

Barriera acustica a Cristalli Sonici a doppio regime basata su dispersori asimmetrici multirisonanti¹

David Ramírez-Solana^{a,b,*} | Agostino Marcello Mangini^a | Javier Redondo^b | Maria Pia Fanti^a

^a Dipartimento di Ingegneria Elettrica e dell'Informazione, Politecnico di Bari, Via Orabona, 4, 70125 Bari

^b Instituto de Investigación para la Gestión Integrada de Zonas Costeras, Universitat Politècnica de València, C. Paranimf, 1, 46730 Gandía

* Autore di riferimento:
d.ramirezsolana@gmail.com

Ricevuto: 8/3/2026

Accettato: 22/4/2026

DOI: 10.3280/ria2026oa22146

ISSN: 2385-2615

Le barriere antirumore a Cristalli Sonici (SCNB) basate su Cristalli Sonici (SC) con risonatori di Helmholtz (HR) permettono di ottenere bande di isolamento aggiuntive rispetto ai soli bandgap di Bragg (Bragg-BG). Tuttavia, l'introduzione di HR non garantisce sempre un incremento dell'attenuazione. L'interazione tra Bragg-BG e bandgap da risonanza locale (HR-BG) dipende in modo critico dal rapporto tra la frequenza di risonanza locale e la frequenza di Bragg (f_{HR} rispetto a f_{Bragg}) e dall'allineamento dei colli dei risonatori rispetto all'onda incidente (0° e 90°). In questo lavoro si propone una SCNB a doppio regime basata su dispersori asimmetrici multirisonanti, che integrano due HR ortogonali con cavità accoppiate. La risposta è studiata mediante modelli FEM 2D sia in configurazione periodica (diagramma di banda) sia in configurazione finita (trasmissione), con particolare attenzione all'Insertion Loss (IL) nell'intervallo 500-2500 Hz. Poiché la sintonizzazione analitica è limitata dalla geometria irregolare delle cavità, l'ottimizzazione multiobiettivo regola i parametri geometrici per collocare e rendere complementari le bande di attenuazione nelle due orientazioni. La validazione sperimentale su prototipo stampato in 3D, mediante misure in camera anecoica con scansione robotizzata del campo acustico, conferma l'aumento di IL e il comportamento a doppio regime ottenuto mediante rotazione dei dispersori.

Parole chiave: metamateriali acustici, risonatori di Helmholtz, ottimizzazione multiobiettivo, stampa 3D

Dual-Regime Sonic Crystal acoustic barrier based on multiresonant asymmetric scatterers

Sonic Crystal Noise Barriers (SCNB) based on Sonic Crystals (SC) with Helmholtz Resonators (HR) can provide additional insulation bands beyond the Bragg bandgap (Bragg-BG). Yet adding HR does not always increase attenuation. The interaction between Bragg-BG and the local-resonance bandgap (HR-BG) is strongly governed by the relative position of the local resonance with respect to Bragg, (f_{HR} versus f_{Bragg}), and by the alignment of the resonator necks with the incident wave (0° and 90°). This work investigates a dual-regime SCNB built from multiresonant asymmetric scatterers. Each scatterer integrates two orthogonal HR with coupled cavities. The acoustic response is obtained using 2D FEM models. Both periodic analyses (band structure) and finite arrangements (transmission) are considered. The focus is the Insertion Loss (IL) in the 500-2500 Hz range. Analytical tuning is hindered by the irregular cavity geometry. Therefore, a multiobjective optimisation is employed to adjust geometric parameters. The aim is to place the relevant attenuation ranges and make them complementary for the two orthogonal orientations. Experimental validation is performed on a 3D-printed prototype. Measurements are carried out in an anechoic chamber using a robotic acoustic-field scan behind the barrier. The results confirm an increased IL and a dual-regime behaviour achieved through a 90° rotation of the scatterers.

Keywords: acoustic metamaterials, Helmholtz resonators, multiobjective optimization, 3D printing.

1 | Introduzione

I metamateriali acustici sono strutture ingegnerizzate che permettono di manipolare la propagazione delle onde sonore me-

diate un controllo geometrico della risposta efficace del mezzo [1,2]. Una classe particolarmente rilevante è costituita dai cristalli sonici (SCs), cioè array periodici di dispersori immersi in un mezzo ospite, tipicamente l'aria [3,4]. In tali sistemi, la periodicità spaziale produce intervalli di frequenza nei quali la propagazione delle onde è inibita. Questi intervalli sono comunemente indicati come bandgap (BG) e sono associati, in

¹ Vincitore *ex aequo* del premio "Gino G. Sacerdote" edizione 2026.

prima approssimazione, a fenomeni di dispersione multipla e interferenza distruttiva di tipo Bragg [5].

