

OTTIMIZZAZIONE GEOMETRICA DI UN METAMATERIALE PER ASSORBIMENTO A BANDA LARGA

Cristina Marescotti (1), Francesco Pompili (2)

1) Università degli Studi di Ferrara, Dipartimento di Ingegneria, Ferrara, mrcst@unife.it
2) Università degli Studi di Ferrara, Dipartimento di Ingegneria, Ferrara, pmpfnc@unife.it

SOMMARIO

Diversi strumenti di analisi sono stati utilizzati nell'ottimizzazione geometrica di un risonatore multiplo coiled-up, con l'obiettivo di massimizzare l'assorbimento acustico a banda larga, partendo da una frequenza di 100 Hz. Utilizzando sia un modello analitico [1], che un modello FEM 3D, è possibile prevedere il comportamento acustico del sistema indagato, poi confermato tramite misure sperimentali eseguite nel tubo ad onde stazionarie, sia con risonatori singoli che in parallelo.

1. Introduzione

Al giorno d'oggi, l'assorbimento acustico a bassa frequenza, è un argomento che suscita molto interesse, poiché risulta di difficile raggiungimento utilizzando i comuni meccanismi di assorbimento [2]. Si ha infatti che i materiali fonoassorbenti necessitano di elevati spessori per essere acusticamente efficienti a bassa frequenza, mentre i risonatori forniscono un assorbimento elevato ma troppo selettivo.

Si inserisce in questo contesto lo studio del presente metamateriale: tramite l'accoppiamento in parallelo di un certo numero di risonatori a quarto d'onda coiled-up, si vuole ottenere un sistema che permetta di ottenere un buon assorbimento a bassa frequenza ma con spessori ridotti, poiché con tali risonatori è possibile ridurre lo spessore grazie alla possibilità di "arrotolare" i canali in cui si sviluppa il campo sonoro [3]. Essendo comunque elementi risonanti, essi sono caratterizzati da un assorbimento acustico molto selettivo, piccato alla propria frequenza di risonanza: proprio il loro accoppiamento in parallelo, permette di ottenere un efficiente sistema a banda larga.

Partendo da queste premesse, il seguente studio propone una metodica di ottimizzazione per i metamateriali costituiti da multi risonatori a quarto d'onda coiled-up. La prima fase del processo prevede l'utilizzo di un modello analitico che permette di ottimizzare la geometria del sistema massimizzando l'assorbimento acustico: viene massimizzata l'ampiezza di assorbimento, tramite lo studio della porosità del sistema (rapporto tra aree dei fori dei 16 canali in parallelo e area frontale del metamateriale totale); vengono ottimizzate le lunghezze dei 16 canali, che corrisponde ad ottimizzare le frequenze di picco di risonanza, in modo tale da ottenere un buon assorbimento a banda larga, partendo da una frequenza minima di 100 Hz.

La seconda fase prevede la creazione della geometria 3D, tramite software CAD, con simulazione FEM del sistema ottimizzato per andare a considerare alcuni effetti che vengono trascurati dal modello analitico, il quale considera la geometria rettilinea dei condotti e non quella reale arrotolata. Sia il modello analitico che il modello numerico sono stati validati tramite una serie di misure sperimentali che sono state svolte nel tubo ad onde stazionarie, di prototipi ottenuti tramite la stampa 3D, in modo tale da valutare eventuali criticità nella stampa ed accoppiamento dei singoli moduli e del sistema totale.

2. Ottimizzazione analitica

Per calcolare il coefficiente di assorbimento acustico per incidenza normale del metamateriale coiled-up viene utilizzato un modello analitico [1], che determina le perdite nel condotto come segue: nella zona d'imbocca utilizza il modello JCA per quantificare le perdite dissipative dovute alla variazione di impedenza del restringimento di sezione; lungo il canale utilizza il modello Narrow Region, per quantificare le perdite termo-viscose che si instaurano alle pareti del canale per attrito. Determinate le impedenze dei singoli canali, si ottiene l'impedenza superficiale acustica totale del sistema a 16 risonatori posti in parallelo in analogia alla teoria dei circuiti elettrici.

La procedura di ottimizzazione geometrica (figura 1) riguarda un metamateriale costituito da 16 risonatori in parallelo: il condotto più lungo ha una frequenza di risonanza pari a 100 Hz, mentre il condotto più corto ha una frequenza di 300 Hz, disposti su quattro righe e quattro colonne di un provino con superficie frontale di 20x20 cm (l_{tot}).

