoli regionali permettono oltre alla riduzione dei costi operativi grazie ad un minore consumo di carburante, anche la riduzione dei costi di manutenzione e risparmio di peso strutturale dovuto non solo alle configurazioni innovative, ma anche all'uso di materiali leggeri. Tutti questi vantaggi sono maggiori per i turboprop in quanto sono meno costosi, rispetto i regional jet, ma per rendere questi velivoli ancora più competitivi occorre ridurre l'eccessivo rumore presente in cabina. Le fonti di rumore critico all'interno della cabina dei turboprop sono principalmente quattro:

- APU (Auxiliary Power Unit): consente di fornire energia ai sistemi di bordo quando i motori sono spenti o in caso di avaria,
- ECS (Environmental Control System): comprende l'impianto di condizionamento e di pressurizzazione della cabina,
- Sistema propulsivo: la propulsione avviene principalmente per mezzo dell'aria messa in movimento dalla rotazione delle eliche azionate da turbine,
- TBL (Turbulent Boundary Layer): è lo strato limite che si crea attorno al corpo per numeri di Reynolds elevati, maggiori di $3 \cdot 10^5$.

Tra i quattro la principale fonte di rumore è il sistema propulsivo a causa della rotazione delle eliche. Per tale ragione la maggior parte dell'energia acustica è concentrata nella gamma delle basse frequenze (0-300Hz). Queste fonti di rumore sono anche motivo di vibrazione del velivolo, basti pensare alle vibrazioni indotte dai motori attraverso le gondole motrici dove sono alloggiati, le forze aerodinamiche che sollecitano elasticamente le strutture portanti, le onde acustiche emesse dagli stessi propulsori e le turbolenze atmosferiche

incontrate durante il volo. Per vibrazione si intende il movimento oscillatorio di un corpo intorno al proprio asse di equilibrio ed una delle fonti costanti di vibrazioni negli aerei è il motore, nonostante i molti accorgimenti per isolarlo, il più possibile, dalla struttura principale del velivolo, una certa quantità di vibrazione riesce comunque a raggiungere la cabina interna del velivolo. Le vibrazioni e il rumore sono, quindi, motivo di stress per i passeggeri, non permettono a questi ultimi di trascorrere un volo piacevole rendendo meno facili azioni che ormai tutti compiono durante un viaggio quali leggere, scrivere e usare il PC. I requisiti di rumorosità interna si riferiscono alla fase di crociera, anche se la durata è notevolmente inferiore rispetto al trasporto aereo medio/lungo raggio; non potendo eliminare le fonti che generano questo disturbo è possibile agire sulla composizione strutturale della fusoliera. Per poter ridurre il rumore presente all'interno della cabina si è pensato all'utilizzo di pannelli in metamateriale acustico in grado di assorbire il rumore prodotto alle basse frequenze, ma senza aumentare il peso strutturale del velivolo.

Acustica

Prima di poter trattare la riduzione del rumore occorre comprendere a fondo i motivi dell'insorgere di questo disturbo che altro non è che un'onda sonora indesiderata. L'onda sonora è il propagarsi di un moto oscillatorio che le particelle del mezzo, fluido o solido, si comunicano sequenzialmente oscillando attorno alla posizione media. La vibrazione acustica di una sorgente sonora dà luogo ad una perturbazione, il suono, che si propaga alle particelle adiacenti con una velocità che dipende dal mezzo di propagazione, che deve possedere proprietà elastiche ed inerziali. Le particelle oscillando trasmettono il proprio movimento a quelle circostanti, tramite collisioni molecolari, questo fa sì che si generi un fronte d'onda sferico che propaga nel mezzo e che trasporta la perturbazione che si manifesta come suono. Tale fronte d'onda propagando con la velocità del suono può essere considerato come onda debole di pressione tra monte e valle dell'onda sonora le variazioni di proprietà sono di lievissima entità tanto da poter considerare la propagazione dell'onda come un fenomeno dissipativo, avvenendo in condizioni adiabatiche è anche isoentropico. Le onde sono suddivise in due categorie: onde elastiche e elettromagnetiche. Le onde elastiche hanno bisogno di un mezzo materiale per propagarsi e la loro propagazione è dovuta all'interazione tra gli atomi o tra le molecole del mezzo stesso, questa propagazione non comporta il trasferimento di materia ma di quantità di moto ed energia. Le onde elettromagnetiche, invece, si propagano nel vuoto e possono attraversare anche mezzi materiali, nei quali la propagazione avviene sempre con velocità inferiore rispetto a quella della luce. Formalmente un'onda si riconduce alla perturbazione delle condizioni di equilibrio di un campo che descrive una proprietà di un sistema fisico. Per campo si indica una grandezza fisica che può essere definita ogni istante e in ciascun punto dello spazio. Nel caso di un'onda sonora ciò che si verifica è una perturbazione dello stato di equilibrio della pressione e della densità che si propaga in un fluido. Nello studio dei fenomeni sonori quello che interessa è il valore della perturbazione intorno al valore di riposo che la perturbazione ha nel mezzo, cioè la differenza fra la pressione $p(t)$ esistente in un

dato istante t e la pressione statica che si avrebbe nello stesso punto e nello stesso istante in assenza dell'onda sonora. Nel caso in cui la propagazione avvenga in atmosfera, indicando con P_a la pressione atmosferica, la differenza $\Delta p(t) = p(t) - P_a$ è definita pressione acustica. La pressione acustica è sempre una piccolissima frazione della pressione statica, per i suoni di media intensità è dell'ordine del milionesimo della pressione atmosferica P_a . E' questo il motivo per cui i fenomeni sonori possono essere trattati come piccole perturbazioni. Il comportamento da piccola perturbazione si esprime partendo dall'equazione della trasformazione adiabatica di un gas ideale:

$$\frac{p(t)}{\rho(t)^\gamma} = \frac{P_a}{\rho_a^\gamma} = \text{costante} \quad (2.1)$$

con $p(t)$ pressione in un dato istante t , $\rho(t)$ è la densità in un dato istante t , P_a è la pressione atmosferica, ρ_a è la densità atmosferica, $\gamma = \frac{C_p}{C_v}$ è il coefficiente di dilatazione adiabatica e C_p e C_v sono rispettivamente i calori specifici a pressione costante e a volume costante.

2.1 Leggi di bilancio

Per poter studiare la propagazione nei fluidi ideali occorre fare delle assunzioni, il fluido deve essere: omogeneo, isotropo, perfettamente elastico e non dissipativo. Per descrivere le equazioni delle onde sonore occorre considerare un volume di controllo V_0 infinitesimo fisso, in forma differenziale $dx dy dz$, e studiare il problema dal punto di vista euleriano.

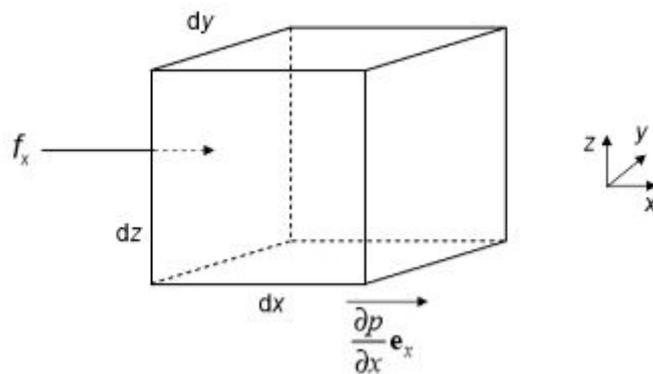


Figura 2.1: Volume di controllo infinitesimo

- Conservazione della massa

$$\frac{\partial}{\partial t} \int_{Vol} \rho dVol = - \int_S \rho(\vec{V} \cdot \vec{n}) dS \quad (2.2)$$

Per volume indipendente dal tempo la derivata temporale può essere inglobata nell'integrale di volume e se il volume è arbitrario affinché il valore dell'integrale sia nullo deve essere nulla la funzione integranda, la relazione finale è:

$$\frac{\partial p}{\partial t} + \frac{\partial(\rho u)}{\partial x} + \frac{\partial(\rho v)}{\partial y} + \frac{\partial(\rho w)}{\partial z} = 0 \quad (2.3)$$

è la Forma Euleriana conservativa. Derivando l'equazione precedente si ottiene la forma non conservativa:

$$\frac{D\rho}{Dt} = -\rho(\nabla \cdot \vec{V}) \quad (2.4)$$

è la Forma Lagrangiana non conservativa.

- Conservazione della quantità di moto

$$\frac{\partial}{\partial t} \int_{Vol} \rho \vec{V} dVol = - \int_S \rho \vec{V} (\vec{V} \cdot \vec{n}) dS - \int_S (p \cdot \vec{n}) dS + \int_{Vol} \rho \vec{f} dVol \quad (2.5)$$

Proiettando l'equazione lungo i tre assi e trasformando gli integrali di superficie in integrali di volume si ottengono le equazioni finali nella forma differenziale e Euleriana:

$$\frac{\partial(\rho u)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho uu)}{\partial x} + \frac{\partial(\rho uv)}{\partial y} + \frac{\partial(\rho uw)}{\partial z} = -\frac{\partial p}{\partial x} + \rho f_x \quad (2.6)$$

$$\frac{\partial(\rho v)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho vu)}{\partial x} + \frac{\partial(\rho vv)}{\partial y} + \frac{\partial(\rho vw)}{\partial z} = -\frac{\partial p}{\partial y} + \rho f_y \quad (2.7)$$

$$\frac{\partial(\rho w)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho wu)}{\partial x} + \frac{\partial(\rho wv)}{\partial y} + \frac{\partial(\rho ww)}{\partial z} = -\frac{\partial p}{\partial z} + \rho f_z \quad (2.8)$$

Passando alla forma Lagrangiana si ottiene una scrittura più compatta:

$$\rho \frac{Du}{Dt} = \frac{\partial p}{\partial x} + \rho f_x \quad (2.9)$$

$$\rho \frac{Dv}{Dt} = \frac{\partial p}{\partial y} + \rho f_y \quad (2.10)$$

$$\rho \frac{Dw}{Dt} = \frac{\partial p}{\partial z} + \rho f_z \quad (2.11)$$

- Conservazione dell'energia

$$\begin{aligned} \frac{\partial}{\partial t} \int_{Vol} \rho \left(e + \frac{V^2}{2} \right) dVol = & - \int_S \rho \left(e + \frac{V^2}{2} \right) (\vec{V} \cdot \vec{n}) dS - \\ & \int_S p(\vec{V} \cdot \vec{n}) dS + \int_{Vol} \rho(\vec{f} \cdot \vec{V}) dVol + \int_{Vol} \rho \dot{q} dVol \end{aligned} \quad (2.12)$$

Trasformando gli integrali di superficie in integrali di volume si ottiene l'equazione dell'energia in forma differenziale euleriana:

$$\frac{\partial}{\partial t} \left(\rho \left(e + \frac{V^2}{2} \right) \right) + \nabla \cdot \left(\rho \left(e + \frac{V^2}{2} \right) \vec{V} \right) = -\nabla \cdot (p\vec{V}) + \rho\dot{q} + \rho(\vec{f} \cdot \vec{V}) \quad (2.13)$$

nella forma differenziale lagrangiana sarà:

$$\rho \frac{D \left(e + \frac{V^2}{2} \right)}{Dt} = -\nabla \cdot (p\vec{V}) + \rho\dot{q} + \rho(\vec{f} \cdot \vec{V}) \quad (2.14)$$

2.2 Equazioni dell'onda sonora

Per poter studiare la propagazione dell'onda sonora occorre considerarla in movimento, le equazioni che la caratterizzano per flussi 1D vengono scritte tra monte e valle.

- Equazione di continuità: $\rho u = \text{costante}$

$$\rho a = (\rho + d\rho)(a + da) = \rho a + \rho da + a d\rho + da d\rho \quad (2.15)$$

da cui si ottiene l'equazione semplificata

$$\frac{da}{d\rho} = -\frac{a}{\rho} \quad (2.16)$$

- Equazione quantità di moto: $p + \rho u^2 = \text{costante}$

$$p + \rho a^2 = (p + dp) + (\rho + d\rho)(a + da)^2 \quad (2.17)$$

da cui si ottiene

$$a^2 = \frac{dp}{d\rho} \quad (2.18)$$

L'onda sonora è adiabatica e reversibile, quindi è isoentropica. Per trasformazioni isoentropiche vale la relazione $\frac{p}{\rho^\gamma} = \text{costante}$, da cui risulta:

$$a = \sqrt{\gamma \frac{R}{M} T} = \sqrt{\gamma \frac{p}{\rho}} \quad (2.19)$$

Il suono è un fenomeno ondulatorio e il tipo più semplice di onda sonora piana armonica è rappresentata matematicamente da una sinusoide

$$u(\theta) = A \sin \left(2\pi \frac{\theta}{\tau} + \phi \right) \quad (2.20)$$

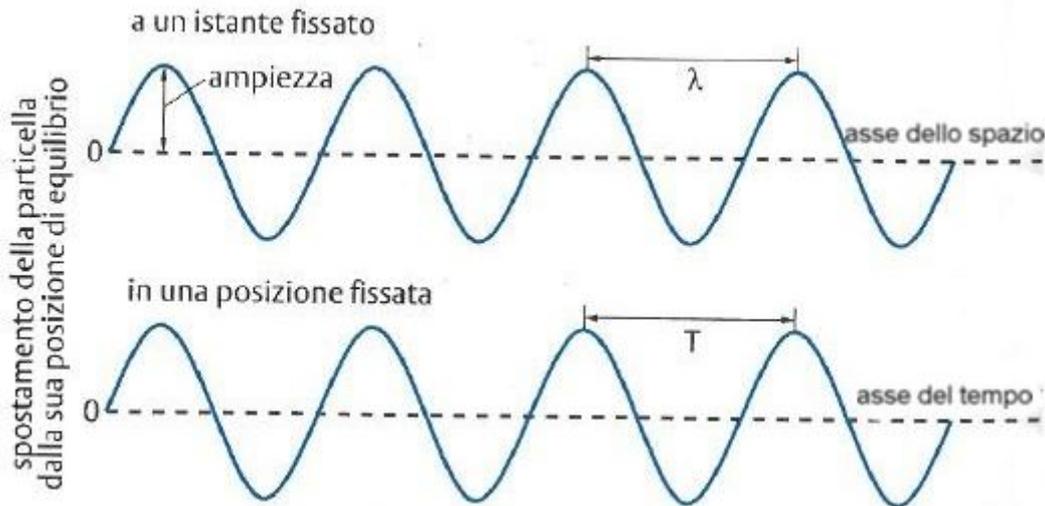


Figura 2.2: Sinusoide onda sonora

Le caratteristiche dell'onda sono:

- la frequenza $f = \frac{1}{\tau}$, definisce quante volte un'onda sonora oscilla al secondo e si misura in Hz
- la pulsazione $\omega = 2\pi f = \frac{2\pi}{\tau}$, misura la velocità con cui viene effettuata un'oscillazione completa nel moto armonico e si misura in rad/s
- lunghezza d'onda $\lambda = c\tau = \frac{c}{f}$, è la distanza tra due creste o tra due ventri della sua forma d'onda e si misura in m/s
- periodo dell'onda armonica $T = \frac{2\pi}{\omega}$, è l'intervallo temporale corrispondente alla lunghezza d'onda e si misura in s
- ampiezza è la distanza massima percorsa dalla particella dalla sua posizione di riposo durante l'oscillazione.

E' possibile sostituire questi parametri nella formula precedente e si ottiene:

$$u(\theta) = A\sin(2\pi f\theta + \phi) = A\sin(\omega\theta + \phi) \quad (2.21)$$

L'energia acustica sposta l'aria ripetutamente attraverso un meccanismo che provoca un cambiamento periodico della pressione dell'aria. Essendo una grandezza molto piccola si ricorre alla scala logaritmica per poter esprimere anche le più piccole variazioni di pressione che sono determinanti per l'entità del rumore. Quando l'aria è attraversata da un rumore qualsiasi la pressione in un punto subisce variazioni complesse ed è necessario definire un valore che la rappresenti con la migliore approssimazione possibile, nel caso di toni puri le onde di pressione possono essere caratterizzate dalla loro frequenza e ampiezza. L'impatto di un'onda di pressione acustica su una struttura solida può dissipare energia attraverso

la flessione del frame solido. La pressione sonora efficace che è definita come:

$$p_e = \sqrt{\frac{1}{T} \int_0^T p^2(t) dt} \quad (2.22)$$

ha un andamento che può essere suddiviso in 4 regioni.

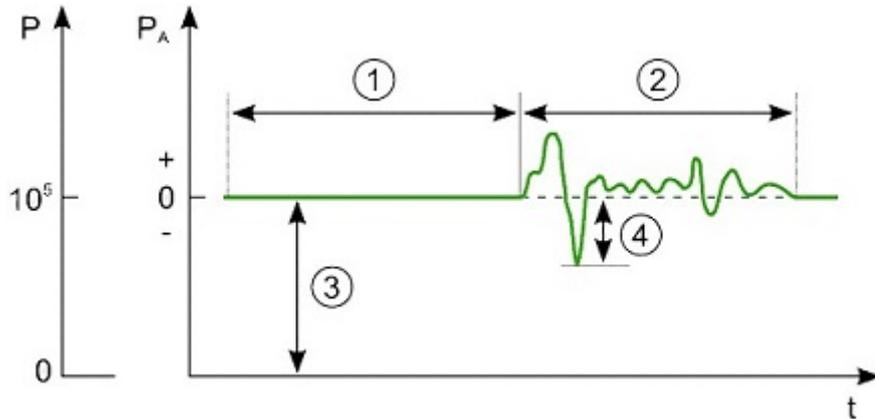


Figura 2.3: Pressione sonora in funzione del tempo

La regione 1 indica il silenzio, la regione 2 il suono udibile, la regione 3 la pressione atmosferica e la regione 4 la pressione sonora istantanea. Una delle quantità più usate che definisce un campo sonoro è il livello di pressione sonora L_p , che si basa sul concetto di pressione efficace, è la misura della deviazione della pressione ambientale dell'aria provocata da un'onda sonora

$$L_p = 20 \log_{10} \left(\frac{p_e}{p_{rif}} \right) \quad (2.23)$$

l'unità di misura è il decibel (dB) e p_{rif} indica la pressione di riferimento che è pari a $2 \cdot 10^{-6} P_a$, si usano i decibel perché la dinamica delle pressioni di interesse è molto estesa, per misurare il livello di pressione sonora si usano microfoni e idrofoni. Approssimativamente si ha:

$$L_p = 10 \log_{10} p_e^2 + 94 dB \quad (2.24)$$

si ottiene che raddoppiando la pressione si ha un aumento di $6dB$ del livello di pressione sonora. Per l'aumento del comfort in cabina si può procedere con la riduzione della sound pressure level grazie alla quale è possibile distinguere i suoni in : acuti, alti come un fischio o un sibilo, hanno alti numeri di frequenza; gravi, bassi come il rombo di un motore, hanno bassi numeri di frequenza. La variazione di pressione entro una certa banda di frequenza viene percepita dall'orecchio umano come una sensazione sonora, la banda di frequenze udibili è compresa tra $20Hz$, al disotto si parla di infrasuoni, e i $20kHz$, al di sopra si hanno gli ultrasuoni. La misura della pressione acustica al variare della frequenza a cui l'ascoltatore percepisce l'intensità costante se sottoposta ad un impulso puro è rappresentabile tramite le curve di Fletcher e Munson. Queste curve forniscono

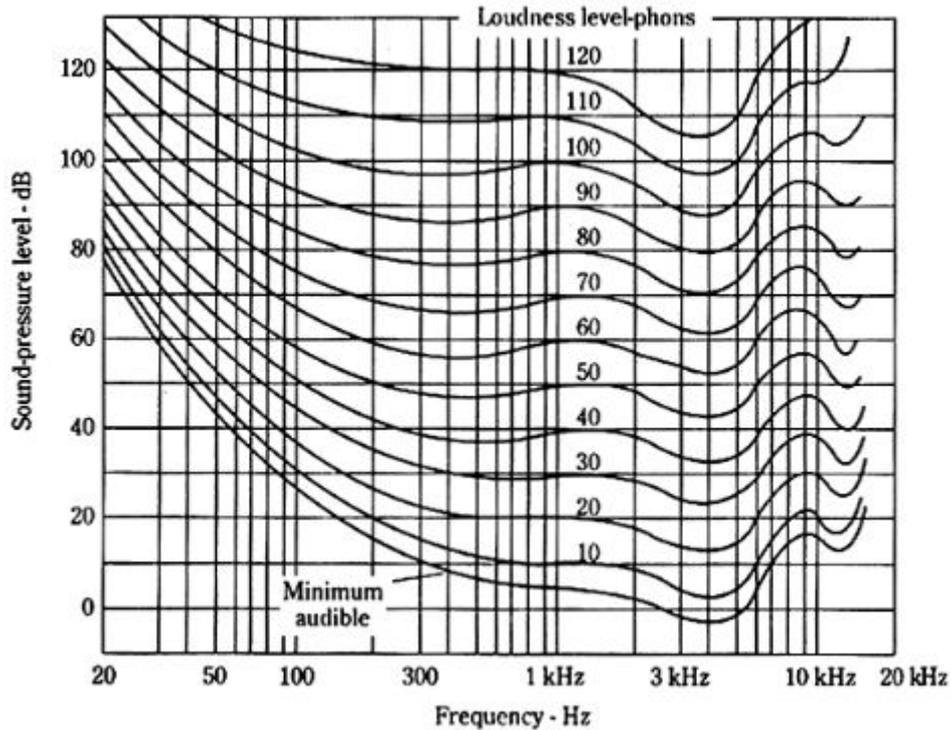


Figura 2.4: Curve di Fletcher e Munson

dati sul comportamento dell'udito umano, grazie a studi compiuti su un gran numero di individui, nel caso di suoni puri con riferimento all'intensità soggettiva, che è legata al livello di pressione e alla frequenza dell'onda sonora. Le curve sono limitate inferiormente da una curva che corrisponde alla soglia di udibilità e superiormente da tre curve: soglia del disturbo, soglia del dolore e soglia del danno uditivo. La zona tra la soglia di udibilità e quella del dolore è detta area di udibilità normale, le due soglie tendono a congiungersi ai due estremi della banda delle frequenze udibili. Per tracciare tali curve sono stati effettuati dei confronti tra una serie di toni puri, sparsi in tutta la banda delle frequenze, e un tono puro di riferimento con frequenza di 1000 Hz. Un tono puro è un'onda sonora perfettamente sinusoidale e dunque interamente caratterizzabile da tre parametri: ampiezza, frequenza, lunghezza d'onda. Ogni curva fornisce un valore diverso del livello di intensità soggettiva, la cui unità di misura è il phon. Si nota come l'orecchio umano è più sensibile alle medie frequenze, che vanno da qualche centinaio a qualche migliaio di Hz, a causa della conformazione del padiglione auricolare che amplifica i suoni solo per una fascia di valori delle frequenze. La regione che sta al di sopra della prima curva, soglia di udibilità: 0phon , e al di sotto dell'ultima curva, soglia del dolore: 120phon , è l'area di udibilità dell'orecchio umano.

2.3 Comportamento delle onde acustiche

La velocità di propagazione delle onde è legata al mezzo in cui avviene la propagazione, pertanto nel passaggio di un'onda da un mezzo ad un altro la velocità di propagazione cambia così come la direzione di propagazione. L'incidenza di un'onda sulla superficie di separazione tra due mezzi dà origine a un'onda riflessa che si propaga all'indietro nello stesso mezzo in cui si propaga l'onda incidente e ad un'onda rifratta che si propaga nel secondo mezzo; quest'onda è anche detta trasmessa dal primo al secondo mezzo. I fenomeni di riflessione e rifrazione nei materiali ordinari sono governate da tre leggi:

- La direzione di propagazione dell'onda incidente, riflessa e rifratta giacciono nello stesso piano di incidenza, individuato dalla direzione di incidenza e dalla normale alla superficie di separazione nel punto di incidenza.
- L'angolo di riflessione è uguale all'angolo di incidenza $\theta_i = \theta_r$
- Il rapporto tra il seno dell'angolo di incidenza e il seno dell'angolo di rifrazione è costante ed è uguale al rapporto tra la velocità di propagazione della radiazione nei due mezzi $\frac{\sin\theta_i}{\sin\theta_r} = \frac{v_1}{v_2}$.

Quando un'onda si propaga da un mezzo con indice di rifrazione N_1 ad un mezzo con indice di rifrazione $N_2 > N_1$ si ha che $\theta_2 < \theta_1$, nell'attraversamento la direzione di propagazione dell'onda piana trasmessa si avvicina alla normale alla superficie. I fenomeni che si manifestano quando un'onda sonora incontra un ostacolo nel suo cammino sono comuni sia alle onde elastiche che elettromagnetiche. La riflessione, diffrazione e trasmissione dipendono dalle proprietà fisiche della superficie di separazione e dai due mezzi, che possono essere entrambi fluidi oppure uno fluido e l'altro solido. I fenomeni di riflessione e trasmissione possono essere trattati con i principi dell'acustica geometrica.

L'intensità sonora incidente I_i incontrando l'ostacolo può:

- tornare indietro perché non in grado di attraversare il mezzo di separazione, si parla di intensità sonora riflessa I_r ,
- essere trasmessa al di là dell'ostacolo, allora si è in presenza di intensità sonora trasmessa I_t .

Si possono definire le seguenti quantità relative al fenomeno appena mostrato:

- coefficiente di riflessione $r = \frac{I_r}{I_i}$ è il rapporto tra l'intensità sonora riflessa e quella incidente,
- coefficiente di trasmissione $\tau = \frac{I_t}{I_i}$ è il rapporto tra l'intensità sonora trasmessa e quella incidente.

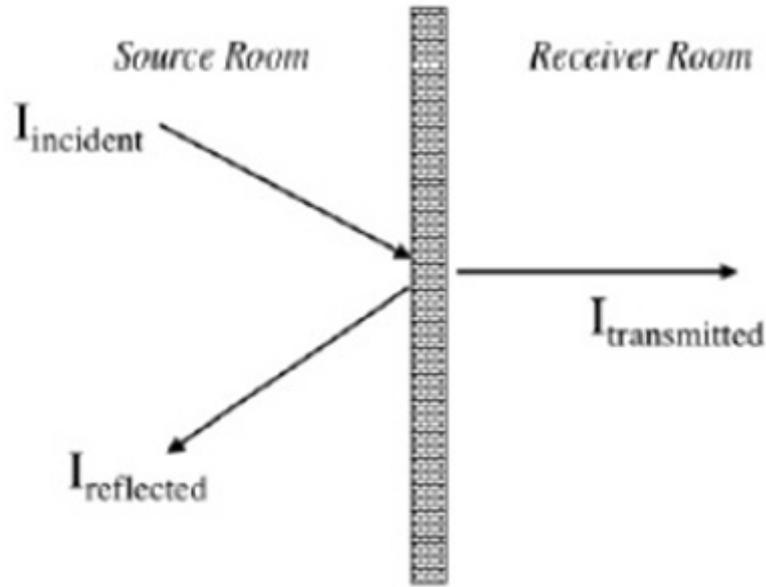


Figura 2.5: Onda sonora che incontra un ostacolo

L'intensità sonora I è la quantità di energia che attraversa una superficie di area unitaria perpendicolare alla direzione di propagazione dell'onda e si misura in $[W/m^2]$, la potenza sonora è: $W = \int I dS$ e si misura in $[W]$. Nel caso in cui la sorgente irradia in modo uniforme in tutte le direzioni:

$$W = 4\pi r^2 I = 4\pi r^2 \frac{\bar{p}^2}{\rho_0 c} \quad (2.25)$$

Un'altra grandezza fondamentale è la densità di energia sonora definita come l'energia contenuta in una unità di volume del mezzo:

$$D = \frac{\langle I \rangle}{c} = \frac{\bar{p}^2}{\rho_0 c^2} \quad (2.26)$$

si misura in $[Ws/m^3]$, rappresenta l'energia che fluisce nell'unità di tempo all'interno del volume individuato dal prodotto dell'area unitaria per la lunghezza percorsa nell'unità di tempo. Nel caso in cui l'onda acustica incontra nel suo cammino un divisorio con un'apertura avviene il fenomeno della diffrazione che dipende dalla dimensione dell'apertura stessa. Per dimensione dell'apertura $d \gg \lambda$, con λ lunghezza d'onda, non avverrà la propagazione dell'onda oltre l'apertura in quanto l'onda è limitata spazialmente; per $d < \lambda$ si ha la propagazione dell'onda anche nella zona d'ombra acustica.

In campo acustico oltre al coefficiente di riflessione e di trasmissione esiste un altro coefficiente molto importante che indica il limite di un materiale di assorbire energia: coefficiente di assorbimento $\alpha = \frac{I_a}{I_i}$, con I_a intensità sonora assorbita e I_i intensità sonora incidente. Se aggregato al coefficiente di trasmissione permettono la definizione di un

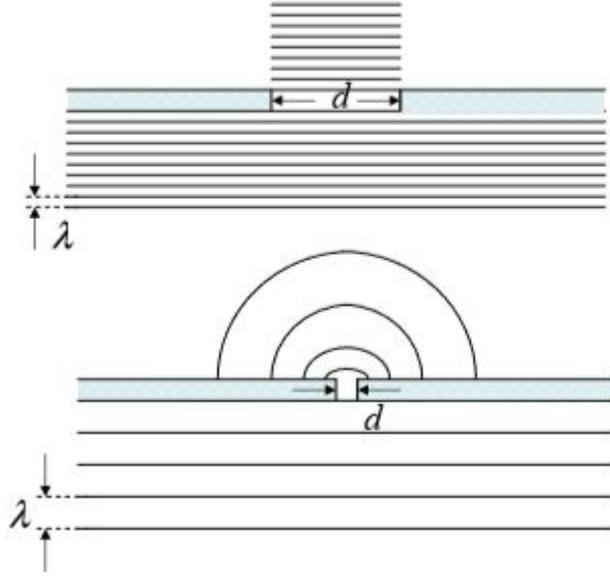


Figura 2.6: Diffrazione al variare della dimensione dell'apertura del divisorio e della lunghezza d'onda

nuovo parametro: il coefficiente di assorbimento apparente:

$$\chi = \frac{I_i - I_r}{I_i} \quad (2.27)$$

che rappresenta l'intensità sonora non riflessa sulla parete. Inoltre, tramite il coefficiente di trasmissione acustica che dipende dalle caratteristiche del materiale che lo costituiscono, dalla direzione dell'incidenza, dalle dimensioni della parete e dalla possibilità dei fenomeni di risonanza a certe frequenze, si può definire un parametro molto importante ai fini di questa tesi: Sound Transmission Loss o semplicemente TL, che indica la perdita di trasmissione del suono attraverso un materiale:

$$TL = 10 \log_{10} \frac{1}{\tau} = 10 \log_{10} \frac{I_i}{I_t} \quad (2.28)$$

è il rapporto in scala logaritmica tra l'intensità sonora incidente $I_i [W/m^2]$ e l'intensità sonora trasmessa $I_t [W/m^2]$, la sua unità di misura è il dB . Altro non è che la capacità di un materiale di assorbire l'energia sonora incidente ad esso e trasmetterne il meno possibile. Per poter avere, infatti, la più alta riduzione del rumore trasmesso in cabina, occorre un alto valore di TL, ciò è possibile attraverso un buon fono-isolamento. Il fono-isolamento è la capacità di un materiale di attenuare la trasmissione del suono, invece, il fono-assorbimento è la capacità del materiale di attenuare la riflessione del suono. Se le onde sonore incidono normalmente alla superficie di un pannello posto come divisorio si dimostra che il potere fono-isolante R che esprime la differenza tra il livello di potenza

sonora incidente e quello trasmesso è:

$$R_n = 20\text{Log}(mf) - 42.3 \quad (2.29)$$

dove m rappresenta la massa specifica del pannello. Questa relazione va sotto il nome di: legge della massa, ad un raddoppio della massa specifica del pannello si ottiene un aumento del potere fono-isolante di $6dB$. Se al posto dell'incidenza normale si considera la tipica incidenza che caratterizza un campo acustico perfettamente diffuso si ottiene:

$$R_d = R_n - 10\text{Log}(0.23R_n) \quad (2.30)$$

Normalmente si ha un campo acustico mediamente diffuso per cui il potere fonoisolante R è esprimibile:

$$R = 20\text{Log}(mf) - 47.2 \quad (2.31)$$

2.4 Materiali acustici

I materiali più utilizzati in acustica per il fono-assorbimento sono quelli porosi, la porosità è uno dei parametri che ne determinano l'efficacia insieme alla densità e alla rigidità strutturale. Tali materiali, tuttavia, permettono l'assorbimento delle alte e medie frequenze. In particolare i materiali porosi e fibrosi vengono utilizzati per l'assorbimento delle alte frequenze, per poter utilizzare questi materiali anche alle basse frequenze si dovrebbero usare spessori troppo elevati, non sono utilizzabili in campo aeronautico. I materiali con cavità vengono applicati per l'assorbimento delle medie frequenze, i pannelli vibranti, invece, per il campo delle basse frequenze. Le prestazioni acustiche dei materiali porosi dipendono da:

- porosità che è il rapporto tra volume di aria contenuta in un campione/volume del campione stesso,
- resistenza che incontra l'aria nell'attraversare il materiale,
- perdita di pressione sulle due facce del campione.