Per una rete quadrata con incidenza normale, la frequenza centrale del primo BG di Bragg (Bragg-BG) è legata al parametro reticolare (a) e alla velocità del suono (c): $f_{\text{Bragg}} = c/2a$ [6]. Questo meccanismo, pur essendo robusto, impone un vincolo diretto tra frequenza di lavoro e dimensioni geometriche della struttura. Di conseguenza, per operare a bassa frequenza, i SCs classici richiedono dimensioni relativamente grandi. Per superare tale limite, una strategia consolidata consiste nell'integrare risonatori locali, in particolare risonatori di Helmholtz (HR) [7], all'interno dei dispersori. In questo modo è possibile introdurre BG aggiuntivi (HR-BG) a frequenze inferiori alla frequenza di Bragg, cioè in Regime di sub-lunghezza d'onda. I HR-BGs possono anche essere utilizzati per complementare l'intervallo di frequenza di isolamento mediante HRs sintonizzati al di sopra del limite del primo Bragg-BG.

L'accoppiamento tra Bragg-BG e HR-BG rappresenta un meccanismo fisico di grande interesse, poiché consente una progettazione più flessibile della risposta in trasmissione [8-11]. In particolare, la posizione delle risonanze locali dipende dalla geometria del collo e della cavità dei risonatori di Helmholtz, mentre il Bragg-BG dipende principalmente dalla periodicità della cella unitaria. Questo permette di intervenire su diversi parametri geometrici per controllare la risposta del sistema in intervalli di frequenza distinti.

Tuttavia, è opportuno precisare che l'aggiunta di nuovi HR-BG non comporta sempre un effetto positivo sull'attenuazione prodotta dalla struttura SC risonante. Nel loro impiego come barriere acustiche, le barriere acustiche di cristalli sonici (SCNB [12-15]) con HR mirano non solo ad aumentare l'intervallo di frequenza in cui si ottiene isolamento acustico, ma anche a non ridurre né in ampiezza di banda né in livello (dB) l'isolamento che uno SC privo di risonatori è in grado di garantire. Per questo motivo è essenziale comprendere l'interazione tra la frequenza di risonanza degli HR (f_{HR}) e la frequenza caratteristica di Bragg (f_{Bragg}), nonché il modo in cui tale relazione influenza il Bragg-BG e l'HR-BG. Studi precedenti hanno evidenziato che l'orientazione della bocca del risonatore rispetto all'onda incidente, tipicamente a 0° o 90° , è un aspetto determinante per ottenere un incremento dell'isolamento acustico indotto dal Bragg-BG, sia in termini di estensione in frequenza sia di livello in dB [9,16,17]. Di conseguenza, queste considerazioni costituiscono la premessa del progetto iniziale e definiscono i vincoli adottati nella procedura di ottimizzazione.

Nonostante l'ampia letteratura sui metamateriali acustici e sui SCs risonanti, molte configurazioni proposte hanno una risposta statica oppure richiedono meccanismi di tuning complessi [18-21]. In numerosi casi, i dispositivi sono progettati per una funzione specifica in una banda fissa, con limitata riconfigurabilità o un meccanismo troppo complesso.

In questo contesto, una configurazione con dispersori asimmetrici multirisonanti consente di ottenere un comportamento di commutazione passiva dipendente dall'orientazione. Ciascun dispersore integra due risonatori di Helmholtz con cavità differenti e aperture orientate ortogonalmente. La ro-

tazione di 90° dell'intero SC modifica l'allineamento tra l'onda incidente e i risonatori, alterando l'interazione tra risonanze locali e Bragg-BG. In questo modo la struttura può presentare bande di trasmissione complementari nelle due configurazioni ortogonali, con una funzione equivalente a una barriera acustica sintonizzabile [20,22].

Un elemento importante di questa configurazione è la semplicità costruttiva. I dispersori possono essere realizzati come cilindri cavi con una parete interna inclinata che divide il volume in due cavità, senza richiedere geometrie complesse o componenti attivi. Questa caratteristica rende il dispositivo particolarmente adatto alla fabbricazione additiva mediante stampa 3D. L'uso della stampa 3D permette inoltre di realizzare rapidamente prototipi, controllare in modo accurato la geometria e validare sperimentalmente il comportamento della struttura. Questa semplicità facilita il processo di produzione di questi metamateriali nella loro applicazione come barriere per il traffico.

Per migliorare quantitativamente la prestazione di commutazione, la sola scelta geometrica iniziale non è sufficiente. È necessario un processo sistematico di ottimizzazione che tenga conto del fatto che il dispositivo deve soddisfare due requisiti simultanei: elevata attenuazione sia in una orientazione sia nella configurazione ortogonale, in intervalli di frequenza complementari. Questo porta naturalmente a una formulazione multiobiettivo (MO) del problema.