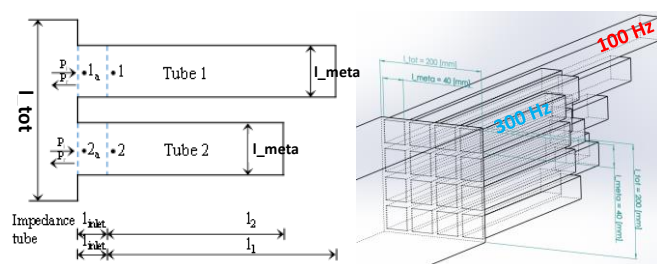


Figura 1 – Metamateriale a 16 risonatori a quarto d'onda coiled-up in parallelo.

La prima fase prevede di ottimizzare la sezione di ogni condotto (l_{meta}) con l'obiettivo di massimizzare l'ampiezza del picco di assorbimento: si ha infatti che al variare della porosità del sistema ($\phi = l_{meta}^2 / l_{tot}^2$), varia il picco di assorbimento del singolo condotto: l'ottimizzazione ha mostrato un massimo per tutti i condotti ponendo un $l_{meta} = 40.0$ mm (figura 2).

La seconda fase prevede invece di ottimizzare le lunghezze di ogni singolo condotto per ottenere un elevato assorbimento a banda larga. Fissata la frequenza minima di assorbimento (100 Hz) e la relativa prima armonica (300 Hz), bisogna suddividere questo range di frequenze in modo tale che gli involucri dei 16 risonatori portino ad avere un andamento di assorbimento privo

di “buchi”. Ciò avviene agendo sulle lunghezze dei condotti, ricordando che determinano la frequenza di picco tramite la relazione (1):

$$(1) \quad f_{res} \cong \frac{c_0(2n-1)}{4l} \quad [\text{Hz}]$$

dove c_0 è la velocità del suono del fluido all'interno del canale e $n=1,2,3,\dots$ indica il numero di armoniche e l la lunghezza del singolo canale.

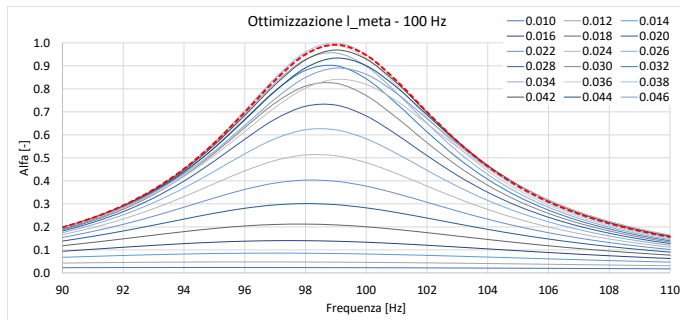


Figura 2 – Ottimizzazione l_{meta} del condotto con picco a 10 Hz.

3. Confronto modello FEM e misure sperimentali

Il modello analitico, se pur efficiente sia in termine di ottimizzazioni possibili che di tempistiche per singola simulazione, presenta dei limiti, tra cui l'impossibilità di considerare geometrie 3D più complesse, come ad esempio un coiled-up arrotolato o le possibili interazioni tra i vari canali. Per ovviare a questo problema, determinata la geometria di ottimizzazione sia in termini di sezioni di imbocco che di lunghezza dei condotti dei 16 risonatori, è stata ricostruita al CAD e simulata agli elementi finiti implementando il setup sperimentale della UNI EN ISO 10534-2 [4], tecnica per la misura dell'assorbimento acustico per incidenza normale con 2 microfoni, tramite il metodo della matrice di trasferimento (figura 4). Le due curve mostrano un buon accordo, con alcune differenze in termini di ampiezza e di shift in frequenza: ciò è imputabile alla costruzione della geometria 3D, in cui i condotti nonostante abbiano un percorso medio pari alla lunghezza definita dal modello analitico, potrebbero presentare dei scostamenti a livello geometrico. Ai 2000 Hz si ha infine un crollo dell'assorbimento FEM poiché interviene la frequenza di taglio del tubo simulato.

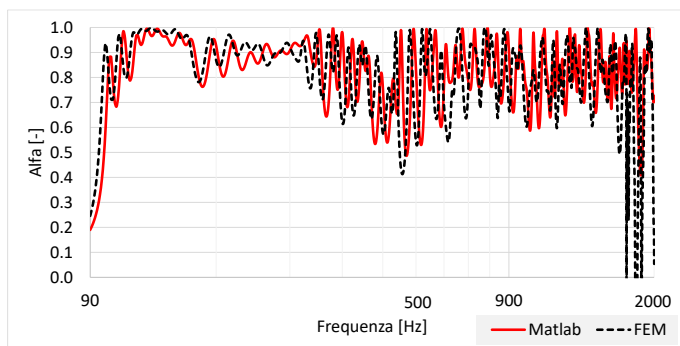


Figura 3 – Confronto tra modello analitico e modello FEM.