L'assorbimento dipende dalla densità del materiale, più alto è il valore della densità maggiore è la capacità del materiale di assorbire alle varie frequenze. I materiali porosi con elevato coefficiente di assorbimento acustico presentano una resistenza al flusso:

$$1 \leq \frac{R}{\rho_0 c} \leq 2 \quad (2.32)$$

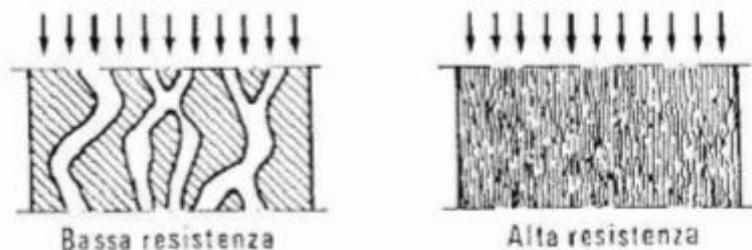


Figura 2.7: Materiali porosi con diversa resistenza al flusso

Se la superficie solida non è porosa l'energia incidente riflette nuovamente nell'ambiente e viene persa. Se la superficie è altamente porosa, invece, una parte dell'onda di pressione penetra nel materiale prima di incontrare una superficie solida. Un elevato numero di riflessioni interne può trasferire energia alla struttura solida attraverso perdite per attrito e assorbire efficacemente il suono. Quando la dimensione dei pori diminuisce viene trasferita meno energia nella struttura solida e un maggior numero viene riflessa dalla superficie, questo rende il materiale meno utile come riduttore del rumore acustico. Ma non tutti i materiali altamente porosi sono dei buoni assorbitori acustici, dipende dal libero cammino medio molecolare. Il regime di flusso in un solido poroso è direttamente correlato alla dimensione dei pori del materiale, permette un'indicazione sulla facilità, o meno, delle onde di pressione di penetrare all'interno del materiale. Il numero di Knudsen caratterizza il regime di flusso nei solidi porosi:

$$K_n = \frac{\lambda}{L} = \frac{k_B T}{\sqrt{2\pi} D^2 P L} \quad (2.33)$$

è il rapporto tra il libero cammino medio molecolare λ e una lunghezza caratteristica L . Gli altri parametri sono: T temperatura, k_B costante di Boltzmann, P pressione, D diametro delle particelle. Le prestazioni di un materiale insonorizzante, cioè assorbente acusticamente, possono essere adattate equilibrando la densità del materiale, la velocità del suono in quel materiale e la porosità. Un esempio di materiale poroso utilizzato come assorbitore acustico sono le schiume. Le schiume sono materiali solidi che presentano un gran numero di bolle di gas per tutto il volume, la loro densità dipende proprio dalla porosità, dalla densità della matrice solida e dalla densità dei gas nei pori. Se i pori del materiale sono grossolani l'onda di pressione lo attraversa con una minima interazione con la struttura, se la porosità è fine la maggior parte dell'energia viene riflessa nell'ambiente. I materiali porosi hanno due fasi:

- componente solido, possibilmente fibroso, che costituisce il telaio stesso del materiale,
- e il componente liquido contenuto nei pori.

I modelli teorici dei materiali porosi sono suddivisi in due categorie: quella in cui si assume il frame rigido e quella che consente il movimento di quest'ultimo. I modelli con il frame rigido consentono la presenza di un'unica onda longitudinale, i disturbi possono propagarsi solo attraverso il fluido. I modelli con frame flessibile invece possono supportare più tipi d'onda contemporaneamente. Per descrivere la propagazione dell'onda sonora in materiali elastici si utilizza la teoria di Biot che è basata sul modello concettuale di matrice solida porosa e fluido libero di muoversi all'interno delle porosità, quindi le due fasi sono connesse. I materiali utilizzati attualmente nell'industria aeronautica presentano delle carenze per la perdita del suono trasmesso in quanto facilitano la trasmissione di quest'ultimo quindi la trasmissione del rumore all'interno della cabina. Anche l'assorbimento delle basse frequenze è un problema perché i materiali porosi permettono di assorbire soltanto le medie/alte frequenze, per poter assorbire le basse frequenze occorrerebbe aumentare notevolmente lo spessore, ma questa soluzione entra in conflitto con le idee base dell'aeronautica. La configurazione tipica delle fusoliere attuali è costituita da pannelli in alluminio rinforzati con materiali di smorzamento come schiume poliammidiche o melamminiche, ma il problema del rumore all'interno della cabina persiste.

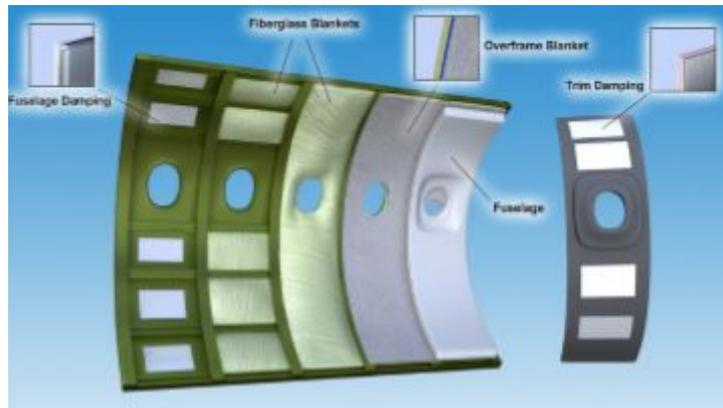


Figura 2.8: Configurazione tipica delle fusoliere

Questo rumore influisce non solo sul comfort dei passeggeri e dell'equipaggio ma anche sulle condizioni di salute, il problema maggiore si riscontra alle basse frequenze ($100-400\text{Hz}$) a causa del loro alto potere penetrante, dove le tecniche passive diventano inefficienti. Il rumore può essere trasmesso in cabina attraverso l'energia sonora e vibratoria che si propaga attraverso la struttura stessa e attraverso l'aria verso le pareti della fusoliera. Lo smorzamento delle vibrazioni avviene quando l'energia acustica viene trasmessa attraverso l'aria e interagisce con una struttura solida, il modo in cui interagisce con l'aria dipende dal materiale.

2.5 Sound Transmission Loss

I materiali hanno due importanti quantità legate al rumore: la capacità di assorbire l'energia acustica α e la capacità di riflettere o bloccare la trasmissione dell'energia sonora TL o τ . Buoni materiali assorbenti, come le schiume a celle aperte, consentono alle fluttuazioni di pressione sonora di penetrare nella loro superficie e dissipare energia per attrito d'aria. La sound transmission loss è una misura ampiamente utilizzata per calcolare la capacità di una struttura di impedire la trasmissione del suono da parte di un materiale posto come ostacolo tra uno spazio e quello adiacente.

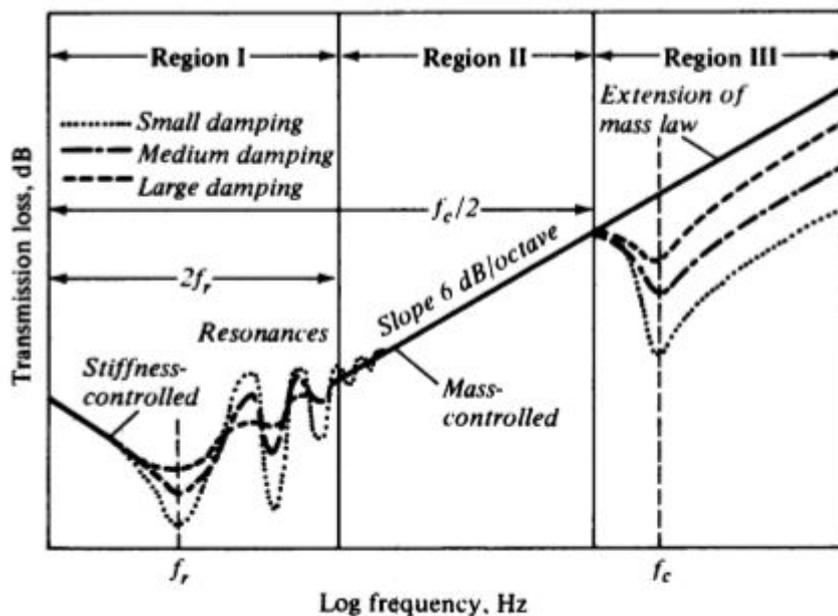


Figura 2.9: Andamento della Sound Trasmission Loss teorica per un pannello omogeneo infinito

Per studiare l'andamento generico della sound transmission loss si usa un pannello omogeneo infinito, il suo comportamento può essere suddiviso in tre regioni fondamentali:

- La regione 1 può essere suddivisa in due zone, entrambe appartenenti alle basse frequenze:
 - la prima in cui la risposta è determinata dalla rigidità statica del pannello. A seconda dello smorzamento interno del pannello si possono verificare risonanze che riducono drasticamente TL;
 - la seconda, in cui la risposta è controllata dalla risonanza che produce variazioni della sound transmission loss. Per ridurre questo effetto occorre che la più bassa frequenza di risonanza sia spostata il più possibile verso le minime frequenze udibili, ciò è ottenibile con elementi di grande massa e scarsa rigidità.

- La regione 2 comprende valori intermedi di frequenza e la risposta è dettata dalla massa del pannello e la curva segue una pendenza di $6dB/ottava$. Raddoppiando la massa, o la frequenza, si ottiene un aumento di $6dB$ della perdita di trasmissione. In questa regione vale:

$$TL_0 = 10 \log \left[1 + \left(\frac{\omega \rho_s}{2\rho c} \right)^2 \right] dB \quad (2.34)$$

dove ω è la frequenza del suono (rad/sec), ρc è l'impedenza caratteristica del mezzo, ρ_s è la massa del pannello per unità di superficie.

- La regione 3 risente dell'effetto della coincidenza con un sensibile abbassamento della sound transmission loss a partire dalla frequenza critica del pannello f_c . Analogamente alla risonanza può aumentare la trasmissione del suono attraverso un pannello sottile caratterizzato da basso smorzamento.

Per il calcolo sperimentale della sound transmission loss il metodo più utilizzato in assoluto è quello delle due camere adiacenti. In una stanza (sorgente) viene posta la sorgente sonora, il materiale da testare viene posto nella parete che suddivide le due stanze, nell'altra stanza (ricevente) viene posto un ricevitore.

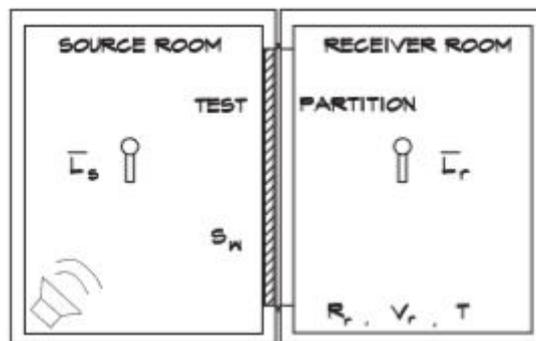


Figura 2.10: Calcolo sperimentale della trasmissione del suono tra stanze adiacenti

L'intensità del suono incidente sul materiale è:

$$I_i = \frac{p^2}{4\rho c} \quad (2.35)$$

dove p è la pressione sonora mediata nella stanza sorgente, nell'ipotesi che il campo sonoro sia diffuso, ρ è la densità dell'aria, c è la velocità del suono nell'aria. Con I_t si indica l'intensità del suono trasmessa attraverso il materiale, viene misurata nella stanza ricevente utilizzando una sonda a due intensità di microfono standard. A questo punto è possibile calcolare il coefficiente di trasmissione come il rapporto tra l'intensità del suono

trasmesso e l'intensità del suono incidente, come indicato prima:

$$\tau = \frac{I_t}{I_i} \quad (2.36)$$

Allo stesso modo è possibile effettuare il calcolo anche della sound transmission loss in dB:

$$TL = 10 \log_{10} \frac{1}{\tau} = 10 \log_{10} \frac{I_i}{I_t} \quad (2.37)$$

Si trova che per un materiale perfettamente riflettente $\tau = 0$ quindi $TL = \infty$. Un altro metodo sperimentale per il calcolo di TL può essere effettuato tramite l'utilizzo della stessa impostazione precedente ma utilizzando la pressione del suono (SPL) per il calcolo e non le intensità sonore come prima. Occorre introdurre un nuovo parametro che viene misurato usando microfoni a pressione: la riduzione del rumore (noise reduction)

$$NR = L_{p1} - L_{p2} \quad (2.38)$$

è la differenza tra il livello di pressione sonora nella stanza sorgente L_{p1} e il livello di pressione sonora nella stanza del ricevitore L_{p2} . Un fattore di correzione dipendente dalla frequenza viene sottratto dal parametro della riduzione del rumore per produrre direttamente TL. Questo fattore di correzione è calcolato usando la legge di massa per un pannello di massa omogeneo. NR viene misurata con il pannello di riferimento posizionato tra le camere e il TL teorico corrispondente è così calcolato:

$$TL_{teorico} = 20 \log_{10} w + 10 \log_{10} f - 47 \quad (2.39)$$

dove w è il peso superficiale del pannello di riferimento in kg/m^2 ed f è il fattore di frequenza in Hz .

I materiali sandwich compositi presentano una buona perdita della trasmissione del suono per questo motivo sono utilizzati nelle fusoliere degli aerei. Occorrono però delle migliorie sui calcoli della sound transmission loss alle basse frequenze in modo da ridurre il rumore all'interno della fusoliera. Si è pensato all'utilizzo di nuovi materiali in grado di poter assorbire le basse frequenze: i metamateriali. Questi materiali vengono realizzati artificialmente ad hoc per il compito che devono svolgere. Occorre tener conto che le prestazioni del materiale, la sua capacità di assorbire le onde acustiche, dipendono dal bilanciamento della densità del materiale stesso e della porosità. Un aumento della densità del materiale deve essere compensato da una diminuzione della velocità del suono o da un aumento della porosità del materiale in modo da poter mantenere le prestazioni invariate.

Metamateriali

Il termine metamateriale fu coniato nel 1999 da Roger M. Walser con la seguente definizione: "E' un composto macroscopico, avente una architettura tridimensionale cellulare periodica e sintetica progettata per produrre una combinazione ottimizzata, non disponibile in natura, di due o più risposte a una specifica sollecitazione." A differenza dei materiali naturali classici, le loro proprietà possono essere facilmente adattate in base alla geometria, alla forma o alla dimensione dei materiali costituenti. Sono composti macroscopici, costituiti da celle elementari definite meta-atomi che possono avere disposizione periodica, presentare simmetria, ma devono avere dimensioni molto più piccole della lunghezza d'onda della radiazione con cui interagiscono. Sono materiali creati artificialmente con proprietà elastiche, acustiche, elettromagnetiche dipendenti più dalla struttura geometrica che direttamente dalla struttura molecolare, cioè dalla composizione. E' proprio questa la più grande differenza con i materiali compositi, i quali sono materiali eterogenei costituiti da due o più fasi con proprietà fisiche differenti che sono migliori delle fasi costituenti, ma le migliori sono dovute soltanto alla composizione chimica. I materiali costituenti sono generalmente assemblaggi di più elementi modulati insieme come metalli, schiume o materie plastiche. Possono presentare permittività elettrica negativa, permeabilità magnetica negativa e anche indice di rifrazione negativo, questa è la proprietà più affascinante. Sono capaci di deviare le onde elettromagnetiche, acustiche e meccaniche ad un angolo completamente diverso da quelli naturali. La ricerca sui metamateriali è cominciata nel 1968 quando uno studioso russo Viktor G. Veselago investigò, solo dal punto di vista teorico, la propagazione di un'onda piana monocromatica in un materiale con entrambi i parametri caratteristici, permittività elettrica e permeabilità magnetica, negativi. Per la realizzazione del primo vero metamateriale si aspettò fino al 1996, quando lo studioso Pendry ne realizzò uno partendo da materiali comuni ma organizzandoli in singoli elementi, meta-atomi, distribuiti periodicamente o random, ed aventi spaziature molto più piccole della lunghezza d'onda della radiazione elettromagnetica con cui interagiscono.

Le proprietà di ogni meta-atomo risultano invisibili alla radiazione elettromagnetica con cui interagiscono, perché la risposta del materiale è influenzata in modo collettivo. Sulla base di queste osservazioni Pendry ha realizzato prima un metamateriale con permittività elettrica negativa tramite array periodici di fili di rame. Successivamente utilizzando split ring resonator è stato in grado di ottenere la permeabilità negativa. Combinando le due strutture si ottenne una configurazione che presentava simultaneamente permittività e permeabilità negative nella regione spettrale delle microonde.

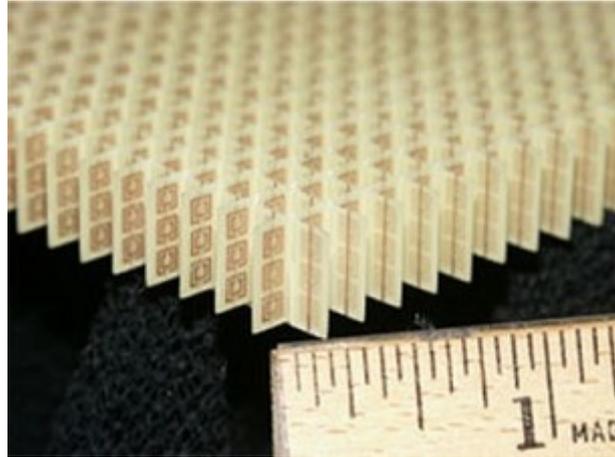


Figura 3.1: Primo esempio di metamateriale proposto da Pendry

Lo stesso Pendry propose l'utilizzo di un metamateriale ad indice di rifrazione negativo come superlente capace di ricreare l'immagine di un oggetto senza perdere informazioni sulla sua struttura, anche al di sotto del limite di diffrazione. In un materiale ad indice di rifrazione negativo le onde evanescenti non sono più esponenzialmente decrescenti ma vengono amplificate; allo stesso tempo le onde propaganti vengono focalizzate automaticamente grazie all'indice di rifrazione negativo. Una superlente è in grado di focalizzare le onde propaganti e quelle evanescenti in un unico punto, superando il limite di diffrazione. In questo caso l'onda possiede un avanzamento di fase invece che un ritardo e le onde evanescenti incrementano in ampiezza appena si allontanano dalla loro origine. I metamateriali possono essere utilizzati in svariati modi e per scopi molto differenti tra loro:

- per l'occultamento dei velivoli o navi ai radar e alla radiazione ottica,
- per la manipolazione di frequenze comprese tra i 300 GHz e 10 THz che non possono essere gestite nè da apparecchiature elettroniche, in quanto la frequenza è troppo alta, nè da apparecchiature ottiche con frequenze basse,
- per guidare le onde termiche e acustiche nel campo dell'isolamento sia termico che acustico,

- per progettare antenne agili, cioè pellicole sottili in grado di ridurre fortemente la dimensione dei circuiti risonanti che generano le microonde,
- per flettere la materia circostante, grazie alle loro proprietà subatomiche, un esempio è la capacità di piegare un proiettile attorno ad una persona piuttosto che assorbire l'impatto come i giubbotti antiproiettile.

Una classe emergente dei metamateriali è rappresentata dai metamateriali iperbolici e chirali che grazie ai parametri ottici estremi offrono flessibilità di design senza precedenti. I metamateriali iperbolici sono nanostrutture artificiali dotate di anisotropia ottica estrema, la progettazione dei parametri ottici può essere facilmente eseguita nell'ambito della teoria del mezzo effettivo semplicemente agendo sullo spessore dei materiali fondamentali e sulla loro frazione di riempimento. I metamateriali chirali sono una nuova classe di metamateriali dove la geometria chirale dell'elemento fondamentale, cioè l'impossibilità di sovrapposizione tra l'oggetto e la sua immagine speculare, genera fenomeni quali il dicroismo circolare o la dispersione rotatoria ottica. Nel 2004 Pendry si accorse come fosse possibile ottenere un indice di rifrazione negativo anche nei mezzi chirali nanostrutturati. Solo intorno agli anni 2000 i ricercatori Shelby, Smith e Schultz, furono in grado di realizzare fisicamente un materiale che presentasse le caratteristiche descritte da Veselago grazie all'utilizzo di Split Ring Resonators (SRRs). Negli ultimi anni sempre più gruppi di ricerca si concentrarono sullo studio e sullo sviluppo di metamateriali con composizioni chimiche e geometriche diverse. Il recente sviluppo di questi materiali non ha ancora permesso una nomenclatura coerente, i nomi per questi materiali sono infatti innumerevoli: "mezzi di Veselago", "left-handed materials LHM", "double negative DNG", "backward media", e così via. La ricerca nel campo dei metamateriali è ancora giovane, le prospettive, le applicazioni, gli esperimenti si arricchiscono costantemente sulla base delle geometrie proposte, l'unico vincolo sembra essere la nostra immaginazione di nuove strutture e nuovi metamateriali. L'utilizzo di questi materiali ha delineato lo sviluppo di componenti elettronici, informatici, elettrici, ottici già esistenti, ma anche la possibilità di utilizzo in altri campi come quello aeronautico con l'utilizzo di metamateriali ottici e acustici.

3.1 Caratteristiche metamateriali

I materiali sia naturali che artificiali possono essere classificati attraverso le proprietà elettromagnetiche, in particolare attraverso due parametri fondamentali: la permeabilità magnetica e la permittività elettrica.

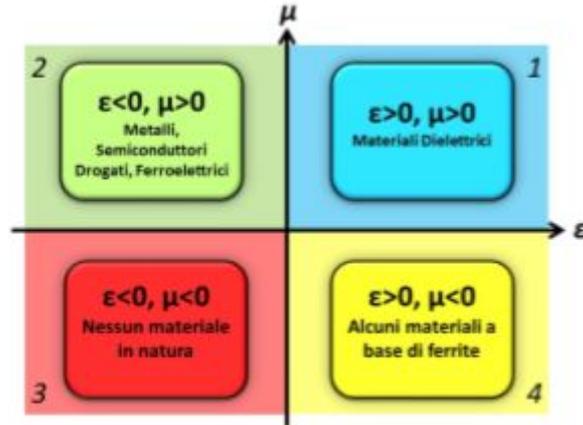


Figura 3.2: Suddivisione dei materiali in base alla permeabilità magnetica e permittività elettrica

La distinzione viene effettuata in base al valore di questi due parametri, nel seguente modo:

- La regione 1, o DPS (double positive medium), in cui entrambi i parametri sono positivi, $\epsilon > 0$ e $\mu > 0$. In questa categoria ritroviamo la maggior parte dei materiali presenti in natura come i dielettrici.
- La regione 2, o ENG (ϵ negative medium), in cui si trovano i materiali con la permittività elettrica negativa e la permeabilità magnetica positiva, $\epsilon < 0$ e $\mu > 0$. Tali caratteristiche sono comuni a molti plasmi in un certo range di frequenze. Fanno parte di questa classe anche alcuni metalli nobili, come l'oro e l'argento, nel range dell'infrarosso e nel dominio delle frequenze del visibile. Appartengono a questa categoria anche i semiconduttori drogati e i ferroeletrici.
- La regione 3, o DNG (double negative medium), è caratterizzata da entrambi i parametri negativi, $\epsilon < 0$ e $\mu < 0$, nessun materiale in natura presenta queste caratteristiche.
- La regione 4, o MNG (μ negative medium), dove le caratteristiche dei materiali sono discordanti la permittività elettrica è positiva ma la permeabilità magnetica è negativa $\epsilon > 0$ e $\mu < 0$, ne fanno parte alcuni materiali girotropici, cioè sono in grado di ruotare il piano di polarizzazione della luce. Fanno parte di questa regione i materiali a base di ferrite.

Le proprietà elettriche e ottiche dei metamateriali dipendono dalla permittività elettrica e dalla permeabilità magnetica. La permittività elettrica:

$$\epsilon = \frac{D}{E} \quad (3.1)$$

con D induzione elettrica e E campo elettrico. Esprime il modo in cui un campo elettrico influenza la disposizione delle cariche elettriche in un mezzo, tenendo conto della polarizzazione elettrica. La permeabilità magnetica:

$$\mu = \frac{B}{H} \quad (3.2)$$

in cui H è il campo magnetico nel materiale e B è l'induzione magnetica. Esprime l'attitudine di un materiale a lasciarsi magnetizzare in presenza di un campo magnetico. I vettori D e H vengono introdotti per tenere conto dei fenomeni che avvengono, in presenza dei campi elettromagnetici, nei mezzi materiali. Le formule vanno modificate a seconda che si trovi in presenza di un mezzo o nel vuoto:

$$\epsilon = \epsilon_0 \epsilon_r \quad (3.3)$$

la costante dielettrica nel vuoto $\epsilon_0 = 8.85 \cdot 10^{-12} F/m$ e ϵ_r nel mezzo.

$$\mu = \mu_0 \mu_r \quad (3.4)$$

la permeabilità magnetica nel vuoto $\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7} Tm/A$ e μ_r nel mezzo. Se il campo elettrico interagisce con il campo magnetico si crea il campo elettromagnetico nel quale la terna destrorsa è dovuta al campo elettrico E , al campo magnetico H e alla direzione di propagazione dell'onda grazie a μ ed ϵ positive. Nei metamateriali essendo questi ultimi due parametri negativi la terna diventa sinistrorsa da qui il nome di materiali LEFT-HANDED. Nei materiali, normalmente, sia μ che ϵ sono positive, esistono alcuni materiali per cui la permittività dielettrica può assumere valori negativi, è il caso dei cristalli fotonici, ma non esiste nessun materiale in natura con entrambi i valori negativi, ciò lo renderebbe opaco alla radiazione elettromagnetica. Se è raro trovare in natura materiali con ϵ o μ negative, è impossibile trovare un materiale che presenti indice di rifrazione negativo: $N = \pm\sqrt{\epsilon\mu}$. Nel caso dei metamateriali con entrambi i valori negativi di permeabilità magnetica e permittività elettrica hanno anche indice di rifrazione negativo, la luce viene rifratta in modo negativo come aveva già ipotizzato Veselago. La risposta sia elettrica che magnetica di un materiale dipendono dalla lunghezza d'onda della radiazione, o dalla sua frequenza, quindi per qualunque materiale ϵ e μ sono espresse da numeri complessi in cui la parte immaginaria è sempre positiva ed è legata alla capacità di assorbimento del materiale, per parte immaginaria negativa il materiale non sarebbe più assorbente ma amplificerebbe la radiazione che passa attraverso di esso. Avere un indice di rifrazione negativo vuol dire avere la legge di Snell opposta:

$$N_1 \text{sen} \theta_1 = N_2 \text{sen} \theta_2 \quad (3.5)$$

La legge di Snell stabilisce che: un raggio di luce che incida sulla superficie di separazione di due mezzi, di indice di rifrazione N_1 e N_2 , con un angolo θ_1 rispetto alla normale alla superficie nel primo mezzo, venga rifratto nel secondo mezzo con un angolo θ_2 . Se N_2 è negativo vuol dire che anche $\sin\theta_2$ deve essere negativo e quindi anche il valore di θ_2 , cioè l'angolo deve essere inclinato rispetto alla normale alla superficie dalla parte opposta rispetto al caso di indice di rifrazione positivo.

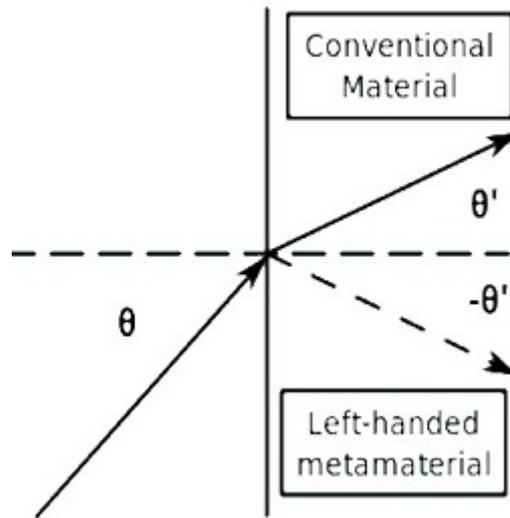


Figura 3.3: Illustrazione grafica della legge di Snell

Altre proprietà dei metamateriali che variano a causa dell'indice di rifrazione negativo, oltre alla legge di Snell, sono:

- Effetto Doppler: cambiamento apparente della frequenza, o della lunghezza d'onda, percepita da un osservatore raggiunto da un'onda emessa da una sorgente in movimento rispetto l'osservatore. Se un osservatore si muove avvicinandosi a una sorgente rileva un'onda di frequenza più alta, se si allontana l'onda ha una frequenza più bassa rispetto a quella naturale emessa.
- Emettono la radiazione elettromagnetica di Cherenkov: le molecole, polarizzate da una particella carica in moto che le attraversa, emettono luce azzurrognola e il mezzo attraversato non è trasparente alla luce visibile. Quando una particella carica attraversa un mezzo denso, viaggiando ad una velocità maggiore di quella della luce nello stesso mezzo avviene la rottura nella simmetria della disposizione atomica, ciò porta alla formazione di un dipolo elettrico, l'energia spesa dalla particella per polarizzare gli atomi viene restituita dal mezzo nel processo che riporta il sistema nello stato fondamentale sottoforma di radiazione coerente.
- Vettore di Poynting, il flusso di energia associato alla propagazione del campo elettromagnetico è antiparallelo alla velocità di fase, cioè i fronti d'onda si muovono in

direzione opposta al flusso di energia.