Lo scopo di questo lavoro è presentare in modo integrato la progettazione, l'ottimizzazione e la validazione sperimentale di una barriera acustica sintonizzabile basato su dispersori asimmetrici multirisonanti. L'analisi include lo studio del diagramma di banda, la simulazione della trasmissione per una struttura finita, la fabbricazione del prototipo mediante stampa 3D e la caratterizzazione sperimentale in camera anecoica tramite scansione robotizzata del campo acustico. Particolare attenzione è dedicata al confronto tra risultati numerici e sperimentali per il parametro di isolamento acustico delle barriere, l'*insertion loss*, nonché alla distribuzione spaziale della risposta acustica in una regione di misura estesa dietro il SC.

2 | Materiali e metodi

Lo sviluppo e la validazione di soluzioni innovative per la riduzione del rumore richiedono spesso molto tempo, risorse di laboratorio specifiche e costi elevati. Lo spazio di modifica è ridotto finché non viene fabbricato un nuovo prototipo. Per superare questi limiti, la comunità scientifica ha sviluppato e validato diversi algoritmi numerici per valutare la prestazione acustica di nuovi dispositivi. È cruciale prevedere accuratamente le proprietà acustiche prima della fabbricazione. Queste tecniche hanno contribuito al progresso della tecnologia acustica e, in particolare, allo sviluppo di nuovi materiali periodici come gli SCs. Le tecniche di simulazione numerica, combinate con strategie di ottimizzazione, sono strumenti efficienti di progettazione che permettono di sviluppare dispositivi con prestazioni migliori e nuove funzionalità [23,24].

La periodicità e le simmetrie degli SCs consentono di semplificare il calcolo del modello e ottenere un'approssimazione accurata di domini estesi. Per esempio, la valutazione dell'isolamento in tratti lunghi come autostrade o ferrovie. Negli ultimi anni sono stati usati vari metodi di simulazione per valutare l'efficacia di strutture periodiche in acustica. Nel presente lavoro si usano tecniche a discretizzazione del dominio per le simulazioni numeriche.

2.1 | Modello numerico

Si considera uno SC bidimensionale. È costituito da un insieme di HRs distribuiti in una rete periodica quadrata infinita di Bravais [25]. La Fig. 1a mostra la cella unitaria del sistema periodico bidimensionale. La cella è definita da un dispersore con raggio esterno R e due HRs interni. Le condizioni periodiche al contorno sono impostate sui bordi X e Y . In questo modo lo SC infinito è definito da una struttura periodica con rete quadrata e parametro reticolare costante (a). La cella unitaria definisce anche la zona di Brillouin irriducibile nello spazio reciproco [26].

Il parametro reticolare è fissato a $a = 0.12$ m. Questa scelta porta la frequenza caratteristica di Bragg a $f_{\text{Bragg}} = 1400$ Hz, nella regione di interesse per il controllo del rumore in bassa e media frequenza. La risposta del sistema è analizzata nell'intervallo 500-2500 Hz, che include sia le risonanze locali dei HR sia il primo Bragg-BG di Bragg e le sue interazioni con i modi locali.

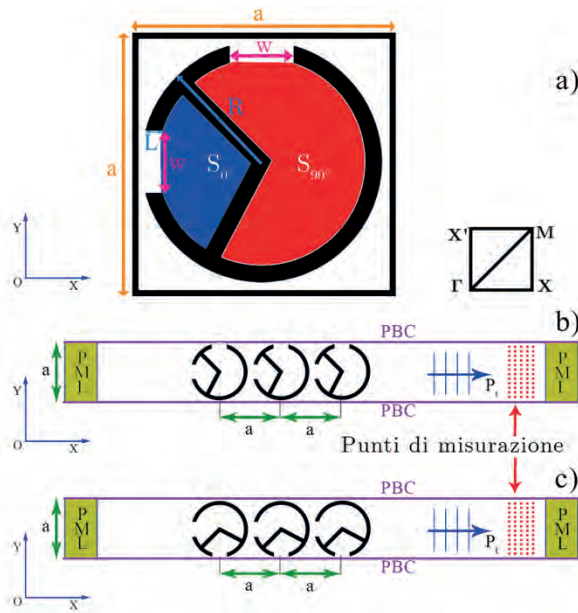


Fig. 1 – a) Cella unitaria del dispersore bidimensionale con HR, che forma il sistema periodico che definisce lo SC e la zona di Brillouin irriducibile della rete quadrata basata sulla teoria di Bloch Floquet per il calcolo della struttura a bande. Modelli numerici della SCNB con tre file di dispersori per la valutazione della IL con, b) allineamento 0° e c) allineamento 90° degli HRs