Ottenuta dal modello analitico la geometria ottimizzata, confermata anche dalla simulazione FEM 3D, il prossimo step consisterà nella validazione sperimentalmente del metamateriale a 16 risonatori in parallelo. Per eseguire tale misura sperimentale, sempre tramite la norma internazionale [4], è stato costruito un tubo a sezione quadrata, come mostrato in figura 4a. Il tubo, di materiale acrilico trasparente, presenta una sezione interna di

20x20 cm, analoga alla sezione frontale del metamateriale, con uno spessore di 1 cm.

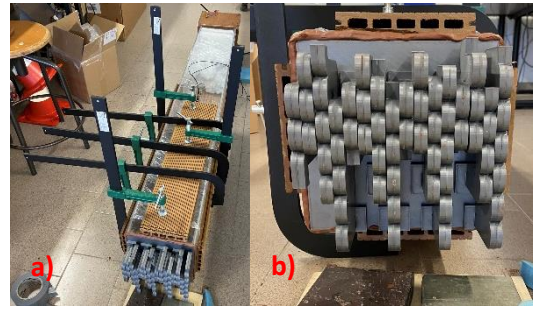


Figura 4 – Setup di misura UNI EN ISO 10534-2 per il metamateriale.

Il metamateriale (figura 5) è stato progettato stampando ogni singolo risonatore in materiale PLA: essi vengono alloggiati all'interno di una maschera (figura 5b), che li dispone in parallelo rispettando le porosità di ottimizzazione. Il posizionamento dei risonatori è stato inoltre pensato per ridurre al minimo l'ingombro totale del sistema, sia in termini di spessore che di sezione (i risonatori sono contenuti entro la sezione frontale 20x20 cm di figura 4b).

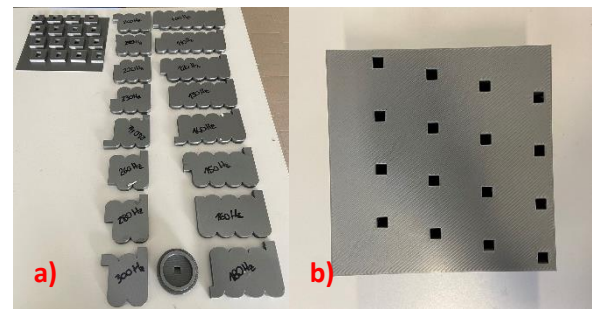


Figura 5 – Risonatori singoli (a) e maschera di alloggiamento (vista frontale b).

4. Conclusioni

Il presente studio propone una procedura di ottimizzazione completa di un metamateriale costituito da 16 multi risonatori a quarto d'onda coiled-up, accoppiati in parallelo. Con lo scopo di ottenere un sistema ad elevato assorbimento a banda larga, partendo da una frequenza di 100 Hz, il modello analitico permette di ottimizzare la geometria sia agendo sull'ampiezza di assorbimento (sezione d'imbocco) sia sulla distribuzione dei picchi nel range di frequenza indagato (lunghezza condotto). Tale modello è supportato inoltre dalla simulazione 3D FEM, che riproduce il setup di misura sperimentale, considerando alcuni fattori difficilmente implementabili nel modello analitico.

Essendo la geometria di ottimizzazione in fase di stampaggio, la validazione sperimentale verrà eseguita a breve, utilizzando il setup di misura descritto precedentemente e mostrato in figura 4.

5. Bibliografia

- [1] Magnani A., Marescotti C., Pompili F., *Acoustic absorption modeling of single and multiple coiled-up resonators*, Applied Acoustics 186 (2022)
- [2] Allard J. F., Atalla N., *Propagation of Sound in Porous Media: Modelling Sound Absorbing Materials*, John Wiley & Sons Ltd., United Kingdom (2009)
- [3] Liang Z., Li J., *Extreme Acoustic Metamaterial by Coiling Up Space*, Physical Review Letters, 108, 114301 (2012)
- [4] UNI EN ISO 10534-2:2001, *Acustica - Determinazione del coefficiente di assorbimento acustico e dell'impedenza acustica in tubi di impedenza - Metodo della funzione di trasferimento*.