Per la realizzazione dei metamateriali, le strutture più semplici da realizzare, sono quelle che consentono di ottenere un comportamento da metamateriale nella regione delle microonde. Sono strutture con geometria stripes e split ring resonators (SSR) realizzate con materiali metallici di dimensioni millimetriche. La riflessione o l'assorbimento variano se si utilizzano solo stripes o se ad essi si aggiungono gli SSR o se si utilizzano solo quest'ultimi. La permittività elettrica è una proprietà intrinseca del materiale, ma realizzando delle apposite strutture in metallo o con materiale semiconduttore sulla superficie del mezzo è possibile modificarla. Le strutture impiegate sono fili metallici opportunamente disposti.

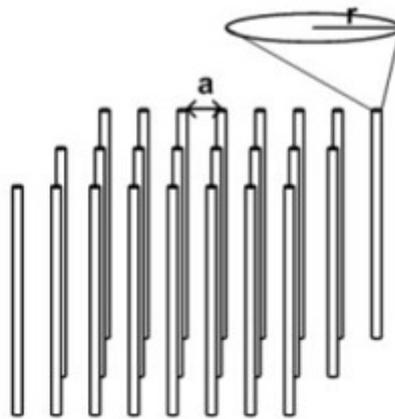


Figura 3.4: Array fili metallici per ottenere la permittività elettrica negativa

Per ottenere, invece, un materiale con permeabilità magnetica negativa, si realizza sulla superficie del mezzo una disposizione periodica di SRR, che interagendo con la radiazione elettromagnetica ne modificano la risposta magnetica. Un SRR è costituito da due anelli concentrici aventi entrambi una fenditura che consente di ottenere una condizione di risonanza a lunghezze d'onda molto maggiori delle dimensioni del diametro dell'anello.

3.2 Metamateriali acustici

I metamateriali acustici sono ancora in via di sviluppo e non hanno ancora avuto applicazioni pratiche come per i metamateriali elettromagnetici, che invece, sono stati studiati ampiamente e sono state proposte diverse soluzioni per vari scopi. L'utilizzo dei metamateriali acustici è stato ipotizzato per risolvere i problemi dovuti alla propagazione del suono, ad esempio per l'attenuazione del rumore. Sono costruiti utilizzando strutture la

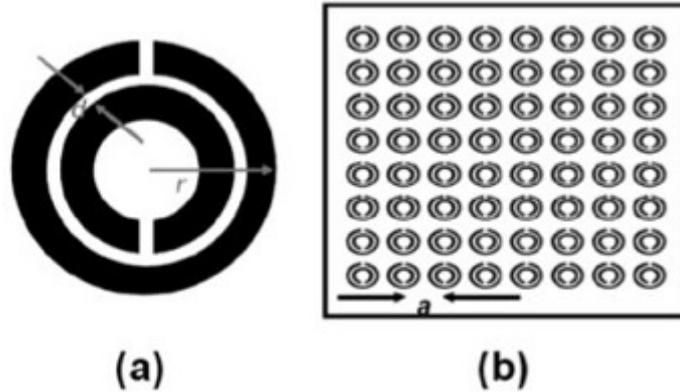


Figura 3.5: Rappresentazione di un singolo split ring resonator e di un suo insieme periodico

cui interazione con le onde acustiche è dominata dal comportamento interno di una singola cellula di una struttura periodica. Per rendere dominante questa risposta, interna al meta-atomo, la sua dimensione deve essere più piccola, di circa dieci volte, della più piccola lunghezza d'onda acustica che viene manipolata. I primi meta-atomi acustici ipotizzati erano nuclei di metallo sferici rivestiti con un involucro di gomma morbida imballato in un reticolo cubico semplice in un materiale ospite. Negli anni si è pensato anche all'utilizzo dei cristalli fononici incorporati in un materiale a matrice omogenea. Questa soluzione è stata ben presto abbandonata perché le dimensioni dei cristalli in grado di assorbire le onde acustiche erano eccessive. Tipicamente i metamateriali acustici sono costruiti come matrici periodiche di elementi di dispersione acustica incorporati in un materiale di matrice omogeneo, anche il materiale scelto per questa tesi ha questa configurazione. Dopo il 2000 la ricerca sui metamateriali ha subito un nuovo impulso grazie ad una ricerca sui materiali sonici risonanti localmente, per produrli sono state rivestite dense sfere di metallo con gomma siliconica morbida racchiuse all'interno di una resina epossidica. Il materiale risultante presentava forti lacune nella banda delle basse frequenze, la struttura creata aveva un reticolo costante con un ordine di grandezza più piccolo della lunghezza d'onda dell'aria. Nel 2008 è stato realizzato un metamateriale acustico con una struttura semplice ma che presentava una massa dinamica negativa, quindi in grado di non rispettare le leggi sulla densità di massa dell'attenuazione del suono nel range 100-1000Hz con un margine di 200 volte. A causa dei moduli elastici deboli della membrana possono esserci oscillazioni anche a basse frequenze anche in un piccolo film elastico con limiti fissi definiti da una griglia rigida. Le frequenze proprie delle vibrazioni possono essere sintonizzate posizionando una piccola massa al centro del campione. Si ottiene riflessione quasi totale con una frequenza tra due autofenodi in cui la media del piano dello spostamento normale è zero. Per migliorare la dissipazione alle basse frequenze solitamente

è necessario aumentare la densità all'interno del materiale, ad esempio attraverso le risonanze. Non esistono ancora strutture risonanti specifiche che mirino all'assorbimento efficiente e subwavelength del suono a bassa frequenza, nonostante già da parecchi anni si parli di metamateriali acustici. Per l'attenuazione del suono a bassa frequenza possono essere utilizzate membrane elastiche sottili con all'interno piastrine rigide, ne derivano metamateriali acustici in grado di assorbire l'86% delle onde acustiche a $170Hz$, con due strati che assorbono il 99% alla modalità di risonanza a bassa frequenza. Il campione realizzato risulta 'oscuro' alle basse frequenze.

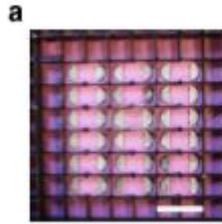


Figura 3.6: Metamateriale acustico con piastrine rigide

3.3 Metamateriale scelto

Nell'ambito del progetto CASTLE (CAbin System design Toward passenger weeLbEing) il materiale acustico da utilizzare per la riduzione del rumore all'interno della cabina deve obbedire ai seguenti criteri:

- Eccellenti proprietà di Sound Transmission Loss nella più ampia gamma possibile
- Leggerezza
- Proprietà ignifughe in accordo con gli standard avionici
- Buona rigidezza
- Facile da realizzare
- Producibile su larga scala per poter avere costi realizzativi minori

I materiali che presentano questi criteri sono le schiume: poliuretaniche, poliammidiche e melamminiche, che hanno buone proprietà ignifughe e buone proprietà acustiche nel dominio delle alte frequenze. Le schiume sono utilizzate spesso come materiali acustici grazie alla loro struttura caratterizzata da un gran numero di bolle di gas intrappolate in tutto il volume. La densità della schiuma dipende dalla porosità, dalla densità scheletrica del materiale della matrice solida e dalla densità del gas nei pori. Per avere delle buone

prestazioni acustiche deve esserci una struttura per trasferire l'energia in un intervallo accettabile di porosità, in modo che le onde sonore possano penetrare abbastanza lontano nella struttura, per consentire interazioni multiple con la stessa. Se i pori sono grossi, l'onda di pressione passerà con una minima interazione con la struttura, se troppo fini la maggior parte dell'energia rifletterà nell'ambiente da una regione nelle immediate vicinanze della superficie, non penetrando nella struttura abbastanza a fondo da subire molteplici interazioni in grado di assorbire una sostanziale frazione di energia.

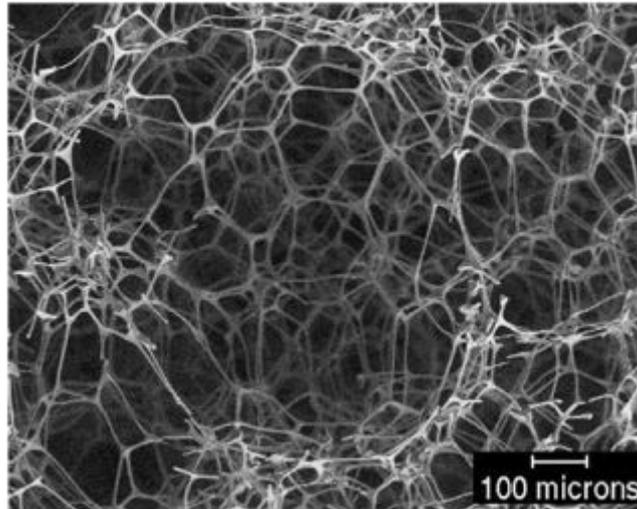


Figura 3.7: Immagine al microscopio della schiuma di melammina

La scelta del materiale acustico è ricaduta sulla schiuma di melammina, materiale ampiamente utilizzato per il fono-assorbimento acustico. Presenta una struttura a celle aperte, il che lo rende leggero, resistente al calore e alle fiamme e ha un processo di fabbricazione ben controllato. Si ottiene schiumando un pre-condensato di melammina-formaldeide mediante riscaldamento. A causa della natura del processo di formazione esiste una direzione verticale le cui proprietà sono suscettibili di differire dalle altre due direzioni, in questo modo viene motivata la simmetria isotropa o ortotropa trasversale. La schiuma di melammina è un espanso flessibile a celle aperte con un alto grado di assorbimento acustico e termico, ha anche una bassa densità che la rende adatta per applicazioni con restrizioni di peso come l'industria aeronautica e ferroviaria. La presenza delle celle aperte migliora le sue capacità assorbenti per la presenza di percorsi interconnessi per l'aria che raggiunge la superficie. E' priva di alogenuri quando esposta al calore estremo o a fiamme libere non emette sottoprodotti tossici. E' un composto eterociclico fortemente azotato. Elementi di schiuma melamminica possono essere applicati nella parete della fusoliera in modo semplice e veloce grazie alla flessibilità del materiale, che si mantiene sia alle alte che basse temperature. Possiede un elevato ritardo di fiamma che consente l'applicazione anche in ambiti con stringenti standard di sicurezza. Questo materiale poro-elastico ha buone

proprietà acustiche nel dominio delle alte frequenze. La curva tensione deformazione della schiuma di melammina è così suddivisa:

- La zona 1 in cui si ha curvatura lineare, è limitata a bassi valori di tensione, le celle della schiuma si piegano e allungano.
- La zona 2 in cui si ha il buckling, lo stress aumenta lentamente con la tensione a causa del buckling delle celle
- La zona 3 è detta di densificazione, le celle collassano completamente e la schiuma si comporta come un materiale solido.

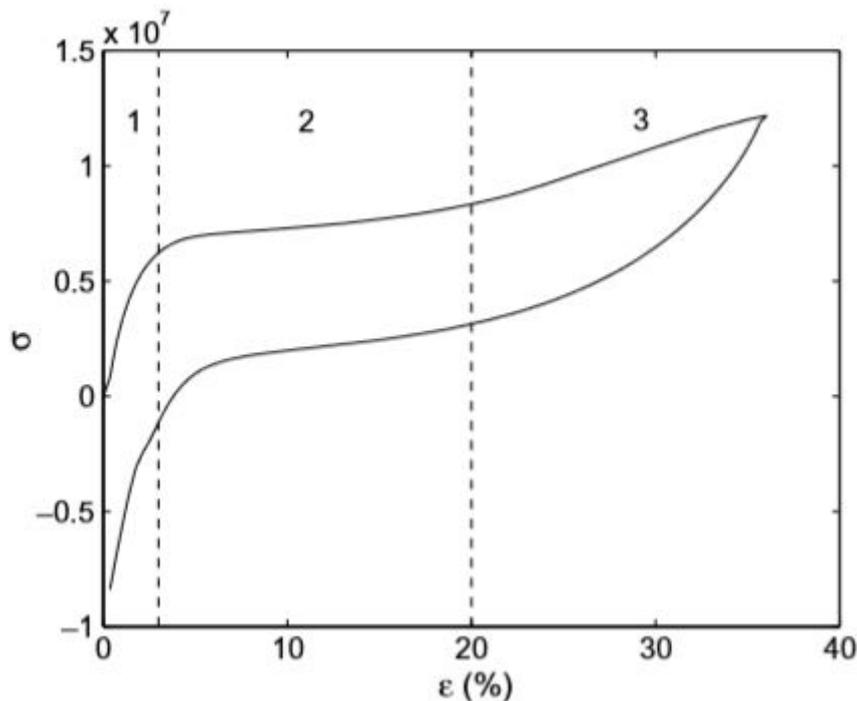


Figura 3.8: Curva stress-strain per la schiuma di melammina a 24

Lo studio approfondito di questo materiale è stato effettuato da Jaouen [2] che ha ottenuto le parti immaginarie e reali delle caratteristiche principali nelle tre direzioni: il modulo di Young (E_1, E_2, E_3), il coefficiente di Poisson ($\nu_{12}, \nu_{13}, \nu_{23}$), il modulo di elasticità tangenziale (G_{12}, G_{13}, G_{23}), ma la gamma di frequenze per cui sono stati calcolati è molto stretta. Modulo di Young:

$$E = \frac{\sigma}{\epsilon} = \frac{\sigma}{\lambda - 1} \quad (3.6)$$

Modulo di elasticità tangenziale:

$$G = \frac{\tau}{\gamma} = \frac{E}{2(1 + \nu)} \quad (3.7)$$

Coefficiente di Poisson:

$$\nu = - \frac{\epsilon_{trasversale}}{\epsilon_{longitudinale}} \quad (3.8)$$

Il metamateriale acustico scelto per il progetto CASTLE è costituito da una matrice di schiuma di melammina, con buone proprietà acustiche alle alte frequenze, e all'interno dei fori sono stati inseriti in modo periodico cilindri in alluminio per poter avere delle buone proprietà acustiche anche nel dominio delle basse frequenze.

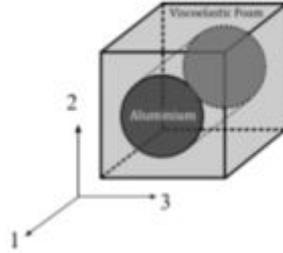


Figura 3.9: Unità periodica del metamateriale con matrice in schiuma di melammina e inclusioni cilindriche di alluminio

La scelta dell'alluminio è dovuta alla sua buona resistenza e leggerezza, in quanto si mira all'aumento delle proprietà di smorzamento del materiale nella gamma delle basse frequenze senza aumentare lo spessore del materiale e aggiungendo il minor peso possibile. Ha un rapporto peso specifico/modulo di Young relativamente alto che potrebbe portare a buone proprietà acustiche rispettando i limiti di peso. Lo smorzamento del materiale diminuisce aggiungendo le inclusioni di alluminio perché quest'ultimo non presenta parti immaginarie. L'omogenizzazione della parte immaginaria equivale ad inserire vuoti nella schiuma, quindi la capacità del materiale di assorbire energia è ridotta. In realtà l'alluminio che si muove contro la schiuma consente di dissipare più energia fornendo ulteriore smorzamento. Per poter studiare il metamateriale acustico scelto occorre omogenizzarlo poiché le proprietà dei metamateriali sono dovute alla disposizione degli atomi dei materiali costituenti e non alla loro composizione chimica. Lo studio su cui si basa l'omogenizzazione adottata è quello di Langlet [10] che si è occupato dello studio di un materiale doppiamente periodico contenente una serie periodica di pori cilindrici.

I fori sono infiniti e paralleli all'asse z , questo rende il problema bidimensionale e dipendente solo dalle coordinate x e y , inoltre è supposto teoricamente infinito anche in queste due direzioni il che lo rende doppiamente periodico. Trattandosi di un materiale periodico l'intero dominio è suddiviso in celle unitarie successive, ognuna contenente un poro cilindrico e una piccola parte del materiale circostante. Per poter convalidare l'ipotesi di omogenizzazione gli studi sono stati condotti su piastre contenenti numeri diversi di fori. Le frequenze di risonanza delle piastre perforate sono determinate con l'aiuto del metodo degli elementi finiti. Il comportamento meccanico dei materiali porosi in particolare

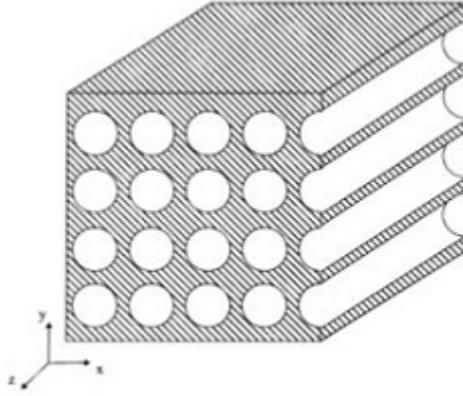


Figura 3.10: Materiale periodico utilizzato da Langlet

schiume polimeriche, che presentano una transizione di fase nei domini della frequenza e della temperatura che generano modifiche alle proprietà elastiche e di smorzamento, è stato studiato da Jaouen. Il comportamento delle schiume è intermedio tra lo stato solido elastico puro e quello liquido viscoso ideale; quindi la risposta meccanica varia in funzione del tempo. Se lo stress è mantenuto costante la tensione aumenta con il tempo (creep), se la tensione è mantenuta costante lo stress diminuisce nel tempo (rilassamento), la rigidità effettiva dipende dall'applicazione del carico, se viene applicato un carico ciclicamente si verifica l'isteresi che porta ad una dissipazione di energia meccanica. Nel caso di materiali porosi acustici, che non subiscono grandi deformazioni, gli studi in letteratura sono limitati alla regione viscoelastica lineare, dove il principio di sovrapposizione di Boltzmann, afferma che la sollecitazione totale applicata a un materiale è la somma di ogni stress generato da ciascuna deformazione, viene verificata. Trattandosi di una piastra di metamateriale in schiuma di melammia ed inclusioni cilindriche di alluminio omogenizzata occorre poter calcolare la Volume fraction, che è il parametro che fa variare le caratteristiche del materiale, in quanto le proprietà dei materiali costituenti rimangono invariate. La frazione in volume esprime l'entità della presenza di un composto chimico in una sostanza, è rappresentato da un numero che varia da 0 cioè totale assenza del composto, a 1 nel caso di composto puro:

$$Vf = \frac{V_{inclusione}}{V_{totale}} \quad (3.9)$$

Variando tale parametro variano sia la sound transmission loss sia la densità del materiale. Il suo effetto nella parte reale del modulo di Young lungo z è maggiore rispetto al modulo lungo le altre due direzioni: x e y . Più è alta la frazione del volume più alta è la parte reale del modulo di Young. Per la parte immaginaria avviene il contrario, ad una diminuzione dell'inclusione Vf corrisponde una maggiore componente del materiale viscoelastico all'interno del metamateriale.

x [mm]	y [mm]	z [mm]	fori[mm]
309	206	20	7

Tabella 3.1: Dimensioni metamateriale in esame

La piastra può presentare pochi fori grandi o un maggior numero di fori piccoli, ma quanto più piccola è la dimensione della cella unitaria rispetto alla piastra tanto migliore è il risultato dell'omogenizzazione. I vuoti cilindrici della schiuma melammina sono stati riempiti con alluminio con proprietà isotrope. La densità della schiuma di melammina

$E[Pa]$	ν	$\rho[kg/m^3]$
$6.75 \cdot 10^{10}$	0.34	2700

Tabella 3.2: Proprietà alluminio

viene approssimata a $\rho_M = 8kg/m^3$, la densità efficiente del materiale omogenizzato è:

$$\rho_{eff} = \rho_M(1 - V_f) + \rho_{Al}V_f \quad (3.10)$$

Il peso specifico dei materiali dipende direttamente dalla densità:

$$peso = \rho \cdot g \quad (3.11)$$

con $g = 9.82m/s^2$ accelerazione di gravità. Quindi un maggior valore della frazione in volume del materiale corrisponderà ad un maggior valore della densità e quindi del peso del materiale. Risulta quindi essenziale l'omogenizzazione della piastra del metamateriale ai fini delle analisi acustiche. Il metodo della piastra omogenizzata si basa sulle teorie di Layer-Wise di ordine superiore nel framework di Carrera Unified Formulation (CUF) che è più preciso delle teorie 2D classiche e meno costoso dei solidi 3D. Si è in grado di omogenizzare il materiale conoscendo solo la geometria della cella unitaria e le proprietà dei materiali che lo compongono. Il metodo si basa sul Mechanics of Structure Genome (MSG), che è identico al concetto di Unità cellulare come il più piccolo blocco matematico della struttura. MSG si basa anche sul Variation Asymptotic Method (VAM) per minimizzare la perdita di informazioni tra la cellula eterogenea e il corpo omogeneo equivalente. Il progetto CASTLE oltre a definire le specifiche del materiale da poter utilizzare ha anche imposto un vincolo sulla densità, il valore ammissibile è $\rho = 48kg/m^3$ che è la densità del Nomex, sostanza a base di meta-aramide resistente alle fiamme. Il NO-MEX è un materiale a celle esagonali utilizzato come anima per materiali sandwich con un rapporto resistenza/peso molto elevato. Viene utilizzato in campo aeronautico per la realizzazione di ultra-leggeri grazie al suo peso contenuto. Il valore della volume fraction non solo influisce sulla densità e quindi sul peso del materiale, come descritto precedentemente, ma anche sulla capacità di riduzione del rumore trasmesso: sound transmission

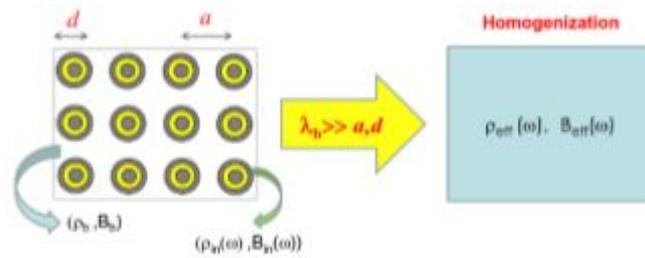


Figura 3.11: Piastra con inclusioni ed omogenizzata

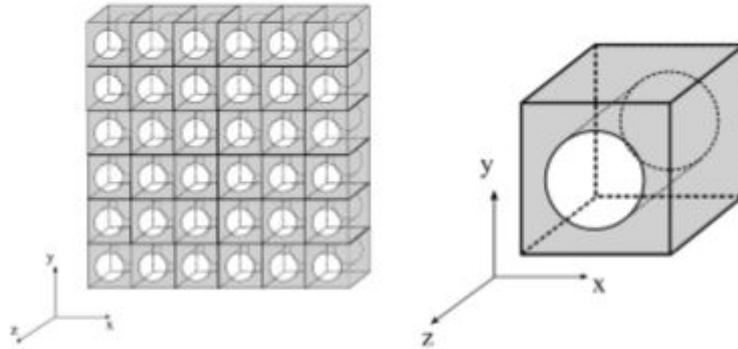


Figura 3.12: Piastra con ripetizioni periodiche di celle unitarie forate e singola cella unitaria

loss. Dopo aver scelto il metamateriale da utilizzare occorre effettuare l'ottimizzazione per ottenere un metamateriale acustico per applicazioni aeronautiche, in particolare bisogna agire sulla frazione in volume per trovare il punto di ottimo per cui la densità rispetti il vincolo imposto e il valore della sound transmission loss sia il più alto possibile. Per poter effettuare l'ottimizzazione si è scelto di utilizzare il software Optimus in cui l'unico parametro che varierà nella piastra omogenizzata sarà la volume fraction, le altre caratteristiche del materiale quali modulo di Young, coefficiente di Poisson e modulo di elasticità di taglio riguardanti i materiali costituenti non saranno modificati.

Ottimizzazione

I problemi di ottimizzazione sono comuni in molte discipline, per la loro risoluzione occorre trovare soluzioni che siano ottimali o quasi rispetto ad alcuni obiettivi. Questi problemi hanno le seguenti caratteristiche:

- sono disponibili alternative decisionali diverse
- i vincoli aggiuntivi limitano il numero di alternative decisionali disponibili
- ogni alternativa decisionale può avere un effetto diverso sui criteri di valutazione

Per i problemi di ottimizzazione dovrebbe essere scelta un'alternativa decisionale che tenga conto di tutti i vincoli e minimizza o massimizza la funzione di valutazione. Per poter avere una buona ottimizzazione occorre una pianificazione, tale processo prevede diversi passaggi:

- riconoscimento del problema
- definizione del problema
- costruzione di un modello idoneo per il problema
- risoluzione del modello
- convalida delle soluzioni ottenute
- implementazione di una soluzione

Una soluzione globalmente ottimale per un problema di ottimizzazione è definita come la soluzione: $x^* \in X$, dove $f(x^*) \leq f(x)$ per tutte le $x \in X$, problema di minimizzazione. Per la definizione di una soluzione ottimale globalmente non è necessario definire la struttura dello spazio di ricerca. Dato un problema ad esempio: (X, f) e una funzione

contorno N , una soluzione ammissibile $x \in X$ è chiamata localmente ottimale, problema di minimizzazione, rispetto a N se $f(x') \leq f(x)$ per tutti gli $x \in N(x')$. Le funzioni localmente ottimali sono definiti solo se viene definito il contorno. Lo scopo degli algoritmi di ottimizzazione è trovare soluzioni di alta qualità per un problema, identificare soluzioni ottimali x^* , soluzioni quasi ottimali $x \in X$, dove $f(x) - f(x^*)$ è piccola, o almeno soluzioni localmente ottimali. La difficoltà del problema descrive quanto sia difficile trovare una soluzione ottimale, per un problema specifico ed è definita indipendentemente dal metodo di ottimizzazione utilizzato. L'obiettivo dell'ottimizzazione è trovare la soluzione migliore nei modelli decisionali, che possono avere una moltitudine di opzioni globali e locali. L'ottimizzazione è un'area di ricerca attiva, con una vasta gamma di importanti applicazioni in ingegneria, economia e scienze. Studia i metodi per la ricerca dei punti di massimo e minimo di una funzione matematica, creando un modello matematico che traduce in termini matematici un dato problema. L'ottimizzazione può essere suddivisa in dinamica e statica, nella prima i vincoli e le variabili che esprimono il modello del problema possono variare nel tempo; nella statica sono costanti. La statica si divide a sua volta in continua e discreta. Nel campo dell'ottimizzazione gli algoritmi evolutivi imitano le procedure dell'evoluzione per trovare il massimo della funzione. Gli algoritmi evolutivi hanno un campo di ricerca interdisciplinare, che va dalla biologia all'intelligenza artificiale e sono metodi basati sul paradigma evolutivo darwiniano. Tutti gli algoritmi evolutivi condividono un certo numero di proprietà comuni:

- Processo di apprendimento collettivo di una popolazione di individui. Ogni individuo rappresenta un punto di ricerca nello spazio di potenziali soluzioni a un determinato problema.
- I discendenti degli individui sono generati da processi randomizzati intesi a modellare la mutazione, erronea auto-espressione degli individui, e la ricombinazione, scambio di informazioni tra due o più individui esistenti.
- E' possibile un confronto tra l'idoneità individuale e una decisione binaria. Secondo la misura di idoneità il processo di selezione, favorisce le persone migliori a riprodursi più spesso di quelle relativamente peggiori.

In matematica l'ottimizzazione si riferisce allo studio dei problemi con tale forma:

- data la funzione $f : \mathfrak{R}^n \rightarrow \mathfrak{R}$ da $A \subseteq \mathfrak{R}^n$ al numero reale
- l'obiettivo è la ricerca dell'elemento $x^* \in A$ tale che $f(x^*) \leq f(x)$ per tutti gli $x \in A$ ("min") oppure tale che $f(x^*) \geq f(x)$ per tutti gli $x \in A$ ("max").

Tipicamente A è un sottoinsieme dello spazio euclideo \mathfrak{R}^n , spesso presenta una serie di vincoli, uguaglianze o disuguaglianze che i membri di A devono soddisfare. Gli elementi di

A che soddisfano tutti i vincoli sono chiamati soluzioni fattibili. La funzione f è chiamata funzione obiettivo o funzione di costo. Una soluzione fattibile che minimizza, o massimizza, la funzione obiettivo è chiamata soluzione ottimale. In generale, ci saranno diversi minimi e massimi locali, dove su qualche intorno di x^* tutti i valori delle funzioni sono maggiori o uguali al valore in quel punto. Il tipo più flessibile di ottimizzazione strutturale è l'ottimizzazione della topologia, che consente non solo il cambiamento di forma, ma anche cambiamenti che includono l'aumento del numero, la posizione e la forma dei fori nel dominio di progettazione. Tale metodo è stato applicato a una varietà di problemi: massimizzazione della rigidità, problemi elettromagnetici, e recentemente metamateriali elettromagnetici. L'idea di base dell'ottimizzazione topologica sono: l'estensione del dominio di progettazione a un dominio di progettazione fissa e la sostituzione del problema di ottimizzazione con il problema di distribuzione del materiale nel dominio di progettazione fissa utilizzando la funzione caratteristica. Tra gli approcci di ottimizzazione strutturale, quella topologica offre il massimo grado di libertà di progettazione, oltre ai livelli elevati di prestazioni, poiché la topologia e la forma delle strutture target può essere evoluta durante il processo di ottimizzazione. Il metodo di distribuzione del materiale nell'ottimizzazione della topologia è stato esaminato in un gran numero di esempi: problemi acustici, liquidi, elettromagnetici, metamateriali. Questi metodi possono generare efficientemente topologie ottimali e forme ottimali, facilitare la progettazione di strutture pratiche e ottimizzare le condizioni di supporto; inoltre si sono mostrati come metodi affidabili e flessibili. Negli ultimi anni questa metodologia è diventata diffusa in ambito automobilistico, ma fin'ora non ci sono applicazioni per la progettazione di metamateriali acustici. In questa tesi ci occuperemo dell'ottimizzazione dei pannelli in metamateriale omogenizzato di schiuma di melammina e inclusioni cilindriche in alluminio per l'attenuazione del rumore in cabina. Questo sarà possibile modificando la topologia del pannello, cioè modificando il volume delle inclusioni. Per la realizzazione dell'ottimizzazione è stato scelto il software Optimus.

4.1 Teoria OPTIMUS

Optimus è un marchio Noesis Solution NV, fornitore leader nel mercato di Process Integration e Multi-disciplinary Design Optimization. Permette la visualizzazione ed esplorazione automatica dello spazio di progettazione e l'acquisizione delle intuizioni critiche nelle dinamiche del problema. Si è in grado di trovare in modo intelligente il punto ottimale nello spazio di progettazione, utilizzando una combinazione di metodi dei gradienti per un'analisi rapida o algoritmi genetici allo stato dell'arte. Optimus, inoltre, è in grado di automatizzare e monitorare l'intero processo, è un software aperto in grado di comunicare con prodotti software CAE e di accedere a file di input/output in modo interattivo.