(a) Unit cell of the two-dimensional scatterer with Helmholtz resonators, forming the periodic system that defines the sonic crystal and the irreducible Brillouin zone of the square lattice based on Bloch Floquet theory for band-structure calculations. Numerical models of the SCNB with three rows of scatterers for the evaluation of insertion loss with (b) 0° alignment and (c) 90° alignment of the HRs

Le due configurazioni operative del dispositivo sono definite dalla rotazione di 90° dei dispersori. Nella configurazione 0°, il risonatore con cavità più piccola (S_{0°) è orientato verso la direzione dell'onda incidente. Nella configurazione 90°, verso l'onda incidente è orientato il risonatore con cavità più grande (S_{90°). Questa differenza geometrica modifica l'accoppiamento tra i modi locali e il campo incidente e produce risposte in trasmissione differenti nelle due configurazioni ortogonali.

I HRs sono caratterizzati dalla lunghezza del collo L , dalla larghezza della bocca w e dall'area della superficie interna S , (S_{0° o S_{90°). La prima frequenza di risonanza del HR è:

$$f_{HR} = \frac{c}{2\pi} \sqrt{\frac{w}{((L+\Delta\frac{w}{2})S')}} \quad (1)$$

dove Δ è il fattore di correzione per la lunghezza del collo. Tiene conto degli effetti della giunzione collo-cavità dovuti a un cambiamento improvviso nelle sezioni circolari. È tipicamente compreso tra 1.6 e 1.8 [27].

Tuttavia, a causa della forma irregolare del nostro progetto, le superfici S_{0° e S_{90° e il loro accoppiamento con i colli richiedono un fattore di correzione molto maggiore e di valore sconosciuto, che rende difficile la sintonizzazione analitica degli HRs. Per questo motivo si utilizzano direttamente modelli FEM 2D per ottenere la loro risposta in frequenza.

L'analisi numerica è stata svolta considerando sia il problema periodico della cella unitaria, utile per il calcolo del diagramma di banda, sia un modello di trasmissione con struttura finita, utile per confronti numerici e sperimentali.

Per il calcolo della struttura a bande si utilizza la cella unitaria con condizioni periodiche di Floquet lungo le direzioni della cella unitaria [28]. In questa configurazione, i BG completi sono identificati considerando tutte le direzioni di propagazione nella prima zona di Brillouin, mentre i BG direzionali sono analizzati separatamente per le due orientazioni associate alle configurazioni 0° e 90°.

Per la simulazione della trasmissione si considera una struttura a tre file di dispersori lungo la direzione di propagazione X , con periodicità lungo Y . L'onda incidente è modellata come onda piana armonica. Alle estremità del dominio lungo X sono introdotti strati perfettamente adattati (PML), in modo da assorbire le onde uscenti ed eliminare riflessioni numeriche spurie.

Nei due modelli di trasmissione, l'area di riempimento della cella unitaria è $ff = \pi(R/a)^2 = 0.4$. Il modello geometrico delle SCNBs e la cella unitaria hanno la stessa topologia. Una struttura bidimensionale quadrata e periodica.

Un'onda piana incidente di frequenza f e pressione acustica p_i si propaga lungo X da sinistra a destra. È allineata con la bocca dell'HR con cavità più piccola (S_{0°) in Fig. 1b. È perpendicolare alla bocca in Fig. 1c. Questi casi sono indicati come allineamenti 0° e 90°.

La trasmissione del sistema è analizzata nei punti di misurazione lungo l'asse X ad una distanza di 1 m dallo SC. Si valuta il coefficiente di trasmissione τ definito da:

$$\tau = \frac{(p_{i-con})^2}{(p_{i-senza})^2} \quad (2)$$

dove $\langle \cdot \rangle$ indica la media sia della pressione incidente al quadrato sia della pressione trasmessa al quadrato nei punti di valutazione. La terminologia p_{t-con} si riferisce alla pressione misurata quando lo SC è inserito nel modello, mentre $p_{t-senza}$ si riferisce alla misura effettuata in assenza dello SC. Da τ si ricava l'equazione dell'*Insertion Loss* (IL) in decibel:

$$IL = -10 \log_{10}(\tau) \text{ [dB]} \quad (3)$$

che indica come il livello di pressione sonora nei punti di valutazione cambia quando la SCNB è posizionata sul percorso acustico dell'onda incidente.

L'effetto dell'interferenza dovuta alla dispersione multipla riduce significativamente la trasmissione di una SCNB nei BGs e aumenta l'isolamento. In generale, questo fenomeno si applica non solo al Bragg-BG, ma anche all'HR-BG. Nel modello proposto, i dispersori hanno due risonatori locali di tipo HR. In funzione delle frequenze centrali e della larghezza dei BGs, Bragg-BG e HR-BG possono sovrapporsi. Questo porta a un diverso tipo di interazione tra i fenomeni.