- Risponde alla vera sfida ingegneristica: "Quale design soddisfa al meglio gli obiettivi?"
- Si basa su procedure di analisi di successo aggiungendo valore alle tecnologie di simulazione esistenti.

La simulazione è essenziale per predire il comportamento dei sistemi fisici, favorendo una riduzione dei costi in settori come l'ingegneria aeronautica e favorendo l'analisi di sistemi di progettazione complessi. Invece di ottimizzare la semplice espressione matematica l'obiettivo diventa il modello di simulazione. In questo modo il processo di simulazione è basato sull'ottimizzazione e regola le variabili di input del modello di simulazione per trovare il miglior risultato possibile. I metodi offerti dal programma per l'ottimizzazione dei processi sono: Design of Experiments (DOE) e Numerical Optimization.

4.1.1 Design of Experiments

Design of Experiments o semplicemente DOE è un approccio sistematico per ottenere la massima quantità di informazioni da vari tipi di esperimenti, riducendo al minimo il numero di esperimenti eseguiti. E' ampiamente utilizzato nella ricerca e nelle applicazioni industriali, dove l'obiettivo principale è quello di estrarre la massima quantità di informazioni imparziali, relative ai fattori che influenzano un processo di produzione dal minor numero possibile di osservazioni. Insieme ad esso si ha anche il Response Surface Modeling (RSM), una raccolta di tecniche matematiche e statistiche utili per la modellazione e l'analisi di problemi in cui una risposta di interesse è influenzata da diverse variabili. Utilizzando i metodi DOE insieme a quelli RSM la risposta tra le variabili dei punti di progetto può essere prevista in modo efficiente. Questi due metodi sono strettamente correlati e non devono essere per forza eseguiti separatamente. Il metodo DOE inizia con la determinazione degli obiettivi di un esperimento virtuale e la selezione dei fattori per lo studio. I progetti sperimentali ben scelti massimizzano la quantità di informazioni che possono essere ottenute per una determinata quantità di sforzo sperimentale. Questi metodi possono essere classificati in: design ortogonale e design casuale.

- Si parla di design ortogonale quando i parametri del modello sono statisticamente indipendenti. Cioè i fattori in un esperimento non sono correlati e possono essere variati indipendentemente l'uno dall'altro. Il metodo più utilizzato è il full factorial, ma presenta alcuni svantaggi, inizialmente non è chiaro quale fattore sia importante e quale no. Si può incorrere nel problema del collasso cioè alcuni dei punti iniziali del progetto collassano e uno o più degli esperimenti diventano inutili.

- Si parla di design casuale quando il valore dei parametri del modello che scegliamo per gli esperimenti si basa su di un processo casuale. Il più utilizzato è il Latin Hypercube Designs, non presentano il problema del collasso, anche se uno o più fattori sembrano non essere importanti ogni punto del progetto fornisce ancora informazioni sull'influenza degli altri fattori sulla risposta.

Di seguito vengono introdotti brevemente i metodi che possono essere implementati all'interno di Optimus, per il calcolo del Design of Experiments ortogonale:

- FULL FACTORIAL DESIGN: Ogni impostazione di ogni fattore appare con le impostazioni di ogni altro fattore, è un design fattoriale completo. Il numero degli esperimenti necessari è:

$$N = \prod_{i=1}^k n_i \quad (4.1)$$

dove N è il numero di esperimenti richiesti, k è il numero dei fattori e n_i è il numero di livelli per un determinato fattore i . In questo metodo vengono analizzati contemporaneamente gli effetti di più fattori, dove ciascun fattore è indipendente dagli altri. Considera anche gli effetti di interazione da 2 ad n tra tutte le combinazioni di fattori. Lo svantaggio di questo metodo è che il numero di esperimenti aumenta esponenzialmente e il costo è elevato. Per ovviare a questo problema si può ridurre il numero di livelli per ciascun fattore, ridurre il numero di fattori oppure utilizzare un design fattoriale frazionario.

- TWO LEVEL FULL FACTORIAL: Il design fattoriale completo a due livelli è un progetto sperimentale comune con tutti i fattori di input impostati su due livelli ciascuno. I livelli sono chiamati alto e basso e il numero degli esperimenti è 2^K , ma il massimo dei fattori utilizzabili è 7.

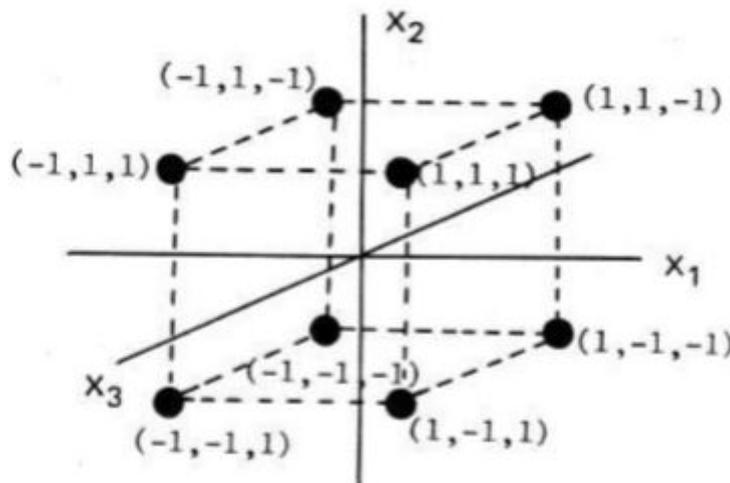


Figura 4.2: Two level full factorial design per 3 fattori

- **THREE LEVEL FULL FACTORIAL:** Viene utilizzato se il problema è di secondo ordine e il numero di esperimenti è pari a 3^K con un massimo di 7 fattori.

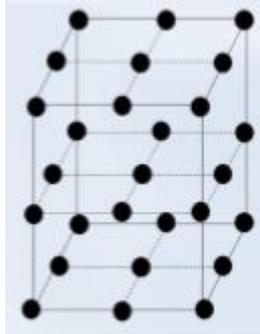


Figura 4.3: Three level full factorial design

- **ADJUSTABLE FULL FACTORIAL:** Permette di impostare diversi livelli per ciascun fattore, richiede un gran numero di esperimenti e non è molto efficiente.
- **FRACTIONAL FACTORIAL DESIGN:** E' un sottoinsieme adeguatamente scelto di un design fattoriale completo. Il numero di esperimenti equivale a $N = 2^{(k-p)}$ con k il numero dei fattori, p il numero intero più piccolo di k . Anche nel caso di pochi fattori gli esperimenti possono diventare rapidamente molto grandi. Per ovviare a questo problema si può utilizzare solo una frazione delle esecuzioni specificate dal design fattoriale completo. Per la scelta delle frazioni da utilizzare si possono seguire diversi metodi.

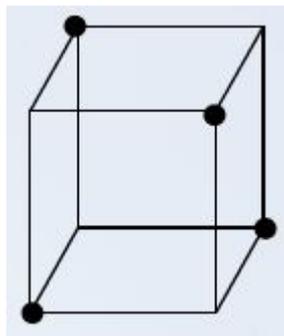


Figura 4.4: Fractional factorial design

- **TAGUCHI DESIGN:** Utilizza progetti fattoriale frazionati a due-tre livelli o misti. Sistemi di matrici consentono di stimare il numero massimo di effetti principali in modo imparziale con un numero di esperimenti.

Il metodo DOE random più utilizzato è il LATIN-HYPERCUBE DESIGN, essendo n il numero di punti di design che si vogliono simulare ogni parametro di progetto viene suddiviso in n livelli equidistanti. Non presenta il problema del collasso, in quanto se

uno o più fattori sembrano non essere importanti, ogni punto del progetto fornisce ancora informazioni sull'influenza degli altri fattori sulla risposta. Un modo efficace per costruire un LHD è quello di assegnare i livelli in modo che lo spazio si riempia e non ci siano punti raggruppati in una sola regione. Come distanza si può prendere la distanza minima tra due punti, più è grande tale distanza migliore è il design. La complessità del metodo è dovuta al modello scelto. Nella progettazione tradizionale i campioni da valutare sono

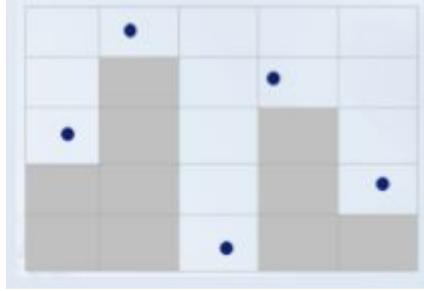


Figura 4.5: Latin-hypercube design

scelti tutti allo stesso momento, così come il design è scelto in base alle informazioni disponibili prima della simulazione, così come la sensibilità dei parametri e la precisione della misurazione. Tuttavia non è facile avere tali informazioni, quindi la maggior parte delle volte il modello simulato è una scatola nera e non permette di conoscere in precedenza il numero degli esperimenti da effettuare. Grazie al metodo ADAPTIVE DOE, essendo un design sequenziale, i dati da valutare sono quelli della precedente iterazione in modo da selezionare nuovi campioni solo nell'area di interesse. Inoltre è possibile interromperla in qualsiasi momento perché è un processo iterativo. Precedentemente si è già introdotto il concetto di RESPONSE SURFACE MODELLING, adesso ne verrà data una spiegazione un pò più esaustiva. RSM è una iper-superficie di risposta che descrive la relazione tra i fattori sperimentali, input, e i valori di una o più risposte misurabili, output. Una volta eseguito un DOE viene generato un modello di risposta, per adattarsi ai risultati sperimentali per ottenere una migliore comprensione del problema di progettazione. In optimus sono implementati due tipi di RSM: Least Squares Fitting e Interpolation.

- Least Squares Fitting è una procedura matematica per trovare la curva più adatta a un dato insieme di punti, riducendo al minimo la somma dei quadrati dell'errore dei punti della curva, tuttavia i punti periferici possono avere un effetto sproporzionato sull'andamento.
- Interpolation è un metodo per costruire nuovi punti dati da un insieme discreto di punti dati noti. E' un caso specifico di adattamento della curva in cui la funzione deve passare esattamente attraverso i punti dati.

Esistono molti metodi di interpolazione: lineare, polinomiale, spline; in Optimus per l'interpolazione vengono utilizzati i metodi Kriging e Radial Basis Functions. Il metodo

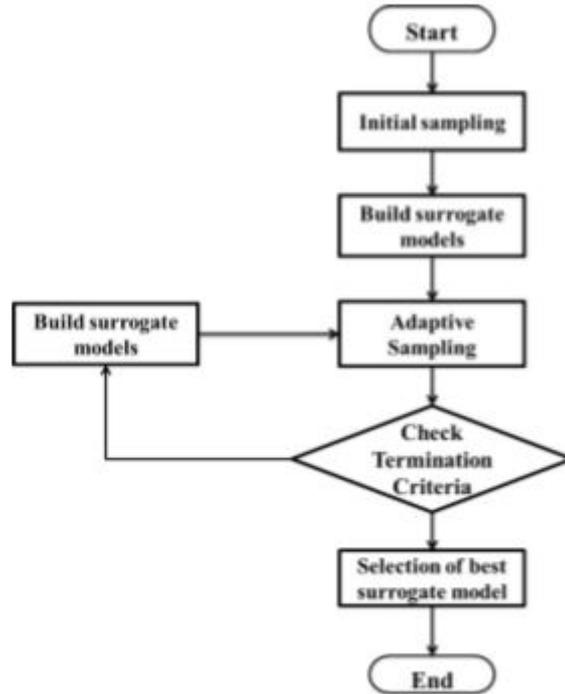


Figura 4.6: Adaptive DOE Flow chart

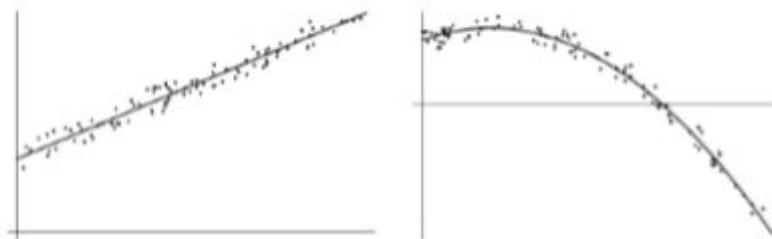


Figura 4.7: Esempio di Least Squares Fitting

Kriging è un metodo di interpolazione stocastico, consiste in una routine di regressione lineare che minimizza la varianza della stima di un modello di covarianza predefinito. Per descrivere Radial Basis Functions viene riportato un esempio: una funzione di valore reale $f(x)$ deve essere approssimata da $s(x)$, dato un insieme di valori $f = (f_1, \dots, f_N)$ nei punti distinti $X = x_1, \dots, x_n \subset \mathfrak{R}^d$. Questo problema può essere risolto dalla Radial Basis Functions:

$$s(x) = p(x) + \sum_{i=1}^N \lambda_i \Phi(|x - x_i|) \quad (4.2)$$

con $x \in \mathfrak{R}^d$, p è il polinomio di grado massimo k , λ_i è il peso del valore reale, $|\cdot|$ denota la norma euclidea, Φ è la funzione base. RBF è definito come somma ponderata di traslazioni di una funzione di base radialmente simmetrica aumentata di un termine polinomiale. La funzione base è una funzione reale di un reale r , con r distanza dall'origine. Le scelte più frequenti per questa funzione sono:

- Funzione Lineare $\Phi(r) = r$, chiamata anche biarmonica: spline + polinomiale lineare;
- Funzione Cubica $\Phi(r) = r^3$, chiamata anche triarmonica: spline+ polinomiale quadratica;
- Spline placca-sottile: $\Phi(r) = r^2 \log(r)$;
- Funzione Multi-quadratica $\Phi(r) = \sqrt{r^2 + \gamma^2}$, con γ parametro di forma.

Le spline poliarmoniche, che includono tutte le funzioni sopra elencate tranne l'ultima, sono interpolatori fluidi. Le funzioni di base associate non sono supportate in modo compatto, crescono man mano che r aumenta dall'origine.

4.1.2 Numerical Optimization

L'ottimizzazione numerica a causa delle innumerevoli funzioni obiettivo che si possono presentare viene suddivisa in :

- Single-objective optimization, contiene un singolo obiettivo che deve essere ottimizzato, trova la posizione ottimale nel dominio che soddisfa tutti i requisiti.
- Multi-objective optimization, molteplici obiettivi da ottimizzare.

Può essere effettuata un'ulteriore suddivisione:

- Local optimization methods: si cerca un optimum basato sulle informazioni locali, gradiente o geometria, del problema di ottimizzazione, ci si aspetta che i metodi convergano a qualsiasi ottimo locale che si avvicini all'approssimazione iniziale. Il vantaggio è la velocità di convergenza, ma l'optimum trovato è normalmente un ottimo locale vicino alla posizione di partenza, in quanto questi metodi non sono in grado di uscire dall'ottimo locale.
- Global optimization methods: l'optimum viene cercato in base alle informazioni globali del problema di ottimizzazione, sono metodi di ricerca basati sulle probabilità. Ha il compito di trovare il set migliore di variabili di input per ottimizzare una funzione obiettivo.

Esistono diversi metodi globali di ottimizzazione: deterministici (bound method), stocastici (Monte-Carlo) ed euristici (algoritmi evolutivi). In Optimus la maggior parte dei metodi di ottimizzazione globali sono euristici, metodi di ricerca basati sulla probabilità e sulla ricerca dello spazio di progettazione. Sono in grado, con buone probabilità, di trovare l'optimum globale in quanto utilizzano informazioni globali per la ricerca, ma hanno

un costo computazionale elevato. Avendo diversi obiettivi da ottimizzare in questa tesi verrà utilizzato il Multiobjective optimization:

$$\min f(x) = (f_1(x), \dots, f_k(x))^t \quad (4.3)$$

con $x \in \mathfrak{R}^n$ ed inoltre $g(x) \geq 0$ con $g : \mathfrak{R}^n \rightarrow \mathfrak{R}$, $h(x) = 0$ con $h : \mathfrak{R}^n \rightarrow \mathfrak{R}$, $x_i \leq x \leq x_u$ con $x_i, x_u \in \mathfrak{R}^n$. Gli algoritmi di ottimizzazione multi obiettivo consentono di eseguire ottimizzazioni tenendo conto di più obiettivi contemporaneamente. Ogni obiettivo può essere una minimizzazione o massimizzazione di un output. All'interno di Optimus si hanno una serie di metodi che sono in grado di costruire la linea di frontiera Pareto del problema di ottimizzazione multiobiettivo e una serie di metodi che troveranno una soluzione di compromesso tra i diversi obiettivi. Cos'è la linea Pareto? Segna il limite oltre il quale il design non può essere migliorato, cioè la fine della regione ammissibile e l'inizio della regione irrealizzabile. E' il confine tra la regione dei punti di progettazione per i quali tutti i vincoli sono soddisfatti e la regione dei punti non realizzabili per i quali i vincoli non sono soddisfatti. L'obiettivo dei diversi metodi che generano la linea di Pareto è trovare un numero di punti sulla linea assegnando pesi diversi ai diversi obiettivi, tale linea divide nettamente i valori fattibili da quelli infattibili. I metodi per la realizzazione

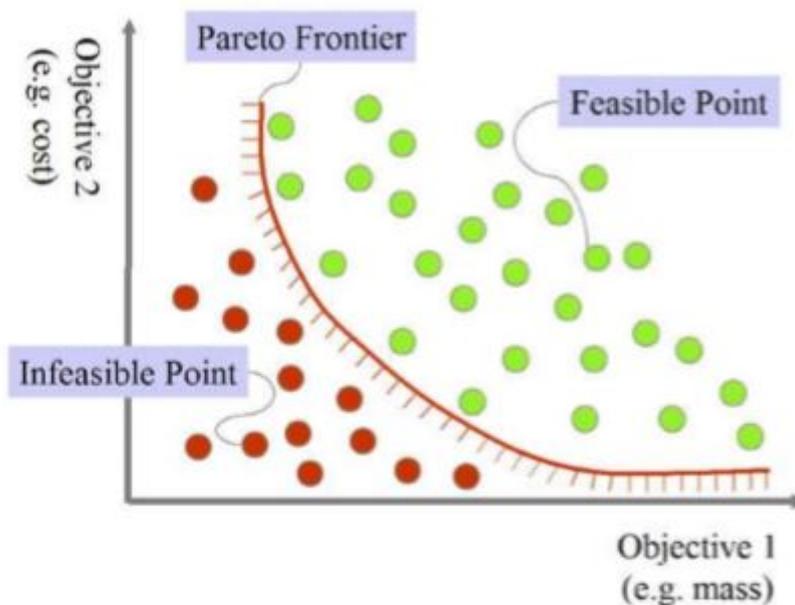


Figura 4.8: Esempio di linea di Pareto

della linea di Pareto sono:

- Normal- Boundary Intersection Method, utilizza una parametrizzazione geometricamente intuitiva per produrre una diffusione uniforme di punti sulla superficie di Pareto, fornendo un'immagine accurata dell'intera superficie. I diversi punti sul fronte di Pareto si ottengono eseguendo ottimizzazioni che sono limitate alle linee

che stanno intersecando l'accordo tra i valori obiettivo ideali e che sono perpendicolari a questo accordo. I punti che vengono generati sono ben distribuiti sul fronte di Pareto.

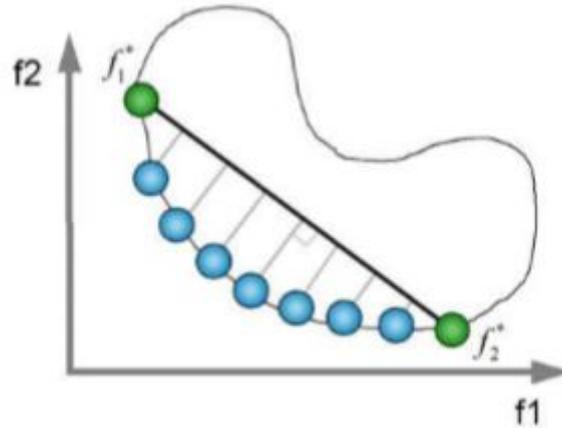


Figura 4.9: Normal Boundary Intersection

- Weighted Objective Method, aggiunge tutte le funzioni obiettivo usando diversi coefficienti di ponderazione per ciascuno, in modo che il problema dell'ottimizzazione multiobiettivo sia trasformato in un problema di ottimizzazione a obiettivo singolo creando la funzione:

$$f(x) = \sum_{i=1}^k \omega_i f_i(x) \quad (4.4)$$

con $\omega_i \geq 0$ e $\sum_{i=1}^k \omega_i = 1$. Il fronte di Pareto si ottiene provando diversi set di coefficienti di ponderazione.

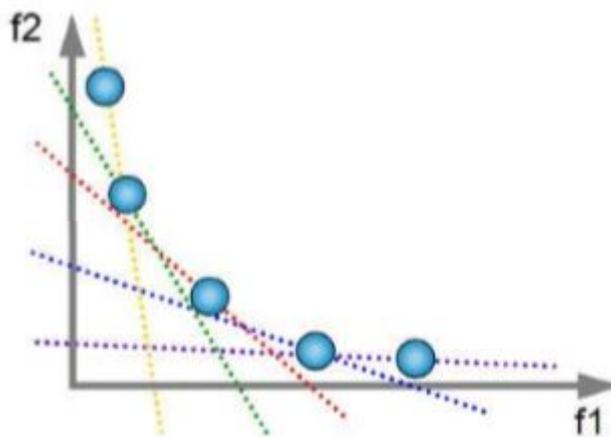


Figura 4.10: Weighted Objective Method

- Weighted Tchebycheff Method, trova punti sul fronte di Pareto variando i pesi w_i nel seguente problema di minimizzazione:

$$\min_{x \in X} \max_{l=1, \dots, k} w_l |f_l(x) - f_l^*| \quad (4.5)$$

con $f_l^* = \min_{x \in X} f_l(x)$, trova i valori obiettivo ideali, cioè i valori ottimali di ciascuna funzione obiettivo per problemi di ottimizzazione ad obiettivo singolo. Per generare la linea di Pareto si mantiene la somma di tutti i pesi pari ad uno.

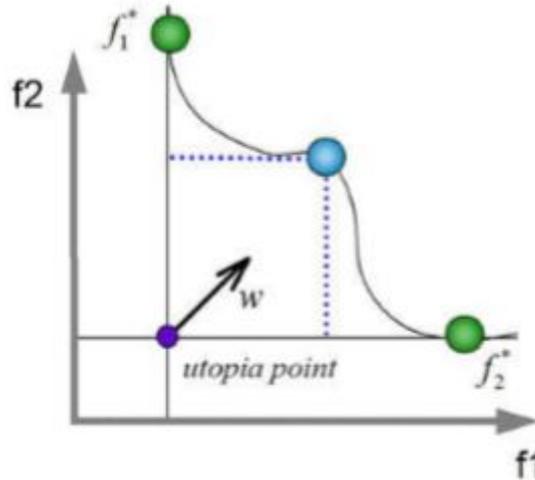


Figura 4.11: Weighted Tchebycheff Method

- Min-Max Optimum Method, permette di trovare diversi punti sul fronte di Pareto variando i pesi nel seguente problema di minimizzazione:

$$\min_{x \in X} \max_{l=1, \dots, k} \left(w_i \frac{f_i(x) - f_i^*}{f_i^*} \right) \quad (4.6)$$

con $f_i^* = \min_{x \in X} f_i(x)$ con $i = 1, \dots, k$, per generare il fronte di Pareto la somma di tutti i pesi è mantenuta ad uno.

- Non-dominated Sorting Differential Evolution=NSEA+, la presenza di più obiettivi dà origine ad un insieme di soluzioni ottimali, note come soluzioni Pareto-ottimali, anziché un'unica soluzione ottimale, ma in assenza di ulteriori informazioni non si può dire quale soluzioni sia migliore rispetto alle altre. Per questo motivo l'utente deve trovare il maggior numero possibili di soluzioni pareto-ottimali.

I classici metodi di ottimizzazione multi-obiettivo sono il metodo dell'intersezione Normal Boundary o il metodo dell'obiettivo ponderato, che suggeriscono di convertire il problema dell'ottimizzazione multi-obiettivo in un problema di ottimizzazione ad obiettivo singolo, enfatizzando una particolare soluzione pareto-ottimale alla volta, ma per trovare soluzioni multiple questi metodi devono essere applicati molte volte, sperando di trovare una

soluzione diversa ad ogni simulazione. Gli algoritmi evolutivi sono adatti a risolvere problemi di ottimizzazione multiobiettivo, in quanto trattano simultaneamente un insieme di possibili soluzioni, in modo da trovare diversi membri del set ottimale di Pareto in una singola esecuzione dell'algoritmo, invece di doverne eseguire una serie separatamente. Gli algoritmi evolutivi sono meno suscettibili alla forma o alla continuità del fronte di Pareto, che invece è un problema per le tecniche di programmazione matematica. Diciamo che un vettore di variabili decisionali $x^* \in \mathfrak{R}^n$ è Pareto ottimale se non esiste un altro $x \in \mathfrak{R}^n$ tale che $f_i(x) \leq f_i(x^*)$ per tutti $i = 1, \dots, k$ e $f_j(x) < f_j(x^*)$ per almeno un j . Un'ottimizzazione multiobiettivo non fornisce normalmente una singola soluzione, ma piuttosto un insieme di soluzioni chiamate set di Pareto ottimale. I vettori x^* corrispondenti alle soluzioni incluse nel set ottimale di Pareto sono chiamate non-dominate. L'idea dell'evoluzione differenziale di ordinamento non dominata si basa sulla classificazione degli individui in diversi livelli non dominati, utilizzando il rango di livello non dominato come valore di idoneità da ottimizzare con l'algoritmo di evoluzione differenziale.

- Fast Non-dominated Sorting Approach, per ciascuna soluzione calcoliamo due entità:
 - n_p il numero di soluzioni che dominano la soluzione,
 - S_p l'insieme di soluzioni che dominano la soluzione.

Tutte le soluzioni nel primo fronte non dominato avranno il loro dominio pari a zero. Per ogni soluzione p con $n_p = 0$, troviamo ciascun membro q del suo set S_p e riduciamo il suo dominio di uno. Se per ogni membro q il conteggio della dominazione diventa zero lo si inserisce in una lista separata Q . Questi membri appartengono al secondo fronte non dominato. La procedura continua con ciascun membro di Q e si identifica il terzo fronte. Il processo continua finché non si identificano tutti i fronti.

- Diversity Preservation, insieme alla convergenza con il set di Pareto ottimale è anche auspicabile che un NSDE mantenga una buona diffusione di soluzioni nel set di soluzioni ottenuto. NSDE implementa un approccio di confronto affollato, che non richiede alcun parametro definito dall'utente per mantenere la diversità tra i membri della popolazione. Per descrivere questo tipo di approccio, prima si definisce la stima della densità metrica e dopo viene presentato l'operatore di confronto affollato.
 - Density Estimation: per ottenere una stima della densità delle soluzioni che circondano una particolare soluzione nella popolazione, si calcola la distanza media di due punti su entrambi i lati di questo punto lungo ciascuno degli obiettivi. Questa quantità $i_{distance}$ serve per stimare il perimetro del cuboide formato usando i vicini più vicini, come ad esempio i vertici (distanza di affollamento). La distanza di affollamento della soluzione i_{th} nella parte anteriore,

```

For each  $p \in P$ 
   $S_p = \emptyset$ 
   $n_p = 0$ 
  For each  $q \in P$ 
    If ( $p \succ q$ ) then           If p dominates q
       $S_p = S_p \cup \{q\}$      Add q to the set of solutions dominated by p
    Else if ( $q \succ p$ ) then
       $n_p = n_p + 1$          Increment the domination counter of p
  If  $n_p = 0$  then             p belongs to the first front
     $p_{rank} = 1$ 
     $F_1 = F_1 \cup \{p\}$ 
   $i = 1$                      Initialize the front counter
  While  $F_i \neq \emptyset$ 
     $Q = \emptyset$            Used to store the members of the next front
    For each  $p \in F_i$ 
      For each  $q \in S_p$ 
         $n_q = n_q - 1$ 
        if  $n_q = 0$  then      q belongs to the next front
           $q_{rank} = i + 1$ 
           $Q = Q \cup \{q\}$ 
     $i = i + 1$ 
     $F_i = Q$ 

```

Figura 4.12: Algoritmo Fast-non-dominated-sort

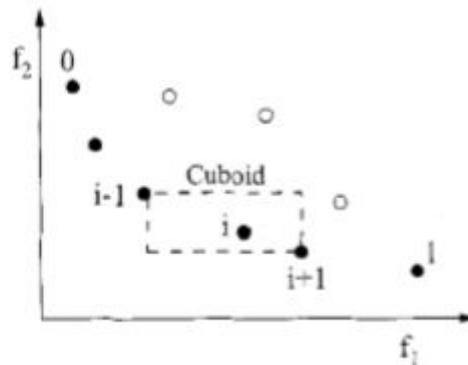


Figura 4.13: Rappresentazione grafica del calcolo della distanza di affollamento

contrassegnata da cerchi solidi, è la lunghezza media del lato del cuboide. Il calcolo della distanza di affollamento richiede l'ordinamento della popolazione in base a ciascun valore della funzione obiettivo in ordine crescente di grandezza. Per ogni funzione obiettivo, alle soluzioni di confine, soluzioni con valori di funzione più piccoli e più grandi, viene assegnato un valore di distanza infinito. A tutte le altre soluzioni intermedie viene assegnato un valore di distanza uguale alla differenza normalizzata assoluta nei valori di funzione di due soluzioni

adiacenti. Questo calcolo è continuato con altre funzioni oggettive. Il valore complessivo di distanza di spostamento è calcolato come la somma dei singoli valori di distanza corrispondenti a ciascun obiettivo. Ogni funzione obiettivo viene normalizzata prima di calcolare la distanza di affollamento.

```

I = |I|                                number of solutions in I
For each i, set I[i].distance = 0      initialize distance
For each objective m
  I = sort(I, m)                       sort using each objective value
  I[1].distance = I[I].distance = ∞    so that boundary points are always selected
  For l = 2 to (I-1)                   for all other points
    I[l].distance = I[l].distance + (I[l+1].m - I[l-1].m) / (f_m^max - f_m^min)

```

Figura 4.14: Algoritmo di assegnazione della distanza di affollamento

Dopo che tutti i membri della popolazione nel set I hanno assegnata una distanza metrica, possiamo comparare le due soluzioni per la loro estensione di prossimità con altre soluzioni. Una soluzione con un valore inferiore di questa misura di distanza è più affollata delle altre. Questo è esattamente ciò che si confronta con l'operatore di confronto affollato proposto di seguito.

- Crowded-Comparison Operator: l'operatore di confronto affollato guida il processo di selezione nelle varie fasi dell'algoritmo verso un fronte di Pareto ottimale uniformemente distribuito. Supponiamo che ogni individuo nella popolazione abbia due attributi: grado di non dominio (i_{rank}) e distanza di affollamento ($i_{distance}$). Definendo un ordine parziale si ha $i_n.jif(i_{rank} < j_{rank})$ o $((i_{rank} = j_{rank})e(i_{distance} > j_{distance}))$

Tra due soluzioni con differenti gradi di non dominio, preferiamo la soluzione con il rank inferiore. Se entrambe le soluzioni appartengono allo stesso fronte, si preferisce la soluzione che si trova in una regione meno affollata.

- Main Loop: inizialmente viene creata una popolazione genitore casuale P_0 . La popolazione è ordinata in base al non dominio. Ad ogni soluzione viene assegnato un rank uguale al suo livello di non dominio, 1 è il miglior livello, si presume la minimizzazione del rank. Dopo la generazione iniziale la procedura cambia.

La procedura passo-passo mostra che l'algoritmo NSDE è semplice e diretto. Per prima cosa si forma una popolazione combinata $R_t = P_tQ_t$. La popolazione R_t è di taglia $2N$ e viene ordinata in base al non dominio. Poiché tutti i membri della popolazione precedente e attuale sono inclusi in R_t , l'elitarismo è assicurato. Le soluzioni appartenenti al miglior set non-dominato F_1 sono le migliori soluzioni nella popolazione combinata e devono essere enfatizzate più di ogni altra soluzione

$R_t = P_t \cup Q_t$	Combine parent and offspring population
$F = \text{fast-non-dominated-sort}(R_t)$	$F = (F_1, F_2, \dots)$, all non-dominated fronts of R_t
$P_{t+1} = \emptyset$ and $i = 1$	
Until $ P_{t+1} + F_i \leq N$	Until the parent population is filled
crowding-distance-assignment (F_i)	Calculate crowding-distance in F_i
$P_{t+1} = P_{t+1} \cup F_i$	Include i_{th} non-dominated front in the parent pop
$i = i + 1$	Check the next front for inclusion
Sort (F_i, n)	Sorting in descending order using n
$P_{t+1} = P_{t+1} \cup F_i[1 : (N - P_{t+1})]$	Choose the first $(N - P_{t+1})$ elements for F_i
$Q_{t+1} = \text{make-new-pop}(P_{t+1})$	Use selection and crossover of Differential Evolution to create a new population Q_{t+1}
$t = t + 1$	Increment the generation counter

Figura 4.15: Algoritmo di Main Loop alla generazione t_{th}

nella popolazione combinata. Se la dimensione di F_1 è inferiore ad N , scegliamo tutti i membri della serie di F_1 per la nuova popolazione P_{t+1} . I restanti membri della popolazione P_{t+1} vengono scelti dai successivi fronti non dominati nell'ordine della loro classifica. Vengono scelte le soluzioni dall'insieme F_2 , seguite dalle soluzioni dell'insieme F_3 e così via. La procedura continua finché non è possibile aggiungere ulteriori set. Per scegliere esattamente N membri della popolazione, selezioniamo le soluzioni dell'ultimo fronte usando l'operatore di confronto affollato in ordine decrescente e scegliamo le migliori soluzioni necessarie per riempire tutte le fasce di popolazione. La popolazione P_{t+1} di dimensione N è utilizzata per la selezione e il crossover per creare una nuova popolazione Q_{t+1} .

Robustness e Reliability Analysis: le simulazioni vengono eseguite in modo deterministico, per un determinato set di variabili di input, l'output corrispondente sarà sempre lo stesso. Un progetto valido in una simulazione deterministica potrebbe causare un prodotto difettoso nella produzione effettiva, quindi in fase di progettazione occorre tenere in conto la variabilità delle variabili di progetto e applicare concetti e metodi di robustezza e affidabilità per garantire una progettazione robusta e affidabile. Per poter fare analisi di robustezza e affidabilità in Optimus occorre conoscere la distribuzione degli input, che è descritta dalla distribuzione di probabilità, in particolare esistono 11 tipi di distribuzione in Optimus. Robustness è il grado in cui il sistema o componente può funzionare correttamente in presenza di ingressi non validi o condizioni ambientali stressanti. In Optimus l'analisi della robustezza mira a stimare la sensibilità delle uscite alla variabilità degli input. La deviazione standard viene utilizzata come misura della robustezza delle uscite. Più piccola è la deviazione standard dell'uscita più robusta è quest'ultima. Sulla base della previsione della sensibilità delle uscite è possibile applicare metodi di ottimizzazione

per migliorare la robustezza delle uscite. Per calcolare la deviazione standard di un'uscita in optimus esistono due metodi: campionamento, di cui fa parte il metodo Monte-Carlo, e approssimazione, a cui appartengono il metodo FOSM (First Order Second Moment) e il metodo Monte-Carlo on Linear Model. Il metodo Monte-Carlo è il metodo di campionamento più diretto, per identificare la sensibilità del progetto alle piccole perturbazioni delle variabili di progetto in qualsiasi punto dello spazio di progettazione. Esegue una serie di simulazioni con combinazione di parametri selezionati casualmente per la distribuzione data e calcola la deviazione standard in base all'equazione:

$$\sigma_y = \sqrt{\frac{1}{N-1} \sum_{i=1}^N (y_i - \bar{y})^2} \quad (4.7)$$

Può essere adottato anche per calcolare la probabilità di guasto di un output dividendo il numero di guasti per il numero di simulazioni, in modo da fornire un'approssimazione della probabilità di guasto effettiva.

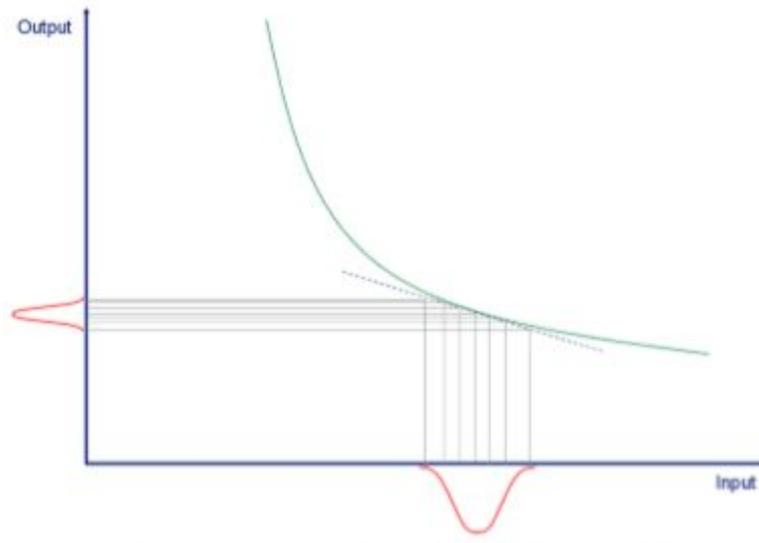


Figura 4.16: Metodo Monte-Carlo per modelli lineari

Un grande svantaggio di questo metodo è che sono richieste molte simulazioni per stimare con precisione la deviazione standard. E' ampiamente utilizzato per scopi di validazione e per la risoluzione di sistemi complessi e di grandi dimensioni quando le approssimazioni analitiche non sono fattibili è quasi sempre applicabile.

Capitolo 5

Optimus

Dopo aver introdotto la teoria base di Optimus, in questo capitolo verrà esposta la procedura utilizzata per l'ottimizzazione della sound transmission loss al variare della volume fraction. Prima di poter descrivere il ciclo implementato occorre introdurre la descrizione di MUL2toACTRAN, interfaccia creata tramite MatLab tra il programma MUL2-UC e ACTRAN. MUL2-UC permette l'omogenizzazione del materiale eterogeneo, si ricorda che il metamateriale scelto, matrice in schiuma di melammina e inclusioni cilindriche di alluminio, deve essere omogenizzato per poter calcolare il valore della sound transmission loss. Il codice MUL2-UC è stato sviluppato per funzionare come uno strumento efficiente e ad alta fedeltà di calcolo della matrice di rigidità effettiva. Differisce dagli strumenti numerici di micromeccanica convenzionale che di solito fanno uso di modelli finiti 2D/3D per risolvere il problema. Questo codice implementa Mechanics of Structure Genome (MSG) per separare il problema in analisi globali e locali e utilizza la formulazione unificata di Carrera (CUF) per generare modelli a raggio raffinato a basso costo per risolvere il problema costitutivo posto da MSG. MUL2-UC si avvale di elementi 1D standard per discretizzare i vari costituenti lungo la direzione longitudinale della microstruttura e una teoria della struttura non locale di ordine superiore (HLE), per espandere le incognite del problema sulle restanti due direzioni. Al suo interno è implementata una tecnica di mappatura avanzata per modellare la geometria esatta dei diversi costituenti come fibre e matrice, sulla sezione trasversale del fascio. Con questo approccio di modellazione la descrizione geometrica della microstruttura e l'accuratezza della soluzione viene fissata all'inizio dell'analisi. L'utente definisce gli input del problema, il codice genera gli array di quest'ultimo, risolve il sistema lineare e calcola le variabili di fluttuazione. La matrice di rigidità 3D completa viene generata automaticamente con una sola esecuzione del codice. MUL2-UC suddivide la procedura di modellazione in diversi moduli che corrispondono a diversi set di input che l'utente deve definire per avviare il codice come la scelta dei materiali: numero di materiali costituenti, proprietà e orientamento. La scelta può

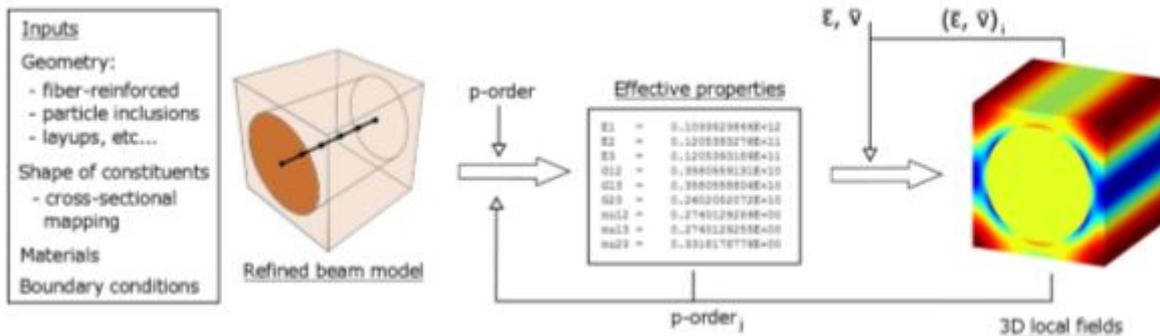


Figura 5.1: Analisi tramite MUL2-UC

variare da isotropi, monoclini ad ortotropi tramite costanti ingegneristiche. MUL2-UC sotto forma di eseguibile viene richiamato nello script creato in MatLab.

In MatLab è stato creato uno script (MUL2toACTRAN.m) che per ciascuna frazione di volume V_f al variare della frequenza è in grado di generare tramite l'ausilio di MUL2-UC e ACTRAN i valori della sound transmission loss corrispondenti. Lo script è composto da quattro parti principali:

- legge il file DATA-MELAMINE-FOAM.dat
- Per ogni frazione di volume e per ogni frequenza il codice esegue MUL2-UC per la parte reale e immaginaria, tramite due diverse esecuzioni, delle proprietà meccaniche dei materiali costituenti il metamateriale.
- legge il file Effective-stiffness.dat

L'altra parte dell'interfaccia comprende MSC ACTRAN che è un software che permette lo studio della perdita di trasmissione con campioni di geometrie e materiali diversi. In particolare in ACTRAN è possibile calcolare la perdita di trasmissione del suono di un pannello rettangolare e stabilire la sorgente sonora, in questo caso un campo di diffusione casuale, cioè un campo sonoro in cui la media temporale della pressione sonora quadrata media è ovunque uguale e il flusso di energia acustica in tutte le direzioni è altrettanto probabile. I campi diffusivi sono prodotti sperimentalmente attivando forti sorgenti acustiche in una camera riverberante.

Lo script creato MUL2toACTRAN.m nello specifico esegue i seguenti passaggi:

- Legge il file di input inserito da utente: INPUT-VOLUME-FRACTION.dat.
- Calcola la parte reale delle proprietà meccaniche dei materiali costituenti la piastra omogenizzata di metamateriale. Nello specifico la parte reale dell'alluminio, che è la

fibra del metamateriale, il modulo di Young è $E_{fib} = 67.5e9$ il coefficiente di Poisson $\nu_{fib} = 0.34$.

- legge il file DATA-MELAMINE-FOAM.dat e ne estrae la parte reale delle caratteristiche meccaniche, in particolare nelle tre direzioni: E_1, E_2, E_3 , per il modulo di Young, G_{12}, G_{13}, G_{23} , per il modulo di elasticità tangenziale, $\nu_{12}, \nu_{13}, \nu_{23}$, per il coefficiente di Poisson.
- Viene richiamata la funzione MUL2 che si riferisce all'eseguibile MUL2-Alberto.exe: strumento di micromeccanica per la modellazione beam dei materiali compositi. Una volta selezionata la geometria della cella vengono richieste le proprietà del materiale della fibra e della matrice. Tramite questa funzione viene creato il file Effective-stiffness.dat.

```
Mul2, Politecnico di Torino

Welcome to MUL2-UC!

The micromechanics tool for the beam modeling of
composite materials

-----

Please, introduce the microstructure type:

- square-pack = 1
- hexagonal-pack = 2
- rectangular inclusion = 3
- cylindrical inclusion = 4

* For free modeling, introduce 5 (input files required).
```

Figura 5.2: MUL2-UC

- Rifà lo stesso procedimento per la parte immaginaria. Anche se la parte immaginaria del modulo di Young per l'alluminio è nulla per ragioni compilative viene imposto: $E_{fib} = 10e^{-8}$ e $\nu_{fib} = 10e^{-8}$. Anche in questo caso sarà eseguito MUL2 per la parte immaginaria.
- Le parti reali ed immaginaria del materiale vengono scritte all'interno di 9 tabelle, che si riferiscono ai 3 moduli di Young (parte reale e immaginaria), 3 moduli di elasticità tangenziale (parte reale e immaginaria) e i 3 coefficienti di Poisson (parte reale e immaginaria), vengono scritte in un unico file.dat e il contenuto viene copiato e incollato nel file.edat da far leggere ad ACTRAN.
- In questo modo viene scritto il file di Output METAMATERIAL-Vf, che per essere scritto non ha bisogno di ACTRAN quindi ha un costo computazionale esiguo.

- Legge il file di analisi generica senza metamateriale Test-Sandwich-metamaterial.edat.
- A questo punto entra in azione ACTRAN, genera i file contenenti i valori dell'intensità sonora incidente e trasmessa, al variare della frequenza e in base al valore della frazione in volume inserito come input.

I file di Output ottenuti tramite MUL2-UC e tramite ACTRAN tengono conto dell'input inserito, ogni file corrisponde ad un preciso valore di volume fraction, questo fa sì che per un elevato numero di input il costo computazionale aumenta notevolmente in quanto per ogni valore di input si esegue lo script MatLab: MUL2toACTRAN.m. Lo script è stato ottimizzato in modo da poter calcolare non solo i valori dell'intensità sonora al variare della frequenza e della frazione in volume, ma anche il valore finale della sound transmission loss. La parte di script che si occupa di questo calcolo è suddivisa nel seguente modo.

- Legge il file di input contenente i valori della volume fraction inseriti da utente
- Legge i file PSD-Sandwich-MM-Vf.plt prodotti dalla parte di script precedente e cerca all'interno del file:
 - sampled-random-diffuse da cui legge i valori di PSD-Inc-Power, cioè i valori dell'intensità sonora incidente calcolati tramite ACTRAN
 - interface-transmitted in cui legge i valori di PSD-RAD-Power, corrispondenti all'intensità sonora trasmessa calcolati tramite ACTRAN e dipendenti dal metamateriale.
 - Ottenuti i valori delle due intensità sonora al variare della frequenza vengono calcolati i valori della sound transmission loss in dB

$$TL = 10 \log_{10} \frac{I_i}{I_t} \quad (5.1)$$

- Dopo aver ottenuti i valori della perdita di trasmissione sonora al variare della frequenza per un solo valore di volume fraction, ne viene calcolata la media in modo da avere per un solo valore di input un solo valore di output. I risultati ottenuti vengono copiati in un nuovo file Mean-TL.plt in modo che l'utente possa avere a disposizione i valori della frazione in volume con i corrispettivi valori della sound transmission loss media.

Con lo script appena descritto è stato creato un eseguibile: PROVA.exe che viene richiamato in Optimus. Per l'utente MUL2-UC e ACTRAN non sono visibili e l'utilizzo dei due software è implementato nell'eseguibile che viene lanciato tramite Optimus. Non occorre modificare lo script se ciò che si vuole fare è variare i valori della frazione in volume e calcolare la sound transmission loss corrispondente.

5.1 MUL2toACTRAN

Lo script appena analizzato si trova all'interno della cartella MUL2toACTRAN che è così formata:

- INPUT
 - DATA-MELAMINE-FOAM.dat contiene i parametri meccanici dei materiali costituenti il metamateriale omogenizzato nelle tre direzioni: il modulo di Young, il coefficiente di Poisson, il modulo di elasticità tangenziale, ovviamente tenendo conto della variazione della frequenza imposta dall'utente: $f = (0,5,10,20,35,50,60,80,100,120,196,272,348,424,500,4000)Hz$

Frequency 1
$Re(E_x)[Pa]$
$Im(E_x)[Pa]$
$Re(E_y)[Pa]$
$Im(E_y)[Pa]$
$Re(E_z)[Pa]$
$Im(E_z)[Pa]$
$Re(G_{xy})[Pa]$
$Im(G_{xy})[Pa]$
$Re(G_{xz})[Pa]$
$Im(G_{xz})[Pa]$
$Re(G_{yz})[Pa]$
$Im(G_{yz})[Pa]$
ν_{xy}
ν_{xz}
ν_{yz}
Frequency 2
.....

Tabella 5.1: File DATA-MELAMINE-FOAM.dat

- INPUT-VOLUME-FRACTION.dat contiene i valori della Volume fraction inseriti dall'utente
- Test-Sandwich-metamaterial.edat, in questo file è possibile impostare i valori della frequenza per i quali si vuole calcolare la sound transmission loss. Richiama ACTRAN tramite il file Mesh.dat.
- Input-Files-SquarePack, questa cartella non è stata modificata per lo studio condotto in questa tesi

- CONNECTIVITY.dat contiene le caratteristiche degli elementi beam dell'intera struttura
- CONSTRAINT.dat al suo interno vengono definiti i vincoli del pannello
- GRID-STRUCT-NODES.dat vengono definiti i nodi della struttura
- LAMINATION.dat presenta le caratteristiche del materiale: isotropo, ortotropo e così via
- STRUCT-INFO.dat permette di scegliere l'analisi da effettuare, contiene le indicazioni per cambiare il tipo di analisi
- Matrices: Effective-stiffness.dat legge le proprietà meccaniche effettive, parte reale e immaginaria, del materiale omogenizzato.

```

Effective Stiffness Matrix
0.5399626487E+04  0.5685435408E-03  0.1378434931E-02  -0.9828155241E-13  0.1568638385E-28  0.2888824977E-21
0.5685435408E-03  0.5542886648E+04  0.1433487595E+03  -0.1486228843E-05  -0.8141887518E-16  -0.3886436525E-15
0.1378434931E-02  0.1433487595E+03  0.1356188855E+05  0.5842846849E-06  0.5683988582E-14  -0.2585378979E-14
-0.9828155875E-13  -0.1486228157E-05  0.5842846448E-06  0.3148463536E+04  0.2819346761E-14  -0.4443553268E-14
0.5568837948E-14  0.1721626598E-21  -0.1535395181E-28  0.8888888888E+08  0.3854458859E+04  -0.6252687198E-06
0.1428934875E-13  0.2358848862E-28  0.5194312473E-28  0.8888888888E+08  -0.6252686885E-06  0.3157855919E+04

Engineering Material Constants (Orthotropic)
E1 = 0.5399626487E+04
E2 = 0.5548571349E+04
E3 = 0.1355729276E+05
G12 = 0.3157855919E+04
G13 = 0.3854458859E+04
G23 = 0.3148463536E+04
nu12 = 0.1888888888E-06
nu13 = 0.1888888888E-06
nu23 = 0.1857866247E-01

Effective Compliance Matrix
0.1851979952E-03  -0.1851979952E-10  -0.1851979952E-10  0.9775746335E-27  -0.4845039862E-28  -0.2824462618E-28
-0.1851979952E-10  0.1804868013E-03  -0.1987865056E-05  0.8091759964E-13  0.6585041932E-23  0.1567355886E-22
-0.1851979952E-10  -0.1987865056E-05  0.7376103899E-04  -0.1266444380E-13  -0.1072812959E-21  0.5835347346E-22
-0.3862521564E-28  0.8091760615E-13  -0.1266444291E-13  0.3176152394E-03  -0.2323198999E-21  0.4470431538E-21
-0.2675315788E-21  0.1793157853E-28  0.5622953864E-28  -0.8659041863E-38  0.2594397908E-03  0.5138318414E-13
-0.8382362588E-21  -0.4789118991E-28  -0.3611811285E-28  -0.3962214375E-37  0.5138318164E-13  0.3167508038E-03

```

Figura 5.3: File Effective-stiffness.dat

- OUTPUT questa cartella contiene i risultati della prima parte dell'analisi dello script MatLab e il file Mesh.dat che è essenziale ai fini dell'analisi.
 - MATERIAL-PROPERTIES, questa cartella contiene i file METAMATERIAL-Vf=(valore di Vf analizzato).dat. Il file è composto da 9 tabelle che corrispondono alle caratteristiche del materiale nelle tre direzioni, quindi ci saranno 3 tabelle per il modulo di Young, tre per il modulo di elasticità tangenziale e 3 per il coefficiente di Poisson.
 - Sandwich-MM-Vf=(valore di Vf).edat richiama Actran in modo da ottenere il file PSD-Sandwich-MM-Vf=(valore di Vf).plt.

Begin	Table	1
Name	E_{11}	
Frequenza	Reale	Immaginaria
0	valore	valore
5	valore	valore
10	valore	valore
20	valore	valore
35	valore	valore
50	valore	valore
60	valore	valore
80	valore	valore
100	valore	valore
120	valore	valore
196	valore	valore
272	valore	valore
348	valore	valore
424	valore	valore
500	valore	valore
4000	valore	valore
End	Table	1
.....		
densità relativa	al valore di Vf	in ingresso

Tabella 5.2: File METAMATERIAL-Vf.dat

- REPORT per ogni simulazione viene creato al suo interno una cartella corrispondente al valore della frazione in volume analizzata, tramite questo file è possibile controllare l'avanzamento della simulazione e gli eventuali errori commessi.
- RESULT-PLT contiene i file Sandwich-MM-Vf=(valore di Vf analizzato).plt PSD-Sandwich-MM-Vf(valore di Vf analizzato).plt ottenuti in seguito alla simulazione dello script MatLab.

Per ogni valore di Vf in ingresso si avranno due file all'interno della cartella Output, e due file all'interno della cartella Result-PLT, in particolare il file PSD-Sandwich-MM-Vf(valore di Vf analizzato).plt e Sandwich-MM-Vf=(valore di Vf analizzato).plt. Ogni qualvolta si utilizza un nuovo workflow di Optimus il programma genera una nuova cartella corrispondente. Ad ogni avvio del programma si genereranno i seguenti file al suo interno: INPUT-VOLUME-FRACTION.dat, PSD-Sandwich-MM-Vf(valore di Vf analizzato).plt, Sandwich-MM-Vf=(valore di Vf analizzato).plt. e Mean-TL.plt.



Figura 5.4: Schermata di apertura Optimus

5.2 Prove in Optimus

L'utilizzo di Optimus per l'ottimizzazione dei valori della sound transmission loss ha richiesto diverse prove prima di ottenere il ciclo di ottimizzazione adeguato. La prima configurazione aveva un solo valore di volume fraction in input, la simulazione veniva eseguita al di fuori di Optimus tramite MatLab e il file ottenuto veniva poi inserito in Optimus. Dopo aver caricato tale file all'interno del ciclo tramite l'action si toglievano le parentesi graffe nel file che impedivano la lettura dei dati di nostro interesse. Gli output letti erano un solo valore di intensità sonora incidente e uno solo di intensità sonora trasmessa relativi ad un solo valore di frequenza $f = 10Hz$, in questo modo si calcolava il valore della sound transmission loss relativo. Questa configurazione è stata abbandonata perché si voleva rendere Optimus più presente nella simulazione, quindi si è creato l'eseguibile dello script MatLab in modo da lanciare la simulazione direttamente in Optimus. Con questa idea si è creato un workflow, sempre con un solo input, ma in cui nella Action1 era presente l'eseguibile, i file risultanti venivano letti dalla Action2 e privati delle parentesi graffe, in questo modo si potevano leggere, negli output, i valori di I_i e I_t e quindi calcolare TL per un solo valore della frequenza.

Dopo aver visto che questa configurazione funzionava bene si è cercato di adattarla al nostro problema da analizzare, per questo sono stati introdotti 3 input e sono stati calcolati i 3 valori della sound transmission loss, ma solo per un valore della frequenza. Ma l'Action2, che in questo caso si occupava di leggere i risultati ed eliminare le parentesi

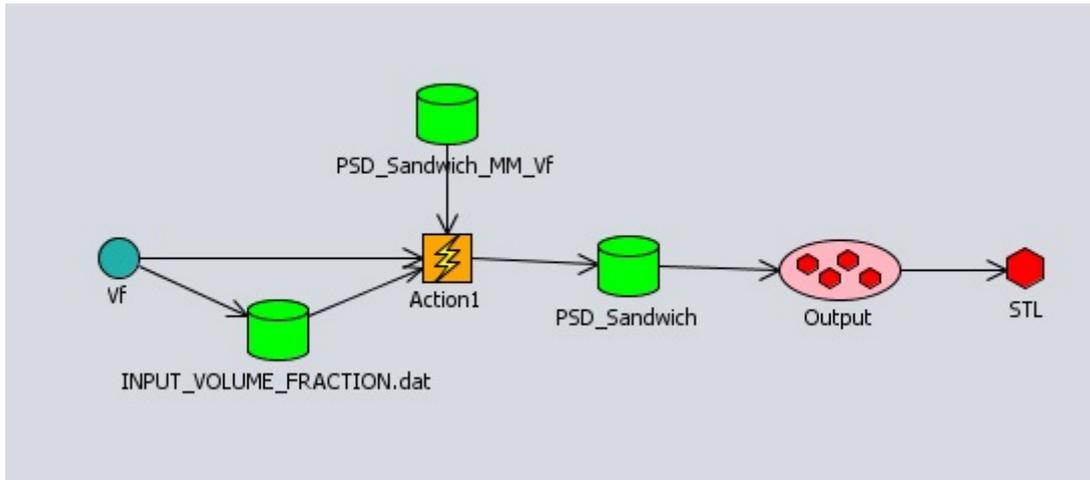


Figura 5.5: Prima configurazione di Optimus

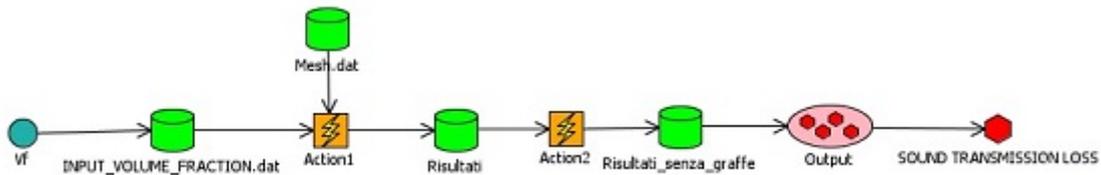


Figura 5.6: Configurazione con l'eseguibile di MatLab

graffe, era diventato meno leggibile, perchè doveva leggere 3 file.

In vista dell'aumento degli input per i fini della nostra analisi, si è pensato di modificare la configurazione precedente con un blocchetto Action2 per ogni file da leggere.

Ma tutte le prove precedentemente descritte permettevano di calcolare un solo valore di sound transmission loss relativo ad una sola frequenza, ma noi dovevamo poter calcolare i valori di TL al variare della frequenza e al variare della volume fraction, allora si è pensato di tornare ad una configurazione con un solo valore di Volume fraction, ma ben 50 output. In ogni output venivano calcolati i valori di I_i ed I_t per un determinato valore della frequenza e poi si calcolava il corrispettivo valore della perdita di trasmissione del suono.

Eseguendo le varie analisi di ottimizzazione questa configurazione andava bene per un solo valore di input, ma il nostro scopo era l'analisi di più input. Questa configurazione è stata abbandonata perchè non permetteva la presenza di un altro ingresso ed era anche poco leggibile come configurazione a causa delle innumerevoli linee di collegamento e della moltitudine degli output. A questo punto si è pensato all'introduzione dei vettori per leggere i 50 valori di potenza sonora incidente e trasmessa relativi alle 50 frequenze, in modo

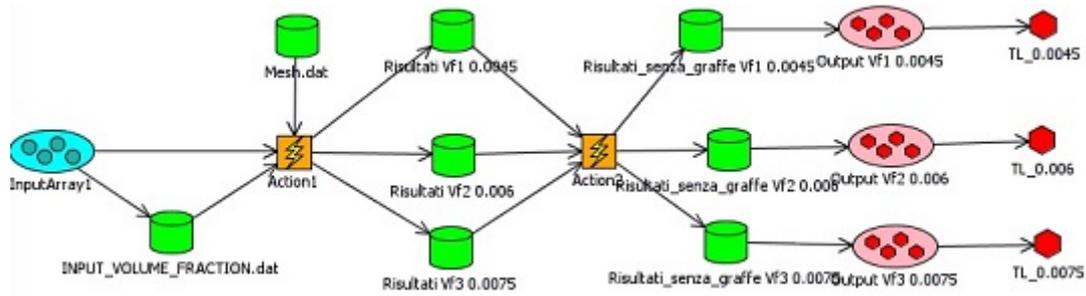


Figura 5.7: Workflow Optimus con 3 input e un solo Action2

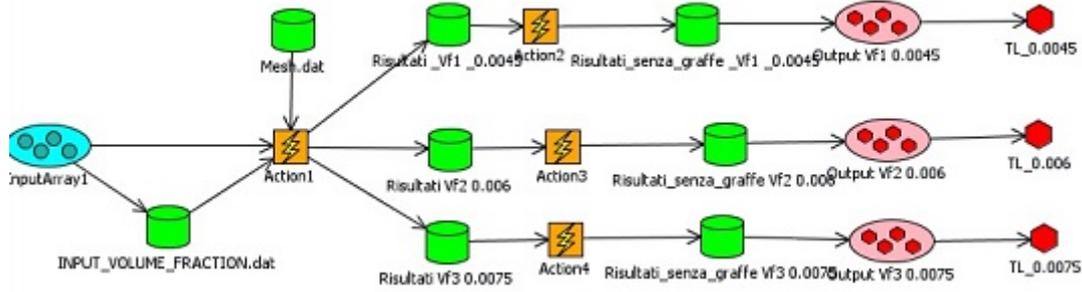


Figura 5.8: Configurazione con i blocchetti Action per ogni file da leggere

da non avere quel numero eccessivo di linee nel workflow. La configurazione introdotta è molto semplice: si ha un input, a cui è collegato l'output per il calcolo della densità, dopo aver eseguito l'eseguibile e aver eliminato le parentesi graffe nel file PSD-Sandwich-MM-Vf in quest'ultimo i valori delle potenze sonore incidenti e trasmesse venivano lette come vettori. In questo modo occorre solo due output per immagazzinare rispettivamente i valori di I_i ed I_t , seguiva un altro output per il calcolo delle 50 TL e alla fine si faceva la media aritmetica per il calcolo della sound transmission loss media.