2.2 | Ottimizzazione per regolare gli intervalli di frequenza

In questa sezione si introduce una procedura di ottimizzazione multiobiettivo (MO) per regolare gli intervalli di frequenza in cui la barriera presenta attenuazione. La procedura bilancia obiettivi in parte in conflitto. Un approccio multiobiettivo è particolarmente appropriato perché la prestazione del dispositivo non può essere descritta in modo completo da una sola metrica. Una metrica basata solo sul contrasto tra le trasmissioni può saturare in alcuni casi e perdere sensibilità rispetto al valore assoluto della trasmissione. Per questo motivo è utile introdurre una seconda metrica che misuri direttamente la differenza assoluta tra le due risposte in trasmissione. L'ottimizzazione simultanea di queste due quantità consente di selezionare geometrie con un comportamento di commutazione più robusto e fisicamente significativo.

Il risultato sperato è mantenere un livello di isolamento acustico elevato nelle bande desiderate. Il risultato è un insieme di soluzioni di compromesso, ovvero un fronte di Pareto (PF). Ogni soluzione corrisponde a una geometria specifica dei dispersori risonanti. Un miglioramento di una prestazione può degradarne un'altra. Per questo non esiste una singola soluzione ottima. Si ottiene un insieme di soluzioni non dominate.

Formalmente, il problema è definito come: $\min J(x) = [J_1(x), J_2(x), \dots, J_M(x)]$, soggetto a $x \in Sp$, dove $\{x\}$ è il vettore delle variabili decisionali che definiscono la geometria dello SC. $J_i(x)$ sono le funzioni obiettivo. Sp è lo spazio ammissibile vincolato da limiti fisici e di fabbricabilità.

In questo studio, $x = [x_1, x_2, x_3]$ contiene tre parametri geometrici: le larghezze dei colli degli HRs ad alta e bassa frequenza (x_1, x_2), e l'angolo della parete interna di separazione (x_3) che divide le due cavità nel dispersore. Questi parametri determinano le frequenze di risonanza locali dei due HRs e in-

fluenzano direttamente la posizione e l'interazione tra Bragg-BG e LR-BG.

Un concetto chiave è la dominanza di Pareto. Un progetto x_1 domina x_2 se non è peggiore in tutti gli obiettivi e migliore in almeno uno. L'insieme delle soluzioni non dominate è il set di Pareto P . Il set dei valori obiettivo associati è il fronte di Pareto (PF).

Fisicamente, l'ottimizzazione esplora come piccole modifiche nelle geometrie dei colli e nell'angolo della parete interna modificano le frequenze locali e l'accoppiamento con Bragg-BG. L'algoritmo cerca configurazioni in cui gli intervalli di forte attenuazione in una orientazione completano quelli di alta attenuazione nell'orientazione perpendicolare. Lo scopo è massimizzare il contrasto di commutazione per poter distribuire l'energia acustica dell'isolamento negli intervalli di frequenza sotto studio.

Il metodo selezionato è basato su un algoritmo genetico multiobiettivo ϵ -variabile (ϵ v-MOGA). È un approccio evolutivo elitista. Introduce il concetto di ϵ -dominanza per migliorare convergenza e diversità sul fronte di Pareto mantenendo un basso costo computazionale. Lo spazio degli obiettivi è discretizzato in una griglia di box. È conservata una sola soluzione non dominata per box. Se due soluzioni cadono nello stesso box, si mantiene quella più vicina al centro. Questo evita individui ridondanti e garantisce una distribuzione uniforme della soluzione ϵ -Pareto senza clustering addizionale.

L'ottimizzazione della geometria è formulata come problema multiobiettivo. L'obiettivo generale è massimizzare la prestazione di commutazione del dispositivo nell'intervallo 500-2500 Hz, ottenendo valori di isolamento elevati sia in una orientazione che nell'altra, con comportamento complementare nei due intervalli di frequenza.

2.3 | Geometria dei dispersori multirisonanti

Ogni dispersore è costituito da un cilindro con due aperture ortogonali e una parete interna inclinata che divide la cavità in due volumi distinti. In questo modo si ottengono due risonatori di Helmholtz integrati nello stesso dispersore, con frequenze di risonanza differenti. La multirisonanza è quindi ottenuta in una geometria compatta e meccanicamente semplice.

La risposta del dispersore dipende principalmente da tre parametri geometrici: la larghezza del collo del risonatore ad alta frequenza, la larghezza del collo del risonatore a bassa frequenza e l'angolo della parete interna di separazione. Questi parametri determinano il volume efficace delle cavità, la massa acustica dei colli e, di conseguenza, le frequenze di risonanza locali.