Per il calcolo di tutti gli altri valori di output erano stati inseriti tanti schemi quante erano le Vf in ingresso, ma il limite di questa configurazione era l'aumento degli input e l'impossibilità di avere un'unica configurazione. Inoltre al momento dell'ottimizzazione questa configurazione presentava dei problemi in quanto occorre 3 vettori, uno serviva per l'asse delle ascisse. Così si è fatta un'ulteriore prova con i 3 vettori, ma per ogni valore in input occorre 3 vettori quindi all'aumentare degli input aumentava la complessità della configurazione.

Tutte le configurazioni presentate valgono per un solo valore in input, aumentando gli input o non valgono più o si complicano eccessivamente. Occorreva quindi trovare una configurazione in grado di funzionare all'aumento delle volume fraction e in grado di calcolare tutti i valori della sound transmission loss al variare della frequenza, ma il tutto senza complicare la struttura dello schema. Allora si è pensato ad una configurazione che ricorda il primo workflow realizzato. Per poter avere una struttura così semplice si è pensato di fare il calcolo delle sound transmission loss attraverso un eseguibile inserito in

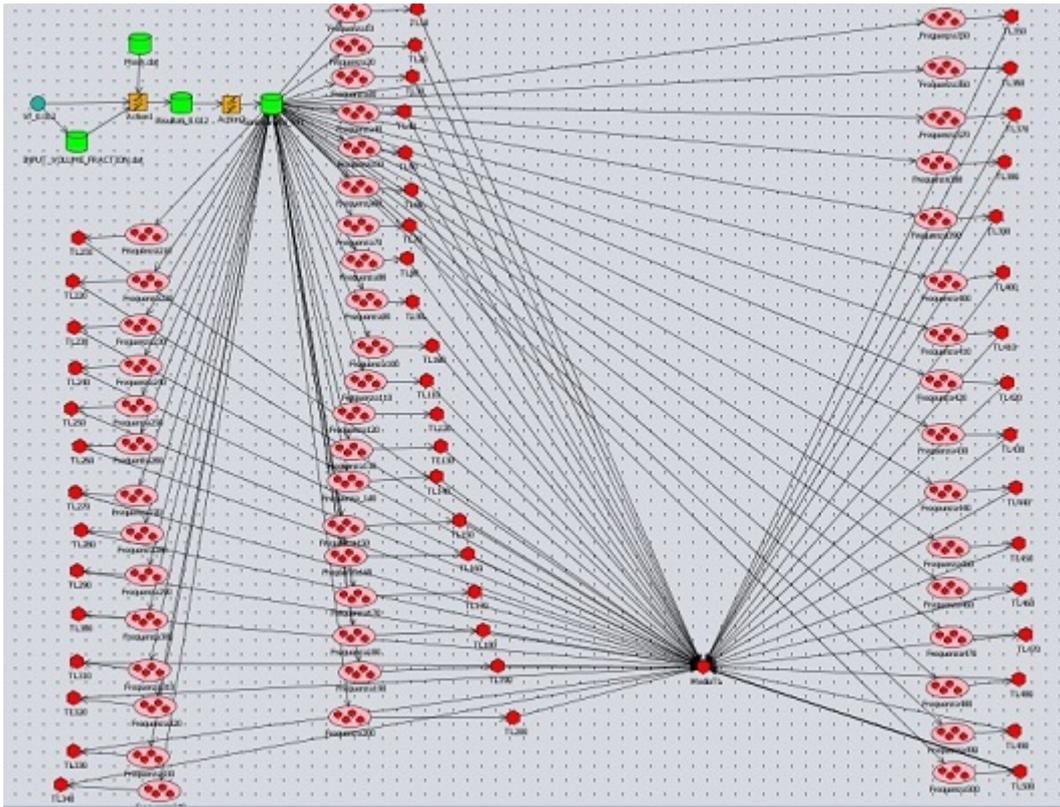


Figura 5.9: Workflow Optimus con un solo valore di V_f e il calcolo di tutte le sound transmission loss tramite blocchi di output

Action2 in grado di leggere i file dei risultati del primo eseguibile prendere i valori delle potenze sonore incidente e trasmessa e calcolare la sound transmission loss al variare della frequenza, inoltre calcola la media della TL.

Nonostante funzionasse bene e i calcoli effettuati erano corretti non era in grado di stabilire se il vincolo della densità imposta dai partners del progetto CASTLE: $\rho = 48kg/m^3$ come per il materiale NOMEX fosse rispettato o meno.

5.3 Configurazione finale di Optimus

Nella configurazione finale realizzata in Optimus si è aggiunto, rispetto all'ultima configurazione presentata, il vincolo della densità: qualora la densità relativa ad una frazione in volume inserita risultasse maggiore di $49kg/m^3$ allora non verrà calcolata la sound transmission loss corrispondente in quanto non rispetta i parametri imposti dal progetto CASTLE. Il ciclo è stato ottimizzato inserendo il vincolo della densità e utilizzando una sola action con all'interno l'eseguibile PROVA.exe.

La configurazione finale è così composta:

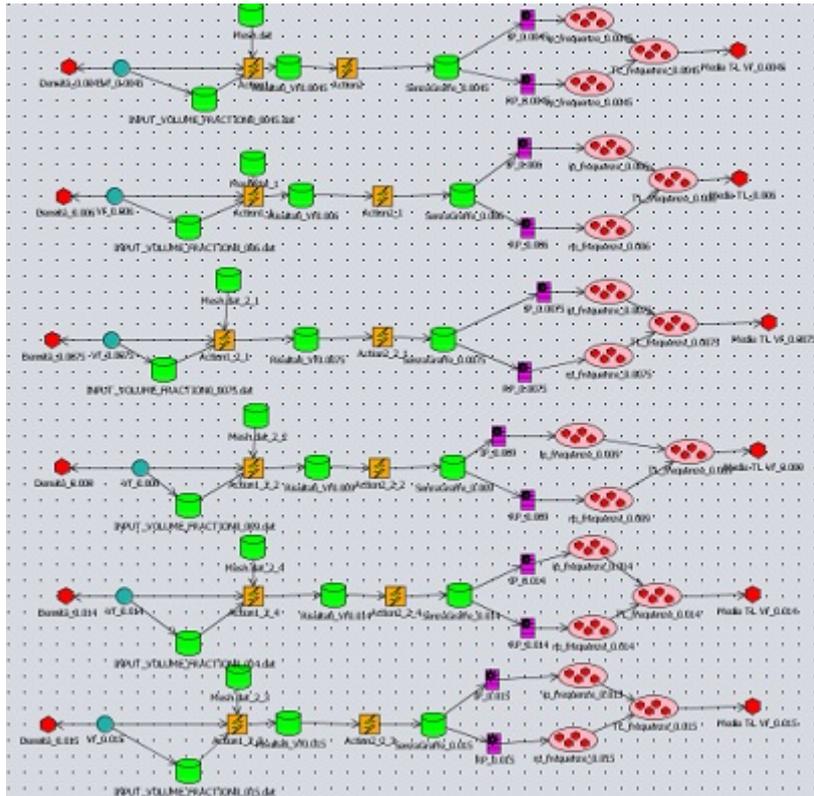


Figura 5.10: Configurazione con un solo valore di Vf per schema e il calcolo di tutte le sound transmission loss tramite vettori

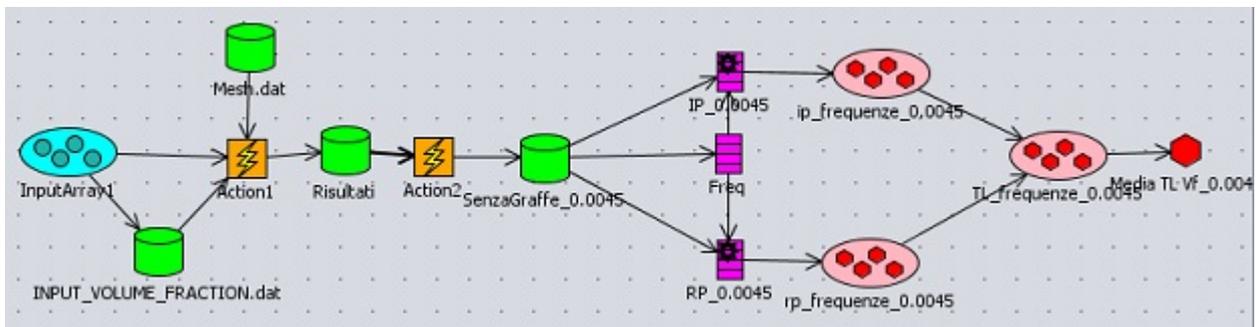
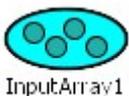


Figura 5.11: Configurazione con un solo valore di Vf e i tre vettori per l'ottimizzazione



- all'interno del quale l'utente può inserire i valori di input che desidera testare, nel nostro caso sono i valori della volume fraction. Per gli scopi di questa tesi sono stati inseriti undici valori di input in grado di ricoprire una vasta gamma di risultati. Si va da $Vf = 0.0045$ che indica una matrice con pochissime inclusioni di alluminio, fino a $Vf = 1$ che indica una matrice totalmente in alluminio. Inoltre in questo modo è possibile vedere l'andamento della sound transmission loss e della densità del materiale al variare di Vf.

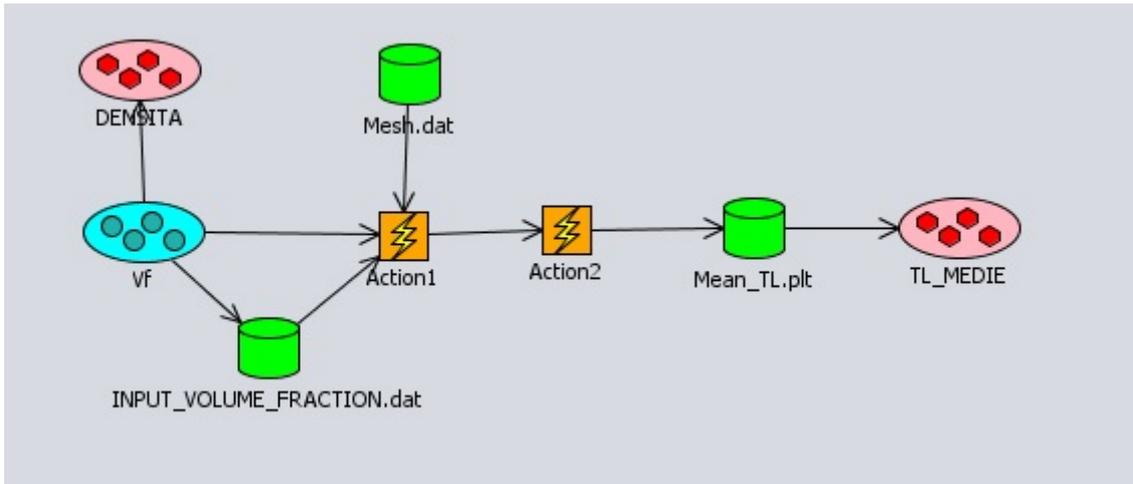


Figura 5.12: Configurazione senza il vincolo della densità in Optimus

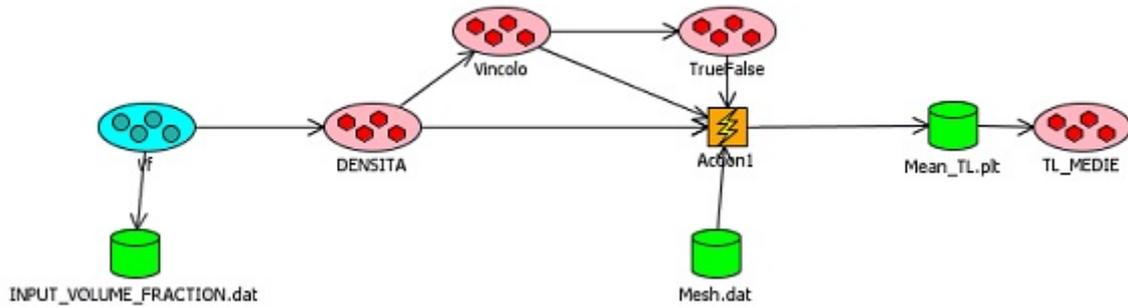
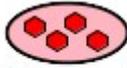


Figura 5.13: Configurazione finale implementata in Optimus

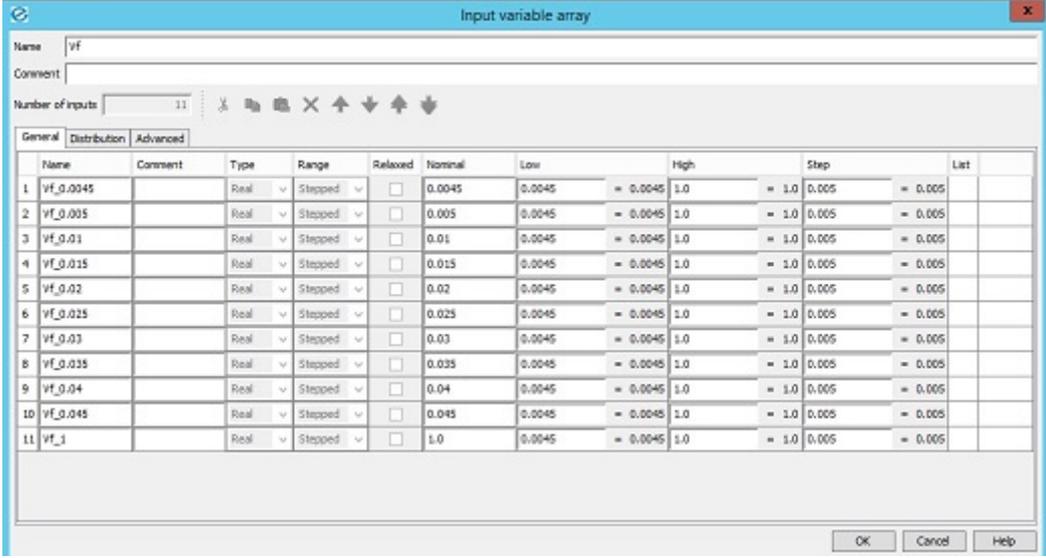
- 

File1 collegato all'input array questo file contiene al suo interno, in basso, tutti i valori inseriti precedentemente nell'input, l'utente può valutare il corretto valore dei parametri cliccando su verify in alto. Ciò che è stato appena descritto può sembrare una ridondanza, ma è essenziale ai fini della corretta esecuzione del programma.
- 

OutputArray1 Nel ciclo implementato in Optimus questo simbolo viene ripetuto ben quattro volte. Il primo è relativo alla densità che si calcola come:

$$\rho_{eff} = \rho_M(1 - V_f) + \rho_{Al}V_f \quad (5.2)$$

considerando la densità della schiuma di melamina $\rho_M = 8kg/m^3$ e la densità dell'alluminio $\rho_{Al} = 2700kg/m^3$. All'interno di questo blocco è possibile inserire la formula della densità e calcolarne il valore per ogni volume fraction inserita nel



Name	Comment	Type	Range	Relaxed	Nominal	Low	High	Step	List
1	vf_0.0045	Real	Stepped	<input type="checkbox"/>	0.0045	0.0045	= 0.0045	1.0	= 1.0
2	vf_0.005	Real	Stepped	<input type="checkbox"/>	0.005	0.0045	= 0.0045	1.0	= 1.0
3	vf_0.01	Real	Stepped	<input type="checkbox"/>	0.01	0.0045	= 0.0045	1.0	= 1.0
4	vf_0.015	Real	Stepped	<input type="checkbox"/>	0.015	0.0045	= 0.0045	1.0	= 1.0
5	vf_0.02	Real	Stepped	<input type="checkbox"/>	0.02	0.0045	= 0.0045	1.0	= 1.0
6	vf_0.025	Real	Stepped	<input type="checkbox"/>	0.025	0.0045	= 0.0045	1.0	= 1.0
7	vf_0.03	Real	Stepped	<input type="checkbox"/>	0.03	0.0045	= 0.0045	1.0	= 1.0
8	vf_0.035	Real	Stepped	<input type="checkbox"/>	0.035	0.0045	= 0.0045	1.0	= 1.0
9	vf_0.04	Real	Stepped	<input type="checkbox"/>	0.04	0.0045	= 0.0045	1.0	= 1.0
10	vf_0.045	Real	Stepped	<input type="checkbox"/>	0.045	0.0045	= 0.0045	1.0	= 1.0
11	vf_1	Real	Stepped	<input type="checkbox"/>	1.0	0.0045	= 0.0045	1.0	= 1.0

Figura 5.14: Schermata dei valori della volume fraction introdotti in Optimus

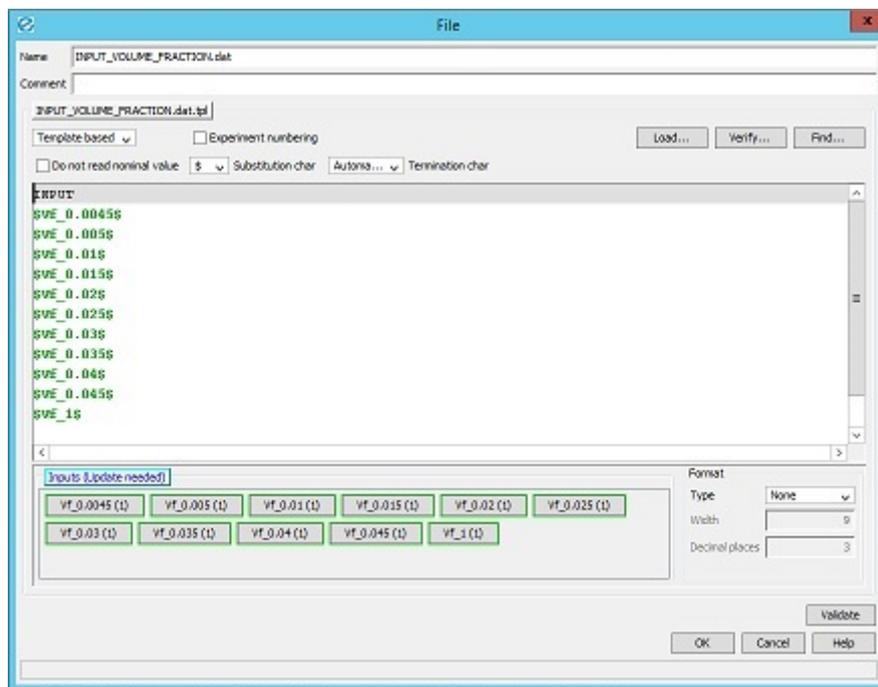


Figura 5.15: Schermata del file Input Volume Fraction in Optimus

programma.

L'altro simbolo di output riguarda il vincolo della densità, all'interno è stato imposto il valore massimo ammissibile della densità per poter entrare nell'action1, quindi per poter essere calcolata successivamente la sound transmission loss, tale valore è $\rho < 49kg/m^3$. In Optimus se il vincolo è rispettato si avrà un valore pari ad 1, se non lo è allora sarà pari a 0.

Si è reso il ciclo più facile da comprendere inserendo un altro Output: TrueFalse,

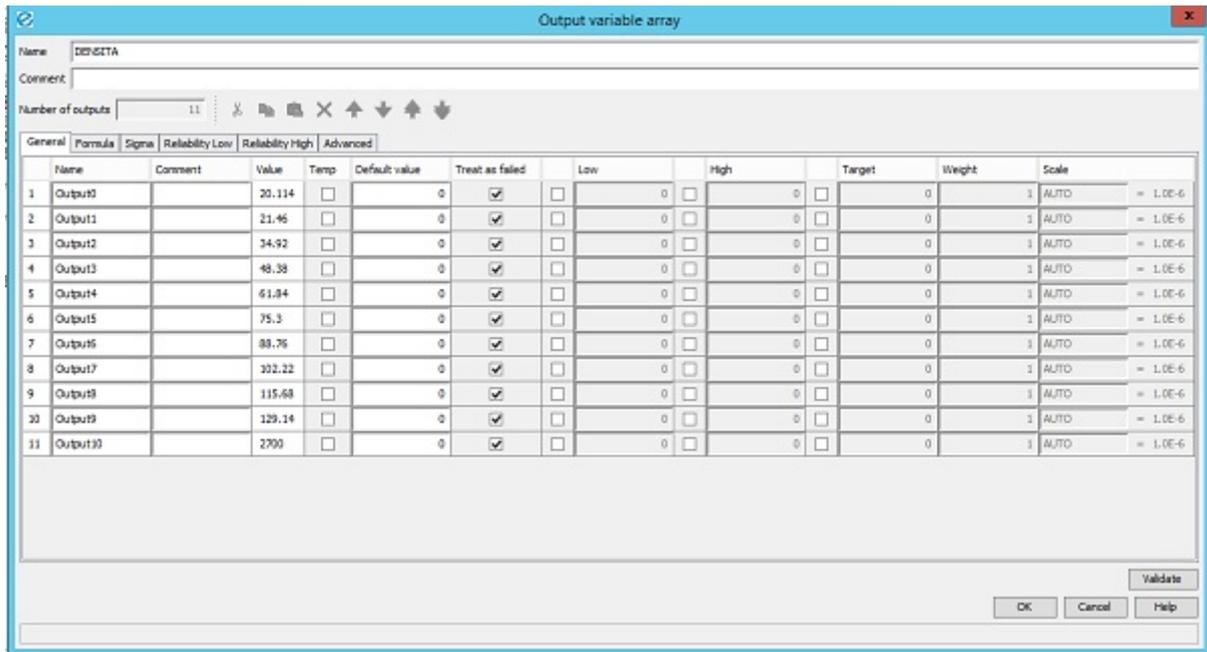


Figura 5.16: Schermata degli output delle densità in Optimus

Vf	$\rho[kg/m^3]$
0.0045	20.114
0.005	21.46
0.01	34.92
0.015	48.38
0.02	61.84
0.025	75.3
0.03	88.76
0.035	102.22
0.04	115.68
0.045	129.14
1	2700

Tabella 5.3: Densità calcolate in Optimus in funzione delle volume fraction

in cui si pone True=1 e False=0. Questa scrittura è poi utilizzata all'interno della Action1.



Action1

- il blocchetto Action 1 nella configurazione di Optimus è la parte principale del ciclo. E' collegato al file della mesh: Mesh.dat, in cui sono contenute le informazioni della piastra omogenizzata che si sta considerando.

All'interno dell'Action1 per prima cosa si stabilisce se viene rispettato il vincolo della densità, se lo è allora il relativo valore della volume fraction viene copiato nel file di Input in modo da avere nell'input finale che viene letto dall'eseguibile solo i valori a

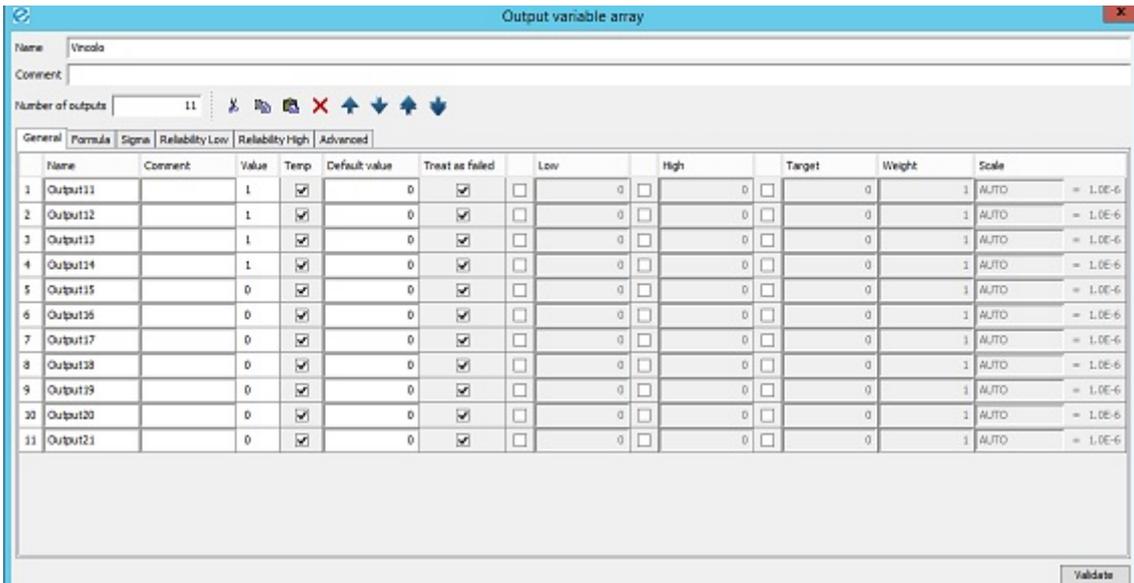


Figura 5.17: Schermata dell'Output dei vincoli in Optimus

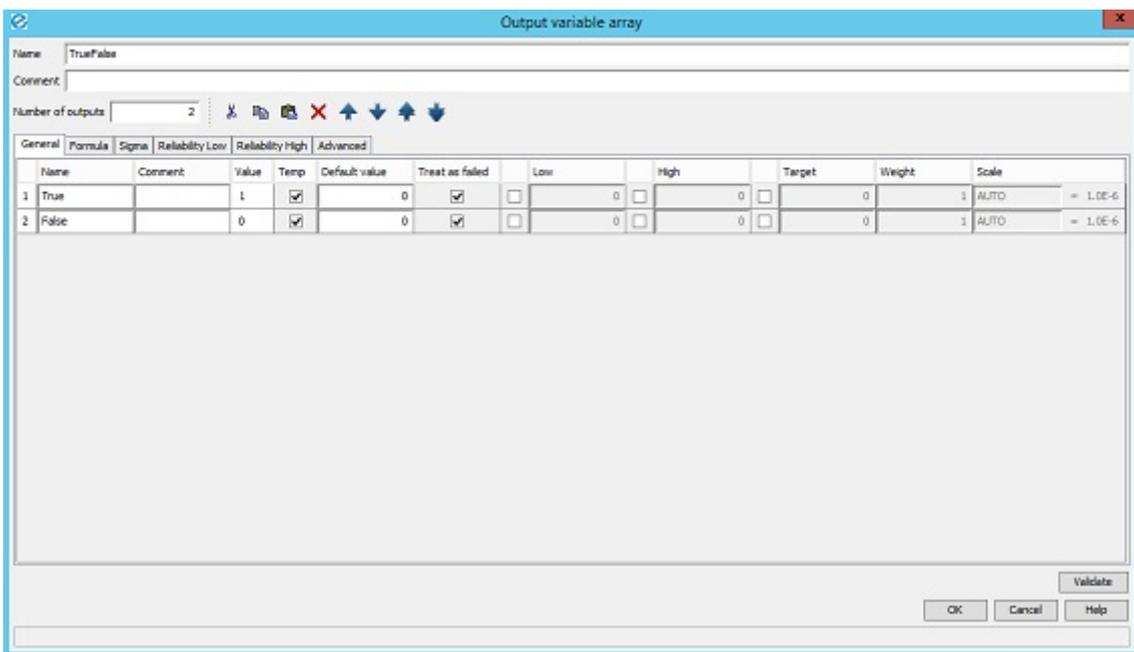


Figura 5.18: Schermata dell'Output TrueFalse in Optimus

cui corrisponde una densità che rispetta i limiti del progetto. In questo modo si riesce a diminuire di molto il costo computazionale del programma perché non si effettuano analisi di valori non corretti. Dopodiché il file INPUT-VOLUME-FRACTION.dat creato nella cartella di Optimus viene copiato nella cartella MUL2toACTRAN all'interno della cartella INPUT in Input-Volume-Fraction.dat. In seguito viene lanciato l'eseguibile PROVA.exe che richiama lo script MatLab descritto in precedenza. All'interno della cartella di Optimus che si crea una volta aperto un nuovo workflow

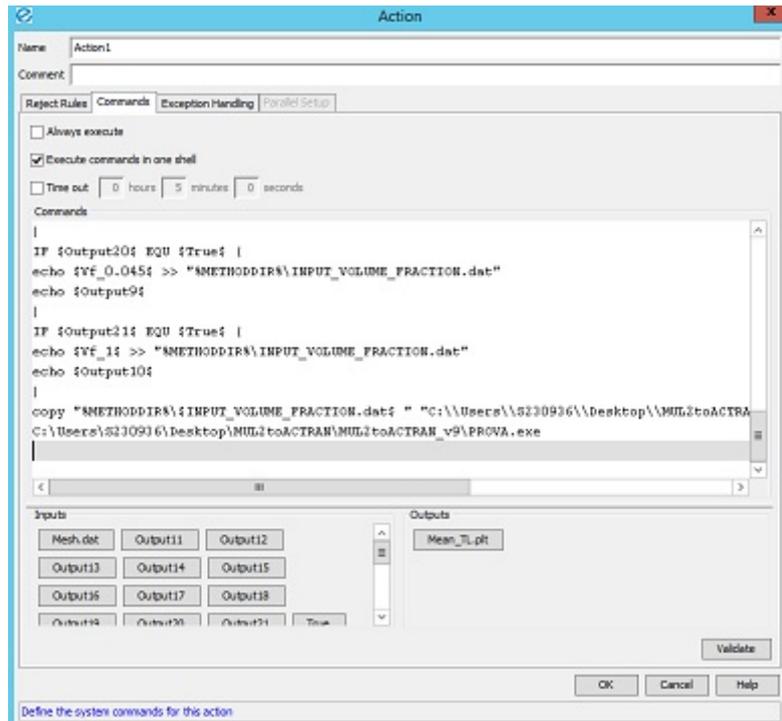


Figura 5.19: Schermata di Action1 in Optimus

si crea una cartella scratch dove è possibile monitorare l'avanzamento dell'eseguibile. Per ogni valore di Volume fraction l'eseguibile creerà due file di risultati: PSD-Sandwich-MM-Vf=(valore della Vf analizzata).plt e Sandwich-MM-Vf=(valore della Vf analizzata).plt, tutti i risultati si troveranno all'interno della stessa cartella RESULT-PLT. L'eseguibile per calcolare i risultati di un solo valore di volume fraction impiega circa 13 ore. Dopodiché lo stesso eseguibile legge il file dei risultati PSD-Sandwich-MM-Vf=(valore della Vf analizzata).plt per ogni valore di Vf in input e di ogni file legge i 50 valori dell'intensità sonora incidente, $I_i[W/m^2]$ che varia con la frequenza ma non con la volume fraction, essendo l'intensità sonora esterna quindi non correlata al materiale; e dell'intensità sonora trasmessa, $I_t[W/m^2]$ che varia al variare della frequenza e al variare della volume fraction essendo calcolata nell'ambiente interno separato da quello esterno dalla parete fatta di metamateriale (piastra omogenizzata di schiuma di melammina e inclusioni di alluminio). Questi due valori sono importanti perché permettono il calcolo della sound transmission loss. Ad ogni valore di frequenza corrisponderà un valore della $TL[dB]$, in totale per ogni Vf in input si avranno 50 valori della sound transmission loss, perché ci sono 50 valori di frequenza $f = 10 : 10 : 500Hz$. Dall'eseguibile si ottiene il file Mean-TL.plt che contiene i valori della volume fraction con i corrispondenti valori della sound transmission loss media, cioè calcolata come media aritmetica dei valori di TL calcolati al variare della frequenza: $TL_{media} = \frac{TL_{f=10} + TL_{f=20} + \dots + TL_{f=500}}{50}$. Il file Mean-TL.plt si presenta in questo modo:

Vf	TL media [dB]
0.0045	14.6913
0.005	14.7204
0.01	14.8937
0.015	15.0157

Tabella 5.4: File Mean-TL.plt ottenuto tramite l'eseguibile all'interno di Action1 in Optimus

- Il file ottenuto tramite Action1 si trova all'interno della cartella di Optimus, inserendo un altro blocco File è possibile caricare il file ottenuto nel ciclo di Optimus, in questo modo collegandolo al blocchetto di Output è possibile leggere direttamente dal file i dati desiderati.

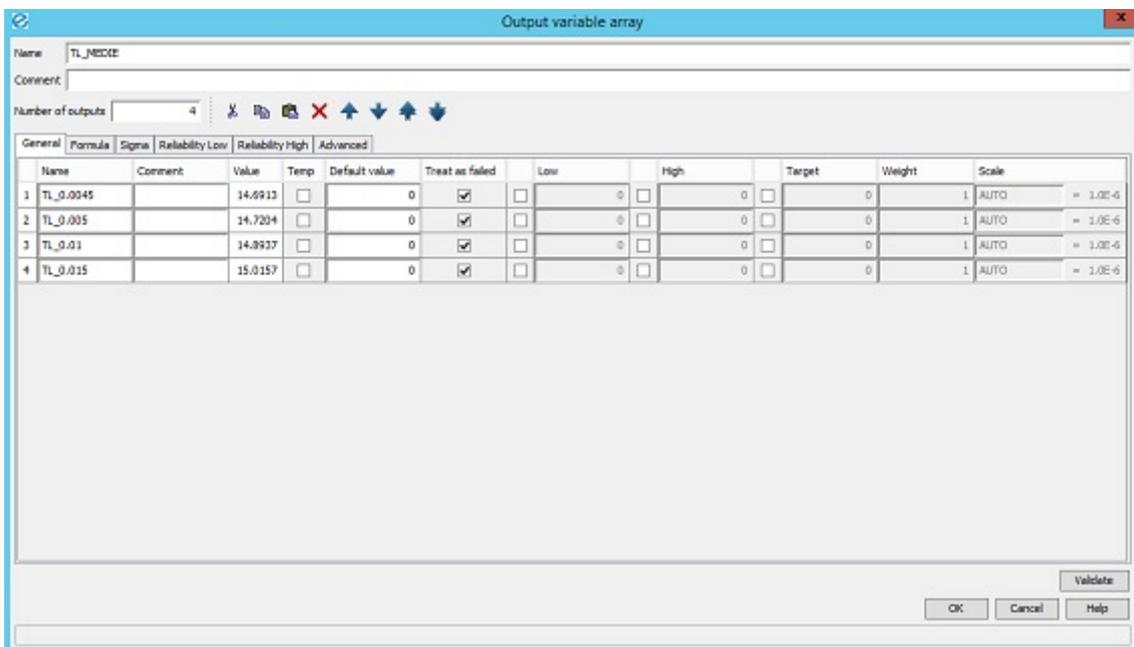


Figura 5.20: Schermata del file Mean-TL.plt in Optimus

I valori della sound transmission loss possono essere letti solo alla fine dell'intero ciclo, questo li rende non immediati e il costo computazionale per il calcolo di ciascun valore è molto elevato.

Ottimizzazione e risultati

6.1 Risultati di Optimus

I risultati ottenuti in Optimus in seguito alla simulazione riguardano i valori della sound transmission loss e della densità in funzione della volume fraction di alluminio nel meta-materiale scelto.

Vf	$\rho[kg/m^3]$	TL media [dB]
0.0045	20.11	14.6913
0.005	21.46	14.7204
0.01	34.92	14.8937
0.015	48.38	15.0157

Tabella 6.1: Densità e Sound Transmission Loss al variare della frequenza ottenuti in Optimus

I risultati vengono riportati graficamente per mettere in risalto l'andamento della densità e della perdita di potenza sonora trasmessa al variare della frazione in volume. Si nota come l'andamento della densità: $\rho_{eff} = \rho_M(1 - V_f) + \rho_{Al}V_f$ è lineare in funzione di Vf, aumenta all'aumentare della frazione in volume dell'inclusione. Si ricorda che per la densità della schiuma di melammina si considera un valore pari a $\rho_M = 8kg/m^3$, che è il valore della densità effettiva in caso della schiuma in assenza di inclusioni $V_f = 0$, per la densità dell'alluminio invece $\rho_{Al} = 2700kg/m^3$, corrisponde alla densità effettiva per la matrice con una frazione in volume dell'inclusione $V_f = 1$ quindi è come se fosse tutto alluminio. L'aumento della densità del materiale corrisponde all'aumento del peso specifico del materiale, ma trattandosi di materiale aeronautico il peso deve essere limitato. Il punto di ottimo corrisponde a $V_f = 0.015$ con un densità pari a $\rho = 48.38kg/m^3$, che rispetta il vincolo imposto in quanto la densità del NOMEX è $\rho = 48kg/m^3$. Allo

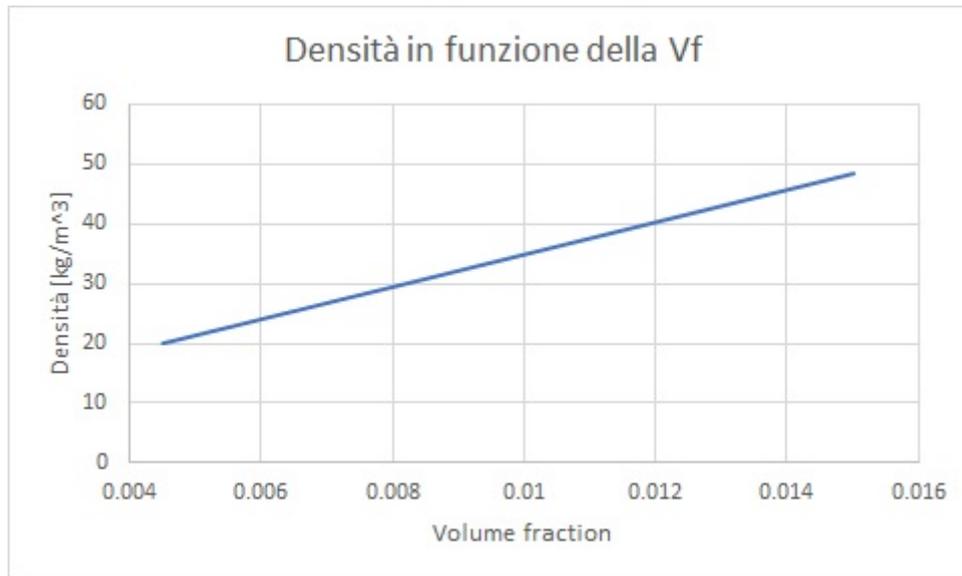


Figura 6.1: Andamento della densità per i diversi valori di Volume fraction ottenuti da Optimus

stesso modo all'aumentare del valore dell'input aumenta anche il valore della sound transmission loss media corrispondente. In letteratura non si trovano grafici che mostrano la

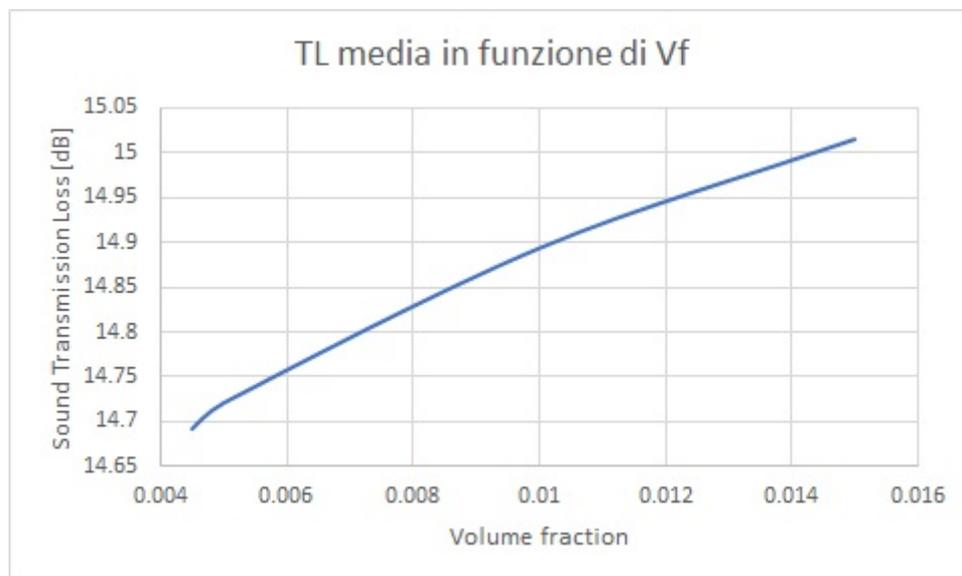


Figura 6.2: Andamento della densità per i diversi valori di Volume fraction ottenuti da Optimus

dipendenza della sound transmission loss al variare della frazione in volume del materiale considerato, per questo si è scelto di valutare la perdita di trasmissione sonora anche per tutti gli altri valori della frazione in volume in input, anche se non rispettano il vincolo della densità, ma permettono di avere un'ampia gamma di valori e di vedere l'effettivo andamento dei parametri. Prima di tutto si sono calcolati sia la densità che la sound transmission loss al variare della volume fraction tramite Optimus eliminando il vincolo

della densità. Riportando sia la densità che la sound transmission loss nello stesso grafico

Vf	$\rho[kg/m^3]$	TL media [dB]
0.0045	20.11	14.6913
0.005	21.46	14.7204
0.01	34.92	14.8937
0.015	48.38	15.0157
0.02	61.84	15.1361
0.025	75.3	15.2142
0.03	88.76	15.3699
0.035	102.22	15.4465
0.04	115.68	15.5739
0.045	129.14	15.6724
1	2700	25.0022

Tabella 6.2: Densità e Sound Transmission Loss per tutti i valori di input in Optimus

è possibile notare come per piccole variazioni della frazione in volume l'andamento dei due parametri aumenta ma di poco, si ha un brusco cambiamento per $Vf = 1$, ma questo succede perché i valori di input considerati sono molto fitti fino a $Vf = 0.045$ e poi il valore successivo è proprio $Vf = 1$, avendo molti più valori di volume fraction disposti regolarmente sull'intero step di simulazione l'andamento sarebbe sempre lineare per entrambi i parametri. Si ricorda che per il calcolo della sound transmission loss entrano in

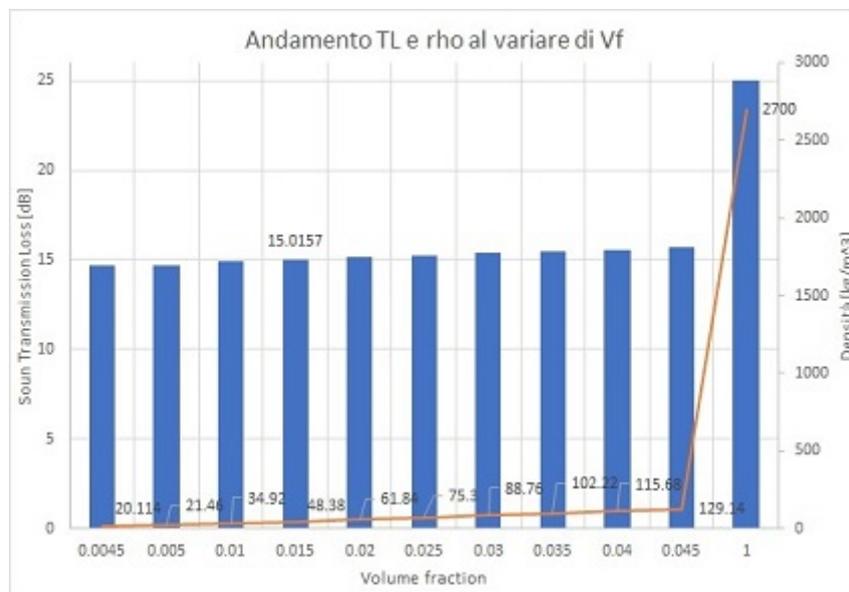


Figura 6.3: Andamento della sound transmission loss e della densità al variare di tutti i valori della volume fraction in Input in Optimus

gioco diversi fattori, non solo la frazione in volume come per la densità:

$$TL = 10 \log_{10} \frac{I_i}{I_t} [dB] \quad (6.1)$$

i parametri fondamentali sono l' intensità sonora incidente $I_i[W/m^2]$, che dipende dalla frequenza, e l'intensità sonora trasmessa $I_t[W/m^2]$, che dipende dalla frequenza e dalla frazione in volume delle inclusioni. L'intensità sonora incidente non dipende dal materiale essendo un parametro esterno ad esso, quindi il suo andamento è influenzato solo dalla frequenza: $f = 10 : 10 : 500Hz$, infatti al variare della frazione in volume si ottengono sempre gli stessi valori di $I_i[W/m^2]$. La curva non ha un andamento lineare e presenta

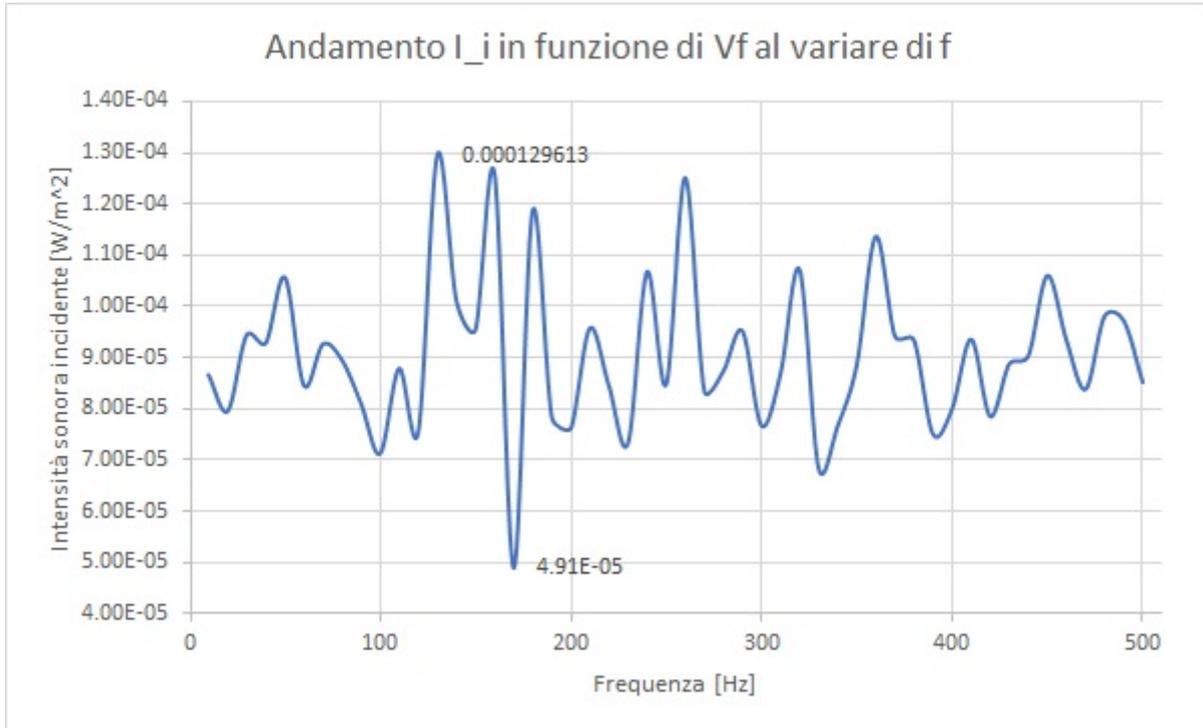


Figura 6.4: Andamento dell'intensità sonora incidente al variare della frequenza

un massimo per $f = 130Hz$ pari a $I_i = 0.000129613W/m^2$ e un minimo per $f = 170Hz$ pari a $I_i = 4.91e^{-05}W/m^2$; nell'insieme la potenza sonora si ritrova all'interno di una fascia che va da $7.00e^{-05}W/m^2$ a $1.10e^{-04}W/m^2$, non considerando i picchi. L'intensità sonora trasmessa essendo dipendente dal materiale, perché è l'intensità sonora che viene trasmessa all'interno della fusoliera dopo che quella incidente ha incontrato il materiale, varia sia al variare della volume fraction che della frequenza. L'andamento di $I_t[W/m^2]$ diminuisce all'aumentare della frazione in volume delle inclusioni, infatti il massimo si ha per $f = 160Hz$ per $Vf = 0.0045$ a cui corrisponde $I_t = 1.80e^{-05}W/m^2$, il minimo si ha invece per $f = 470Hz$ per $Vf = 1$ con $I_t = 1.03e^{-07}W/m^2$. Dopo l'ultimo picco per $f = 320Hz$ tutte le curve si attenuano ed assumono un andamento simile alla curva di $Vf = 1$, che fino al quel momento è molto distante da tutte le altre curve e non presenta lo stesso andamento, caratteristica comune a tutti gli altri valori di volume fraction. Tutte le curve, tranne quella per $Vf = 1$ sono molto compatte tra loro, del resto i valori di volume fraction riportati sono molto fitti, invece la curva che si differenzia è proprio quella per cui il valore della frazione in volume dell'inclusione è molto diverso rispetto agli altri, infatti

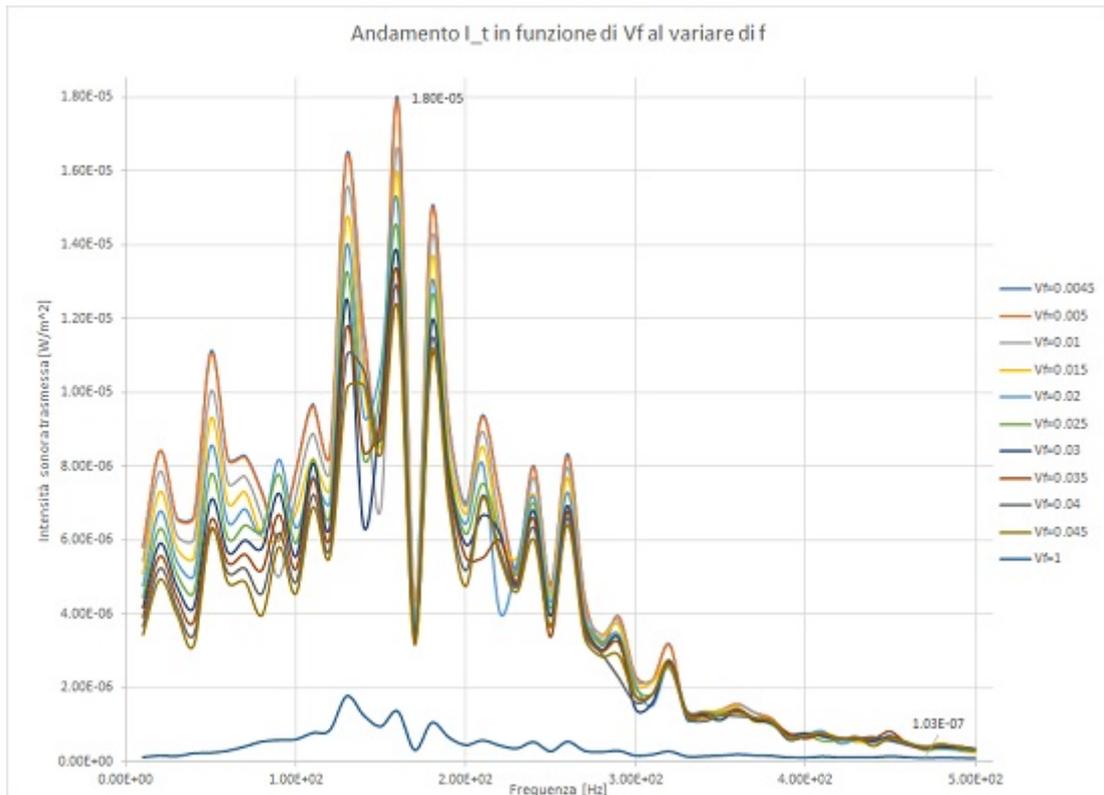


Figura 6.5: Andamento dell'intensità sonora trasmessa al variare della frequenza per i diversi valori di Vf

è come se si analizzasse un pannello in alluminio e non un pannello composito in schiuma di melamina e inclusioni in alluminio, come per i casi precedenti. Essendo l'intensità sonora trasmessa al denominatore ci si aspetta che l'andamento della sound transmission loss sia opposta a quest'ultima, infatti è ciò che succede. Mentre i valori maggiori di I_t corrispondevano a $Vf = 0.0045$ e poi l'andamento era decrescente all'aumentare della Vf , per la TL l'andamento è crescente all'aumentare della volume fraction. In particolare si nota come il valore maggiore della sound transmission loss $TL = 29.61192682dB$ si ha per $Vf = 1$ e $f = 500Hz$, invece il valore minore $TL = 8.453709726dB$ si ha per $Vf = 0.0045$ e $f = 160Hz$. Ovviamente i valori riportati si riferiscono al valore reale della sound transmission loss al variare della frequenza e non alla media per questo si hanno valori maggiori o minori a quelli che sono stati riportati precedentemente. Nel grafico che riporta l'andamento della sound transmission loss in funzione della frequenza si nota come la perdita di trasmissione del suono aumenti all'aumentare della frazione in volume, questo andamento è concorde con ciò che ci si aspettava in quanto materiali con densità maggiore sono in grado di assorbire maggiormente il suono e quindi trasmettere meno rumore esterno all'interno del velivolo. Si è deciso di analizzare nel dettaglio tre valori della volume fraction che rappresentano il materiale privo di inclusioni $Vf = 0$ quindi composto semplicemente da schiuma di melamina, il materiale tutta inclusione composto da alluminio $Vf = 1$, e per $Vf = 0.015$ materiale in schiuma di melamina

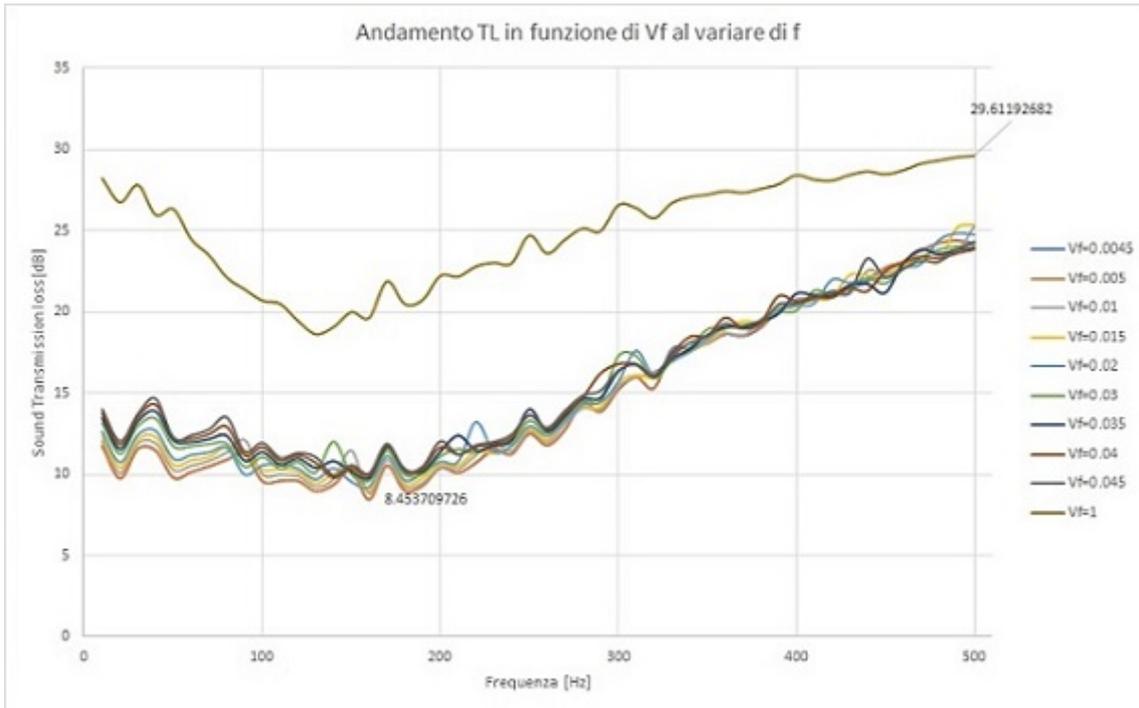


Figura 6.6: Andamento della sound transmission loss al variare della frequenza per i diversi valori di Vf

e 1.5% di inclusioni che rispetta il vincolo della densità. Riportando tali valori in un

Vf	TL media [dB]	$\rho[kg/m^3]$
0	14.6004	8
0.015	15.0157	48.38
1	25.0022	2700

Tabella 6.3: Densità e Sound Transmission Loss per tre valori di Volume fraction

grafico si nota come l'andamento migliore è quello per $Vf = 1$, ma in base al rapporto densità/ sound transmission loss $Vf = 0.015$ ha un buon andamento, non solo ma per $f = 130Hz$ mentre la curva di $Vf = 1$ ha un punto di minimo $TL = 18.64dB$, la curva di $Vf = 0.015$ non ha questo brusco abbassamento, ma ha un andamento pressoché costante fino ad $f = 200Hz$, dopo il quale inizia ad aumentare linearmente fino ad un valore di $TL = 25.34dB$ per $f = 500Hz$. L'andamento del materiale per piccoli valori della frazione in volume delle inclusioni di alluminio alle basse frequenze ha un buon andamento e non presenta una brusca diminuzione della sound transmission loss per basse frequenze. Il metamateriale scelto per frazione in volume delle inclusioni $Vf = 0.015$ alle basse frequenze ha un buon comportamento, non riducendo le proprie prestazioni, anche se sono minori rispetto a quelle riportate alle frequenze maggiori.

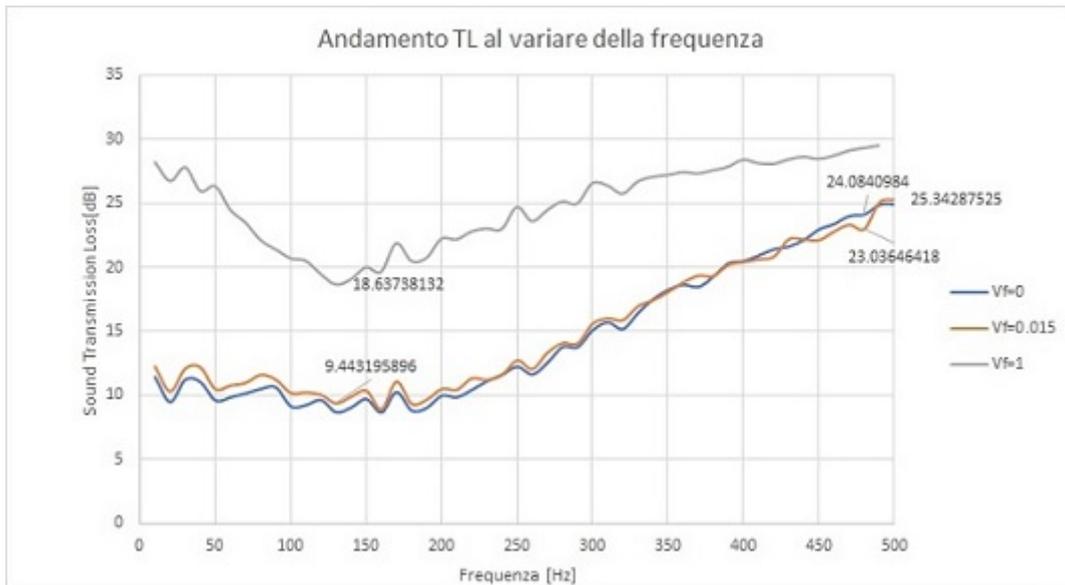


Figura 6.7: Andamento della sound transmission loss al variare della frequenza per tre valori di V_f

6.2 Metodi di ottimizzazione utilizzati

Il workflow di Optimus con il vincolo sulla densità nonostante ci siano 11 input, cioè 11 valori di volume fraction diversi, calcola solo quattro valori della sound transmission loss, cioè quelli per cui la densità rispetta il vincolo imposto, cioè hanno una densità minore di $49\text{kg}/\text{m}^3$. L'ottimizzazione di questi valori può essere effettuata tramite diversi metodi implementati in Optimus. Si effettua l'ottimizzazione di tutti e quattro i valori ma c'è un solo valore di ottimo che corrisponde ad un valore di volume fraction pari a $V_f = 0.015$. Utilizzando il comando New Method si può scegliere tra i seguenti:

- Nominal method
- Table method
- DOE method
- Optimization method
- Multi-Objective Optimization
- Monte Carlo method
- Optimal Design Method

Alcuni di questi metodi sono immediati in quanto dopo aver scelto gli input e gli output da ottimizzare non effettuano nuove simulazioni ma semplicemente li mettono in relazione tra loro, questo fa sì che il costo computazionale non sia eccessivo. Altri metodi,

invece, a seguito della scelta dei valori da ottimizzare calcolano dei nuovi input e quindi il workflow viene eseguito nuovamente, calcolando dei nuovi valori di sound transmission loss ottimizzati, in questo caso l'esecuzione può richiedere molte ore o addirittura dei giorni.

6.2.1 Metodi Nominal e Table

Nel caso del Nominal method viene eseguito un esperimento con le impostazioni nominali per le variabili di input. Utilizzando il comando Reuse Result Optimus è in grado di controllare se l'esperimento è già stato calcolato prima di iniziare la simulazione, in caso affermativo Optimus prende il risultato esistente e non rifà la simulazione, questo permette di evitare l'esecuzione di simulazioni già effettuate in precedenza. Per i nostri fini i risultati ottenuti tramite questo metodo non aggiungono nessuna informazione a ciò che si sapeva già, in quanto dopo aver scelto gli input e gli output da valutare semplicemente vengono messi in relazione tra loro ed è possibile scegliere un solo post-process: Summary. Lo stesso

Vf	$\rho[kg/m^3]$	TL media [dB]
0.0045	20.114	14.6913
0.005	21.46	14.7204
0.01	34.92	14.8937
0.015	48.38	15.0157

Tabella 6.4: Summary del Nominal method

accade per il Table method che produce lo stesso risultato del metodo Nominal.