La scelta della geometria di partenza è basata sulla condizione fisica secondo cui il risonatore con frequenza di risonanza locale superiore alla frequenza di Bragg deve essere associato alla configurazione 0°, mentre il risonatore con frequenza di risonanza locale inferiore alla frequenza di Bragg deve essere associato alla configurazione 90°. Questa scelta favorisce una distribuzione complementare dei BG e delle bande passanti nelle due orientazioni.

2.4 | Ottimizzazione

Per quantificare la prestazione di commutazione si impiegano due metriche. La prima è il *Contrast Ratio CR*, che misura il contrasto tra i coefficienti di trasmissione (τ) delle due configurazioni ortogonali. La seconda è la differenza assoluta $|\text{Diff}|$ tra i coefficienti di trasmissione, introdotta per mantenere sensibilità anche nei casi in cui il CR tende a saturare. Per una spiegazione più dettagliata del processo di ottimizzazione e della selezione di queste funzioni obiettivo, il lettore può fare riferimento a Ramirez-Solana et al. [29].

Poiché l'algoritmo genetico opera come minimizzatore, le metriche sono riformulate come funzioni costo:

- $J_1 = 1 - \text{CR}$;
- $J_2 = 1 - |\text{Diff}|$.

Le funzioni costo sono valutate sull'intero intervallo di frequenza di interesse e rappresentate mediante valori medi, così da associare a ogni individuo un unico punto nello spazio degli obiettivi.

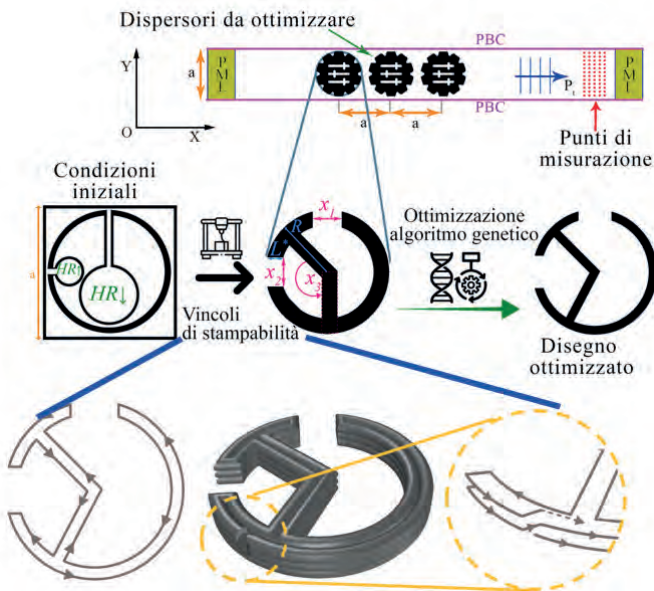


Fig. 2 – La parte superiore mostra il modello FEM 2D dello SC con 3 file di dispersori da ottimizzare mediante l'algoritmo ev-MOGA. Nella parte inferiore, è mostrato un diagramma di flusso che illustra i principali passaggi del processo di ottimizzazione dello SC multirisonanti. Il diagramma riporta lo schema del progetto iniziale degli individui, i parametri di ottimizzazione e il progetto finale ottimizzato. Nella parte inferiore anche si mostra il percorso continuo dell'estrusore (sinistra), immagine digitale di più strati sovrapposti (centro) e zoom sul percorso utensile durante la transizione tra strati, con flusso continuo, da uno strato all'altro (destra)

The upper part shows the 2D FEM model of the sonic crystal with three rows of scatterers optimised using the ev-MOGA algorithm. The lower part presents a flowchart illustrating the main stages of the optimisation process for the multiresonant sonic crystal. The diagram includes the initial individual design, the optimisation parameters and the final optimised configuration. The lower section also shows the continuous extrusion path (left), a digital image of several superimposed layers (centre), and a close-up of the toolpath during the transition between layers with continuous extrusion (right)

Il problema è risolto con un algoritmo genetico multi-obiettivo basato su ϵ -dominanza. L'algoritmo conserva una popolazione di individui e genera nuove soluzioni mediante operatori evolutivi, selezionando progressivamente le geometrie non dominate. La discretizzazione dello spazio degli obiettivi in celle ϵ consente di limitare la ridondanza e di mantenere una distribuzione uniforme delle soluzioni sul fronte di Pareto.

Nel processo considerato, l'ottimizzazione è eseguita con una popolazione di 200 individui e 350 generazioni. Il risultato è un fronte di Pareto da cui viene selezionata una geometria finale sulla base del compromesso tra J_1 e J_2 , privilegiando il miglioramento della metrica più restrittiva.

La Tab. 1 riassume le tre variabili decisionali utilizzate nell'ottimizzazione: le larghezze dei colli degli HR di 0° e 90° (x_1 e x_2) e l'angolo interno di separazione (x_3). Ogni parametro è associato alle variabili decisionali ed è normalizzato nell'intervallo $[0, 1]$, al fine di garantire uno spazio di ricerca compatto e una scala coerente tra le variabili di progetto. Le larghezze dei colli sono limitate da vincoli di stampabilità (minimo due passaggi dell'ugello, cioè $x_i \geq 0.006$ m) e da un limite superiore che mantiene una chiara distinzione geometrica tra collo e cavità. L'angolo del separatore è vincolato per evitare sovrapposizioni con ciascuna apertura: il limite inferiore impedisce il contatto con il collo a 0° , mentre il limite superiore evita l'intrusione nell'apertura a 90° . Queste restrizioni garantiscono che tutte le geometrie candidate siano fabbricabili e fisicamente realizzabili durante l'intero processo di ottimizzazione.

Tab. 1 – Variabili di ottimizzazione, normalizzazione, limiti e intervalli fisici utilizzati nell'ottimizzazione multiobiettivo
Optimization variables, normalization, limits and physical intervals used in the multi-objective optimization

Variabile	Simbolo	Intervallo normalizzato (p)	Parametro fisico	Intervallo fisico
Larghezza del collo a 90°	x_1	$p_1 \in [0, 1]$	$x_1 = 0.006 + 0.6 \cdot p_1$	$[0.006, 0.606]$
Larghezza del collo a 0°	x_2	$p_2 \in [0, 1]$	$x_2 = 0.006 + 0.6 \cdot p_2$	$[0.006, 0.606]$
Angolo del separatore interno	x_3	$p_3 \in [0, 1]$	$x_3 = 210 \cdot p_3 - 150 [^\circ]$	$[-150^\circ, 60^\circ]$

2.5 | Fabbricazione del prototipo mediante stampa 3D

Per la validazione sperimentale è stato realizzato un prototipo del SC mediante stampa 3D a deposizione di filamento (FDM). La progettazione CAD della geometria è stata eseguita in ambiente parametrico e il file è stato successivamente convertito in traiettorie di stampa mediante software di slicing compatibile con la stampante utilizzata (3D WASP).

I dispersori sono realizzati in PLA. Lo spessore delle pareti è stato fissato a 6 mm, pari a due passaggi dell'ugello, per garantire continuità di estrusione (VASE mode), rigidità meccanica e qualità geometrica. Questa scelta riduce difetti di stampa quali vuoti interni, discontinuità tra strati e deformazioni locali.

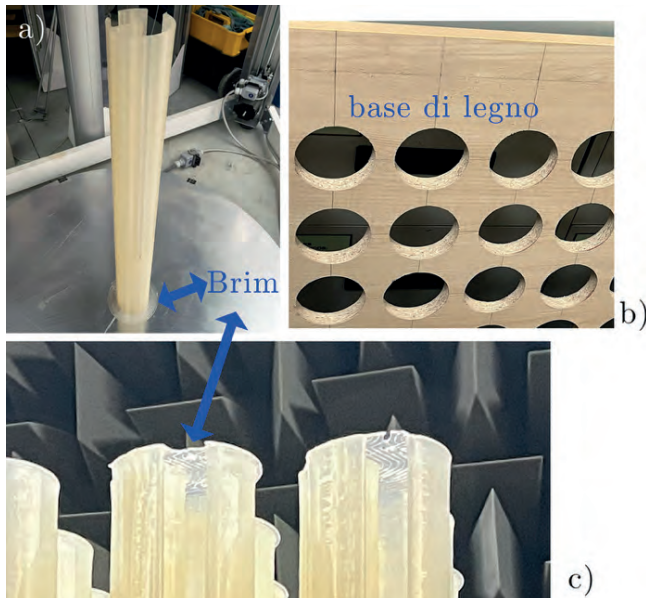


Fig. 3 – (a) Brim con anelli concentrici attorno al cilindro per conferire stabilità al processo di stampa 3D. (b) Base di supporto in legno su cui sono montati i dispersori cilindrici. (c) Brim nella parte superiore dei dispersori, già montati sulla base in legno, senza anelli concentrici attorno al cilindro

(a) Brim with concentric rings around the cylinder to improve the stability of the 3D-printing process. (b) Wooden support base on which the cylindrical scatterers are mounted. (c) Brim located at the upper part of the scatterers, already mounted on the wooden base, without concentric rings around the cylinder

Durante la fabbricazione è stato utilizzato un *brim* per migliorare l'adesione al piano di stampa e aumentare la stabilità dei dispersori durante la crescita in altezza. Tale accorgimento è particolarmente importante per strutture snelle e alte, come i cilindri cavi usati in questo lavoro.