6.2.2 Metodo DOE

Più complesso ed esaustivo è il DOE method: Design of Experiments, che consente di ottenere la massima quantità di informazioni riducendo al minimo il numero degli esperimenti, comprende diversi tipi di analisi:

- Full Factorial, richiede un gran numero di esperimenti che aumentano esponenzialmente il costo computazionale e non è molto efficiente.
- 3 Level Full Factorial, va utilizzato se si analizza un modello del secondo ordine e può essere utilizzato fino ad un massimo di 7 fattori.
- Fractional Factorial, è un sottoinsieme adeguatamente scelto di un design fattoriale completo. Anche in presenza di pochi fattori gli esperimenti richiesti possono diventare rapidamente elevati, a causa dell'elevato costo computazionale spesso non permette di effettuare diverse esecuzioni per l'esperimento.

- Central Composite Faced/ Inscribed/ Circumscribed/ Scaled , contengono un design fattoriale frazionato con punti centrali che aumentano con un gruppo di starpoint che consentono la stima della curvatura. Sono facilmente adattabili a modelli quadratici completi.
- Plackett Burmann, è molto efficiente se si è interessati solo agli effetti principali di un esperimento.
- Box- Behnken, è un design quadratico indipendente in quanto non contiene un design fattoriale incorporato.
- Taguchi, utilizza progetti fattoriali frazionati a due-tre livelli ma anche a livelli misti; è possibile stimare il numero massimo di effetti principali in modo imparziale con un numero minimo di esecuzioni per l'esperimento.
- Latin Hypercube, è un DOE casuale, anche se alcuni fattori non sembrano essere importanti ogni punto del progetto fornisce ancora informazioni sull'influenza degli altri fattori sulla risposta, in modo da non rendere le esecuzioni inutili.
- Minimax, consiste nel trovare il design con il raggio di copertura minimo.
- Maximin, consiste nel trovare il design con il raggio di copertura massimo.
- Adaptive DOE, include al suo interno le seguenti tecniche: Space Learning (Maximin Sampling MMS) e Feature Learning (Model Error Sampling MES).
- Middle, calcola il punto medio tra gli input, quindi fa una sola esecuzione.

Nel metodo DOE, qualsiasi design dei sopraelencati si scelga, avverranno delle nuove esecuzioni per ogni esperimento. Nel nostro caso in base agli input e in base al costo computazionale si è scelto di adottare il Fractional Factorial, sottoinsieme adeguatamente scelto di un design fattoriale completo. Il numero di esperimenti da effettuare viene calcolato in base a:

$$N = 2^{(k-p)} \tag{6.2}$$

con k il numero dei fattori, p il numero intero più piccolo di k design, nel nostro caso $N = 2^{(4-1)} = 8$ esperimenti, ma utilizzando la procedura Reuse Result il costo computazionale non è stato eccessivo. In questo metodo vengono calcolati nuovi valori di input tramite i quali viene eseguito nuovamente il workflow di Optimus e per ogni input viene calcolato il valore della sound transmission loss. Gli input vengono ricombinati tra loro per 8 volte, ma per ogni esperimento i valori di input calcolati sono solo 2, che vengono ricombinati tra loro in modo da avere sempre quattro input. Alla fine di ogni esperimento si ottengono i valori della sound transmission loss per gli input relativi alla simulazione effettuata. Essendo solo due i valori di input calcolati durante gli esperimenti si otterranno solo due valori di

Vf DOE
0.0045
0.9995
0.0045
0.0045

Tabella 6.5: Esempio di Input durante l'esperimento Fractional Factorial DOE

perdita di trasmissione del suono, ricombinati tra loro più volte per ogni esperimento, ma tali valori saranno ottimizzati. Infatti i valori di TL ottenuti sono maggiori, anche se solo di pochi decimi rispetto a quelli calcolati in precedenza.

Vf tramite DOE	TL media [dB] tramite DOE
0.0045	14.7119
0.9995	25.0033

Tabella 6.6: Valori volume fraction e sound transmission loss in seguito a Fractional Factorial DOE

Optimus contiene diversi metodi di elaborazione e presentazione dei risultati, consentendo un'interazione tra l'utente e i risultati generati dall'esecuzione dei metodi. La post-elaborazione opera sui dati grezzi generati da uno qualsiasi dei metodi: DOE, Optimization, Robustness e Reliability o Response Surface Models. L'utente in qualsiasi momento può acquisire viste di post-elaborazione. Si è deciso di riportare solo i grafici più significativi di ogni elaborazione. Prima di tutti viene riportato il Bubble plot che è una variazione del grafico a dispersione e può mostrare contemporaneamente fino a quattro dimensioni. Le prime due variabili sono definite dalle posizioni x e y della bolla proprio come in un normale diagramma a dispersione, mentre la terza e la quarta variabile sono indicate dalla dimensione e dal colore della bolla. E' possibile selezionare anche solo tre variabili, il codice colore è: blu=esperimenti fattibili, rosso= esperimenti falliti, arancione= esperimenti non fattibili, grigio= esperimenti respinti, azzurro= esperimenti per l'attuale iterazione selezionata, utilizzata solo per i metodi di ottimizzazione.

Nel grafico in ascissa ci sono i valori della volume fraction da 0.0045 ad 1, in ordinata i valori della sound transmission loss da 12 a 26, entrambi i parametri sono relativi all'input $Vf = 0.015$ che corrisponde al nostro valore di ottimo. Il raggio delle bolle è la densità infatti va da un minimo di 20.114 (risultato ottenuto per $Vf = 0.0045$) ad un massimo di 2698.65 (per $Vf = 0.995$). Tutti gli esperimenti effettuati sono andati a buon fine, essendo le bolle blu, inoltre si nota come all'aumentare della frazione in volume le bolle aumentano le dimensioni, proprio perché il raggio dipende dalla densità e quest'ultima aumenta all'aumentare della frazione in volume delle inclusioni. Partendo da sinistra in basso fino a destra in alto, le bolle rappresentano gli esperimenti eseguiti, l'esperimento numero 3 non ha prodotto nessun risultato.

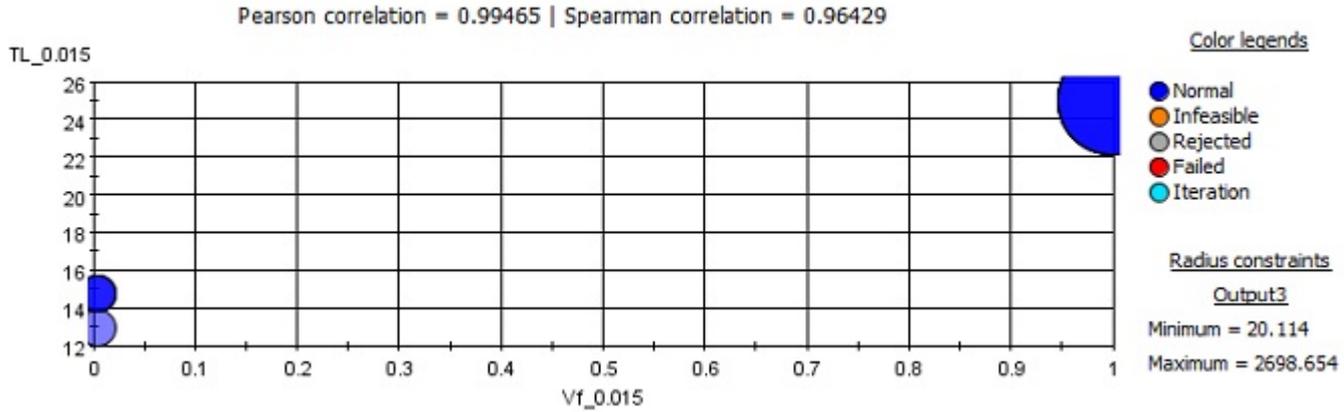


Figura 6.8: Bubble plot per Fractional Factorial DOE con $Vf = 0.015$ in ascissa e il TL corrispettivo in ordinata

Esperimento	Vf tramite DOE	TL media [dB] tramite DOE	$\rho[kg/m^3]$
1	0.0045	12.8892	20.114
4	0.0045	14.7119	20.114
2	0.9995	25.0033	2698.654

Tabella 6.7: Valori volume fraction, sound transmission loss e densità in seguito a Fractional Factorial DOE contenuti nel Bubble plot

L'andamento lineare della sound transmission loss al variare della frazione in volume è messo in evidenza anche nel grafico 2D in Optimus, ottenuto tramite il New Model.

6.2.3 Multi-Objective Optimization

Ai fini della nostra analisi non è possibile utilizzare l'Optimization Method che vale solo per obiettivo singolo, noi invece vogliamo massimizzare tutti i valori di sound transmission loss che si ottengono dalla simulazione di Optimus, per far ciò occorre utilizzare l'ottimizzazione multi-obiettivo, che ha lo scopo di identificare l'insieme delle soluzioni Pareto-ottimali, piuttosto che trovare un unico design ottimale che superi le prestazioni di tutti gli altri. Il valore di ottimo della volume fraction che rispetta i vincoli imposti da CASTLE è $Vf = 0.015$, cioè una piastra in shiuma di melammina con l'1.5% di inclusioni cilindriche di alluminio. In Optimus si hanno diversi algoritmi tra cui scegliere per questo tipo di ottimizzazione:

- Normal-Boundary Intersection Method
- Weighted Objective Method
- Weighted Tchebycheff Method
- Min-Max Optimum

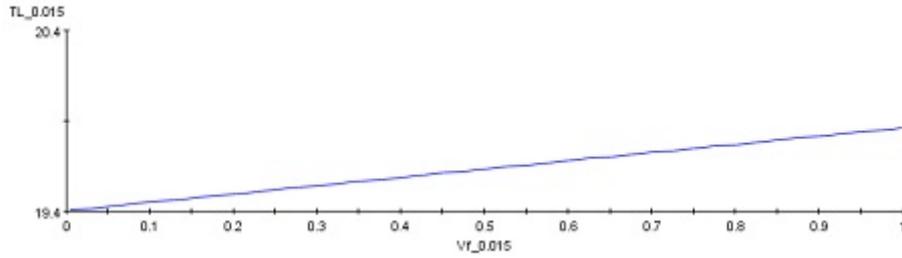


Figura 6.9: 2D plot per Fractional Factorial DOE con $Vf = 0.015$ in ascissa e il TL corrispettivo in ordinata

- NSEA+
- mPSO
- Trade-Off Method

Di tutti gli algoritmi elencati l'unico utilizzabile per il nostro scopo è NSEA+: algoritmo evolutivo di ordinamento non dominato (NSEA=non-dominated sorting evolutionary algorithm) che viene utilizzato per eseguire un'ottimizzazione multiobiettivo e generare il fronte di Pareto. Dopo aver scelto gli input da analizzare, si è scelto di analizzare tutti i valori di input che rispettavano il vincolo di $\rho < 49kg/m^3$ e come output si è scelto di massimizzare i valori della sound transmission loss media corrispondenti. Si è deciso di non analizzare come output i valori della densità per avere un costo computazionale ridotto, in quanto l'algoritmo NSEA+ calcola dei nuovi valori di input e quindi si avranno dei nuovi valori di output da calcolare. Si è scelto di far generare solo quattro esperimenti in modo da ottenere l'intera simulazione dopo solo 9 giorni. Per ogni valore di volume fraction vengono calcolati tramite l'algoritmo 4 nuovi valori della frazione in volume ottimizzati e i corrispettivi valori della sound transmission loss ottimizzati.

Riportando i valori ottimizzati in un grafico frazione in volume-perdita di trasmissione sonora si nota come si ricopre una vasta gamma di valori della volume fraction, la curva con valori di TL maggiori continua ad essere quella corrispondente a $Vf = 0.015$.

E'possibile mettere in relazione i valori della sound transmission loss ottimizzati con i corrispettivi valori della densità e la curva non è più lineare come prima ma ha dei bruschi aumenti.

In seguito alla fine degli esperimenti è possibile effettuare il post-process che si desidera e per i valori che interessano. Tramite il post-process Pareto si individuano due punti, con MOO=Multi-Objective Optimization.

Pareto plot è un grafico a dispersione che mostra i punti sul fronte Pareto per due obiettivi selezionati, output o input. Con il blu si indicano gli esperimenti fattibili di successo, con l'arancione quelli non utilizzabili.

	Vf ottimizzata tramite NSEA+	TL media ottimizzata tramite NSEA+
Vf=0.0045	0.0045	14.7119
	0.7445	23.233
	0.1195	16.8729
	0.6495	22.5129
Vf=0.005	0.0045	14.7119
	0.8495	24.0441
	0.0995	16.5341
	0.5495	21.7885
Vf=0.01	0.0095	14.8831
	0.0445	15.6558
	0.3945	20.1978
	0.8745	24.2082
Vf=0.015	0.0145	15.025
	0.1795	17.8986
	0.5395	21.67
	0.7645	23.3717

Tabella 6.8: Esperimenti eseguiti in Optimus per l'ottimizzazione multiobiettivo tramite l'algoritmo NSEA+

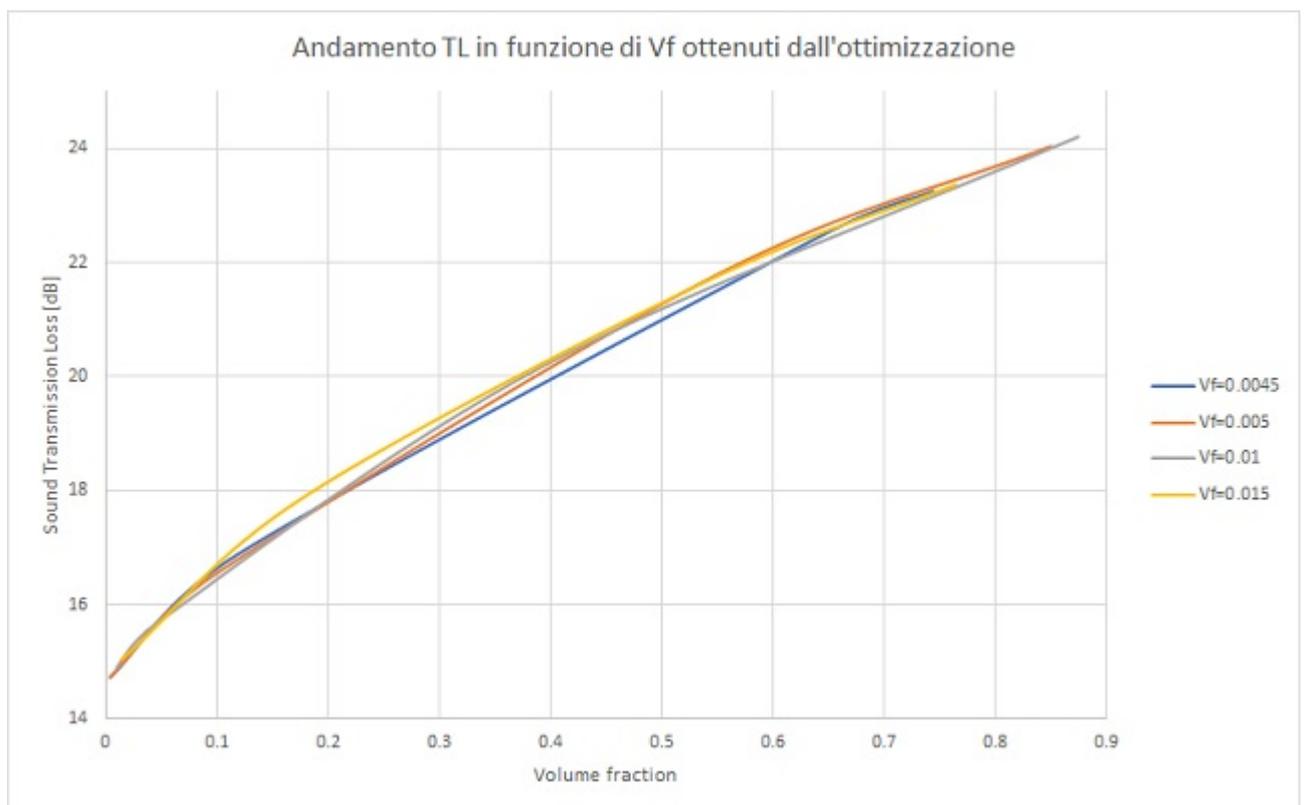


Figura 6.10: Andamento della sound transmission loss in funzione della volume fraction, ottenuti in Optimus in seguito all'ottimizzazione con l'algoritmo NSEA+

Riportiamo il grafico a bolle come per il DOE, ma questa volta la dimensione delle bolle è dovuta al GOAL di Optimus che è pari al valore negativo delle sound transmission

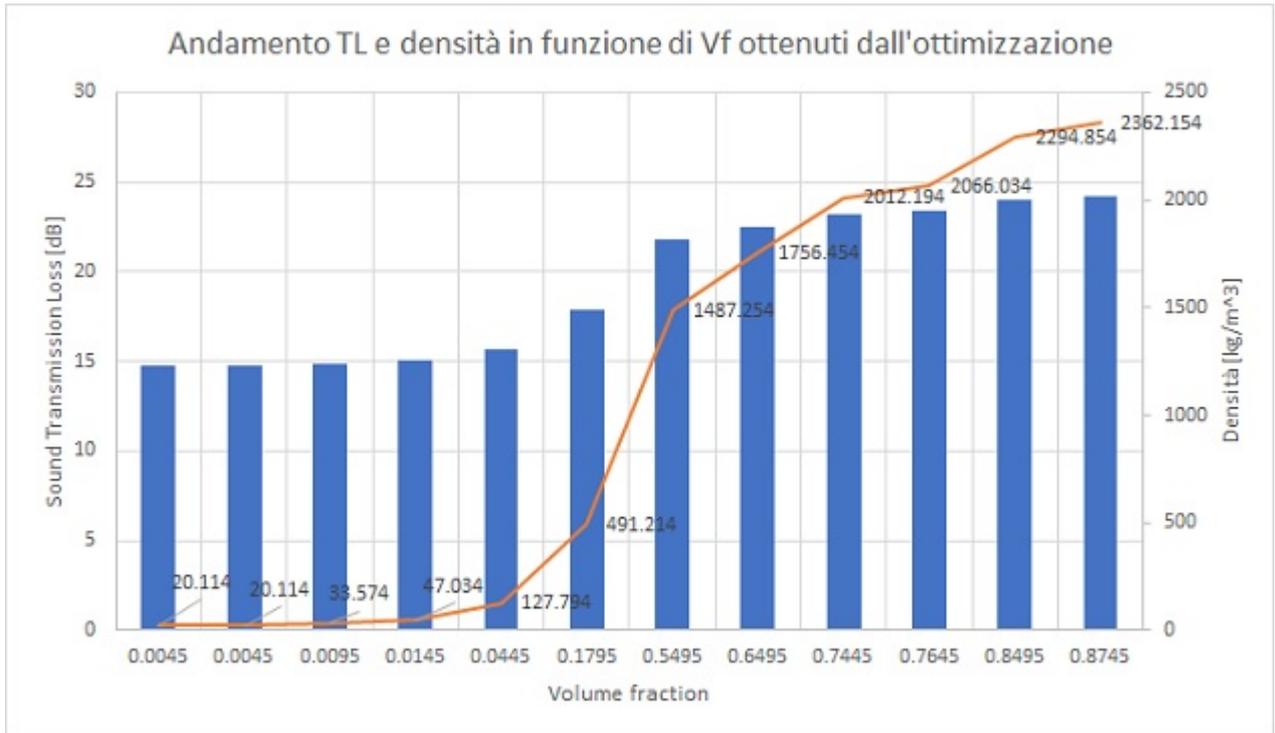


Figura 6.11: Andamento della sound transmission loss e della densità in funzione della volume fraction, ottenuti in Optimus in seguito all'ottimizzazione con l'algoritmo NSEA+

Vf tramite MOO	TL media [dB] tramite MOO
0.1795	17.8986
0.7645	23.3717

Tabella 6.9: Valori volume fraction e sound transmission loss per $Vf = 0.015$ in seguito a MOO NSEA+ contenuti nel grafico Pareto

loss medie, per questo motivo all'aumentare della volume fraction la dimensione delle bolle diminuisce. Per Optimus i GOAL corrispondono sempre alla minimizzazione dei valori, nel nostro caso invece stiamo effettuando una massimizzazione dei valori della sound transmission loss. Il colore azzurro è dovuto agli esperimenti che sono relativi all'iterazione $Vf = 0.015$.

Un altro metodo di Post-process è l'Optimum plot che è il risultato finale dell'ottimizzazione. Fornisce una panoramica di tutte le variabili di input e output per il punto di partenza e il punto finale, insieme ai loro limiti inferiore e superiore, valori obiettivo (GOAL) e pesi. I vincoli non soddisfatti sono indicati in rosso, i valori di confine in arancione. Poiché il limite inferiore dei valori di input inseriti in Optimus è $Vf = 0.0045$ questi valori risultano di confine per l'Optimum plot e sono indicati con il colore arancione. Come è stato già descritto in precedenza i valori obiettivo (GOAL), sono pari ai valori della sound transmission loss ma negativi.

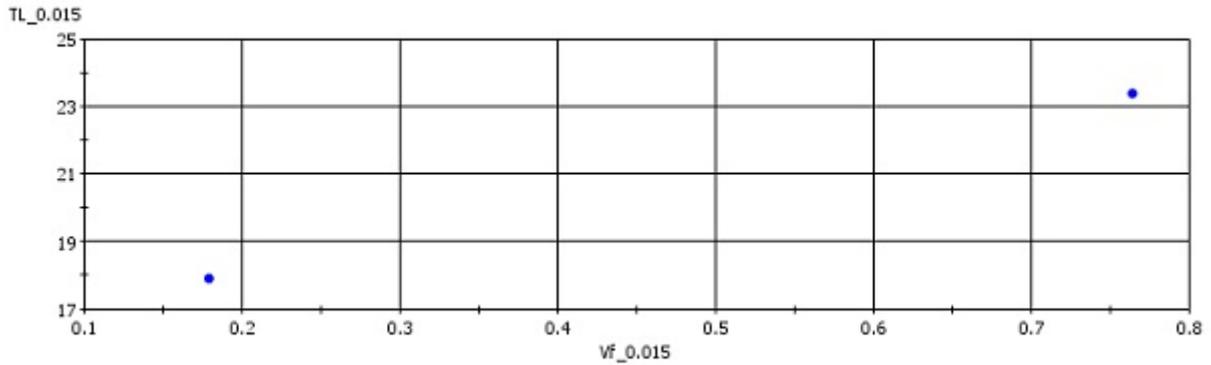


Figura 6.12: Pareto in Optimus, in seguito all'ottimizzazione con l'algoritmo NSEA+ per $Vf = 0.015$ e la sound transmission loss corrispondente

Esperimento	Vf tramite MOO	TL media [dB] tramite MOO
1	0.0145	15.025
2	0.1795	17.8986
3	0.5395	21.67
4	0.7645	23.3717

Tabella 6.10: Valori volume fraction e sound transmission loss per $Vf = 0.015$ in seguito a MOO NSEA+ contenuti nel grafico Bubble plot

Tramite gli esperimenti di ottimizzazione sono stati trovati dei valori di ottimo corrispondenti ai valori di input inseriti all'inizio della simulazione e tramite questi nuovi valori di input ottimizzati sono stati calcolati i valori della sound transmission loss che in tutti gli esperimenti effettuati ha un andamento lineare al variare della frazione in volume delle inclusioni.

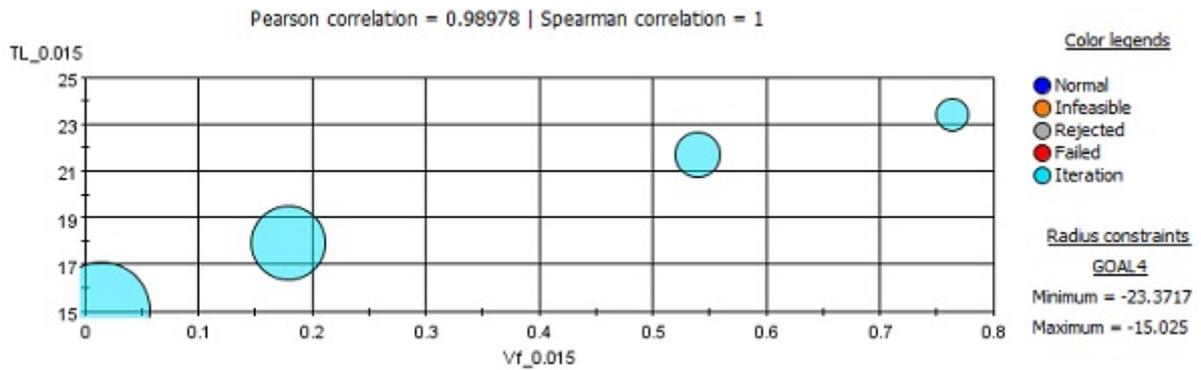


Figura 6.13: Bubble plot in seguito all'ottimizzazione multi-obiettivo con algoritmo NSEA+

	Start	Group1 [2] (2)	Group2 [4] (4)	Low	High
Inputs					
Vf_0.0045	0.0045	0.7445	0.6495	0.0045	1
Vf_0.005	0.0045	0.8495	0.5495	0.0045	1
Vf_0.01	0.0095	0.0445	0.8745	0.0045	1
Vf_0.015	0.0145	0.1795	0.7645	0.0045	1
Outputs					
TL_0.0045	14.7119	23.233	22.5129		
TL_0.005	14.7119	24.0441	21.7885		
TL_0.01	14.8831	15.6558	24.2082		
TL_0.015	15.025	17.8986	23.3717		
GOAL1	-14.7119	-23.233	-22.5129		
Weight1		0.75	-0.25		
GOAL2	-14.7119	-24.0441	-21.7885		
Weight2		0.75	-0.25		
GOAL3	-14.8831	-15.6558	-24.2082		
Weight3		-0.25	0.75		
GOAL4	-15.025	-17.8986	-23.3717		
Weight4		-0.25	0.75		

Figura 6.14: Optimum plot in seguito all'ottimizzazione multi-obiettivo con algoritmo NSEA+

Conclusioni

Considerando una piastra di metamateriale omogenizzata composta da schiuma di melamina ed inclusioni di alluminio e variando la frazione in volume di quest'ultime si è calcolata la sound transmission loss tramite i risultati ottenuti in ACTRAN al variare della frequenza $f = 10 : 10 : 500Hz$ al fine di ottimizzare le performance acustiche per applicazioni aeronautiche, quali l'isolamento acustico nella cabina di un velivolo regional di tipo turboprop. Per l'ottimizzazione si è dovuto tener conto di un vincolo imposto dal progetto CASTLE ovvero che la densità del materiale analizzato non dovesse superare la densità del NOMEX, materiale di riferimento molto utilizzato in campo aeronautico nelle strutture sandwich. Per l'analisi è stato utilizzato il software Optimus realizzato dalla NOESIS, in cui è stata implementata una configurazione in grado di calcolare i valori della sound transmission loss al variare della volume fraction, inserita come input, solo se la densità della frazione in volume corrispondente fosse inferiore a $\rho < 49kg/m^3$. Le caratteristiche dei materiali costituenti la piastra omogenizzata, quali modulo di Young, coefficiente di Poisson, modulo di elasticità tangenziale non sono stati modificati, così come non è stata modificata la mesh del materiale, si è intervenuti sulla frazione in volume delle inclusioni di alluminio presenti nel materiale per poter migliorare l'assorbimento acustico alle basse frequenze, in quanto è la frazione in volume a far variare le caratteristiche del metamateriale. Poiché la frequenza influisce sui valori della sound transmission loss in Optimus è presente un eseguibile che mette in relazione MUL2-UC e ACTRAN all'interno del blocchetto Action1, in grado di calcolare al variare della frazione in volume e al variare della frequenza i valori dell'intensità sonora incidente al materiale e trasmessa dal materiale ed in seguito calcolarne la perdita di trasmissione sonora media. Dopo aver calcolato i valori della sound transmission loss si è notato che per una frazione in volume $V_f = 0.015$, cioè 1.5% di inclusioni rispetto l'intera matrice, la perdita di trasmissione sonora corrispondente è di $TL = 15.0157dB$ mentre la densità è $\rho = 48.38kg/m^3$, cioè uguale alla densità del NOMEX. Con l'1.5% delle inclusioni di alluminio nella piastra di

shiuma di melammina si rispetta il vincolo imposto da CASTLE e si ha un buon livello di perdita di trasmissione sonora. Il materiale studiato presenta un buon compromesso tra densità e sound transmission loss. In seguito si è effettuata l'ottimizzazione, sempre tramite Optimus dei valori ottenuti, cioè sono stati calcolati nuovi valori di TL per la piastra in esame e si è dimostrato come l'andamento della sound transmission loss al variare della frazione in volume fosse lineare, aumenta all'aumentare di quest'ultima e quindi più aumenta la densità del materiale, strettamente connessa con la frazione in volume delle inclusioni, più aumenta l'assorbimento acustico del materiale quindi la sua perdita di trasmissione sonora. In futuro si potrebbe modificare la piastra esaminata agendo sui materiali costituenti, in modo da valutare l'andamento della sound transmission loss al variare delle caratteristiche dei materiali. Inoltre si potrebbero condurre altre analisi sulla piastra di metamateriale oltre che il calcolo della TL come ad esempio valutare il suo comportamento a fatica in seguito all'applicazione di carichi. Occorrerebbe anche analizzare altri materiali acustici per poter dire se quello testato è il più adatto in campo aeronautico. Attualmente, però, possiamo affermare che ha un buon andamento della sound transmission loss alle basse frequenze e magari dopo ulteriori analisi potrebbe realmente essere applicato in aeronautica.

Bibliografia

- [1] ATR. Turboprop market forecast.
- [2] G. D'Amico. Acoustic analysis of passive metamaterial panels using the finite element method and homogenized properties.
- [3] A. de Miguel. Micromechanics code: beam modeling of periodically heterogenous composites.
- [4] F.Rothlauf. *Design of Modern Heuristic*.
- [5] C. Houriet. Homogenation of mechanical properties of metamaterials for aircraft acoustic.
- [6] C. v. d. K. e. P. G. Jacques Cuenca. A general methodology for inverse estimation of the elastic and anelastic properties of anisotropic open-cell porous materials with to melamine foam.
- [7] W. W. Jun Mei, Zhiyu Yang and P. Sheng. Dark acoustic metamaterials as super absorbers for low-frequency sound.
- [8] M. O. Lirong Lu, Takashi Yamamoto and T. Yamada. Topology optimization of an acoustic metamaterial with negative bulk modulus using local resonance.
- [9] M. D. Luc Jaouen, Amèlie Renault. Elastic and damping characterizations of acoustical porous materials. available experimental methods and applications to a melamine foam.
- [10] A.-C. H.-H. e. J.-N. D. Philippe Langlet. Analysis of the propagation of plane acoustic waves in passive periodic materials using the finite element method.
- [11] N. Solutions. *Optimus Rev 10.20 - Users Manual*.
- [12] N. Solutions. *Optimus Theoretical Background*.