Dal punto di vista acustico, il PLA presenta un'impedenza molto maggiore di quella dell'aria. Per questo motivo il materiale può essere considerato quasi rigido nelle simulazioni e nell'interpretazione dei risultati sperimentali, semplificando il modello fisico del problema.

2.6 | Setup sperimentale e procedura di misura

La validazione sperimentale è stata eseguita in camera anecoica. Il sistema di misura è costituito da una sorgente sonora, dal prototipo del SC e da un sistema robotizzato 3D per la scansione del campo acustico dietro la struttura multirisonante.

La sorgente utilizzata è un monitor attivo da studio, posizionato frontalmente al SC. La sorgente emette rumore bianco nell'intervallo di interesse 500-2500 Hz. Il microfono di misura è collocato su un sistema robotizzato che consente lo spostamento su una griglia di punti predefinita. In ciascun punto viene acquisita la media di tre misure, in modo da migliorare la ripetibilità.

I dispersori sono montati su una base rigida con fori preforati, così da mantenere con precisione il parametro reticolare e l'allineamento della struttura. L'area di misura dietro il SC è definita come una regione rettangolare più ampia della

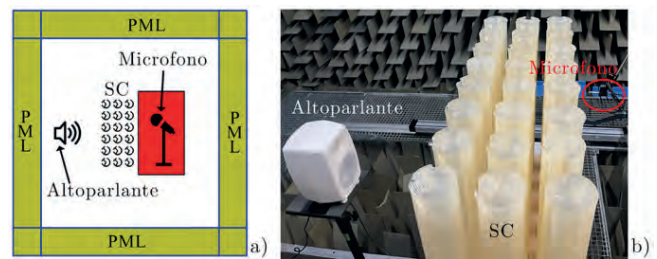


Fig. 4 – (a) Vista schematica del setup sperimentale con la regione di interesse evidenziata in rosso, nella quale vengono eseguite le misure acustiche. (b) Fotografia del setup sperimentale con il sistema robotizzato 3D nella camera anecoica

(a) Schematic view of the experimental setup with the region of interest highlighted in red, where the acoustic measurements are performed. (b) Photograph of the experimental setup with the 3D robotic scanning system inside the anechoic chamber

barriera stessa, in modo da includere gli effetti di diffrazione e bordo. Questa scelta è importante perché, a bassa frequenza, il campo acustico trasmesso non è uniforme e può presentare variazioni spaziali significative.

Il microfono utilizzato è un microfono da campo libero calibrato. Il moto del sistema robotizzato è controllato da un computer esterno alla camera anecoica. La scansione dell'intera griglia produce mappe di pressione acustica, da cui vengono ricavate la trasmittanza, l'insertion loss e le mappe spaziali del contrasto tra le due configurazioni.

3 | Risultati e discussione

3.1 | Disegno ottimizzato analisi numerico

In questo lavoro, l'effetto delle perdite termoviscose nel mezzo può essere trascurato, poiché le dimensioni dei dispersori multirisonanti utilizzate in tutte le simulazioni lo consentono e per la gamma di bassa frequenza in cui vengono studiati (vedi Appendice A in rif. [16]). Inoltre, non si prevede alcuna attenuazione dovuta a perdite viscose o termiche. Alla temperatura di misura di 293 K e alla frequenza operativa minima di 500 Hz, gli strati limite viscoso e termico in aria sono calcolati pari a 116 μm e 97.8 μm , rispettivamente. Considerando la parte più piccola dello SC in cui le perdite viscotermiche potrebbero avere effetto, essa corrisponde alla lunghezza del collo di entrambe le cavità risonanti del dispersore multirisonante, con $L = 0.006$ m. Questi strati limite viscoso e termico rappresentano rispettivamente l'1.56% e l'1.85% della lunghezza del collo, valori significativamente inferiori alla soglia del 5% che è stata recentemente mostrata influenzare le prestazioni acustiche in piccole cavità [30].

3.2 | Diagramma di banda e analisi di dispersione

L'analisi del diagramma di banda della Fig. 5 mostra la presenza di BG completi e BG direzionali. I BG completi corrispondono a intervalli in cui la propagazione è inibita indipendentemente

dalla direzione, mentre i BG direzionali dipendono dalla direzione di propagazione e quindi dall'orientazione dei dispersori.

Il comportamento di commutazione del dispositivo è legato principalmente ai BG direzionali associati alle configurazioni 0° e 90° . Nella configurazione 0° , il sistema presenta una banda passante nella regione a frequenza più bassa e una forte attenuazione nella regione complementare. Nella configurazione 90° , la risposta si inverte, con attenuazione nella banda bassa e trasmissione nella banda alta. Questo produce due bande di trasmissione complementari, contigue nell'intervallo di frequenza considerato.

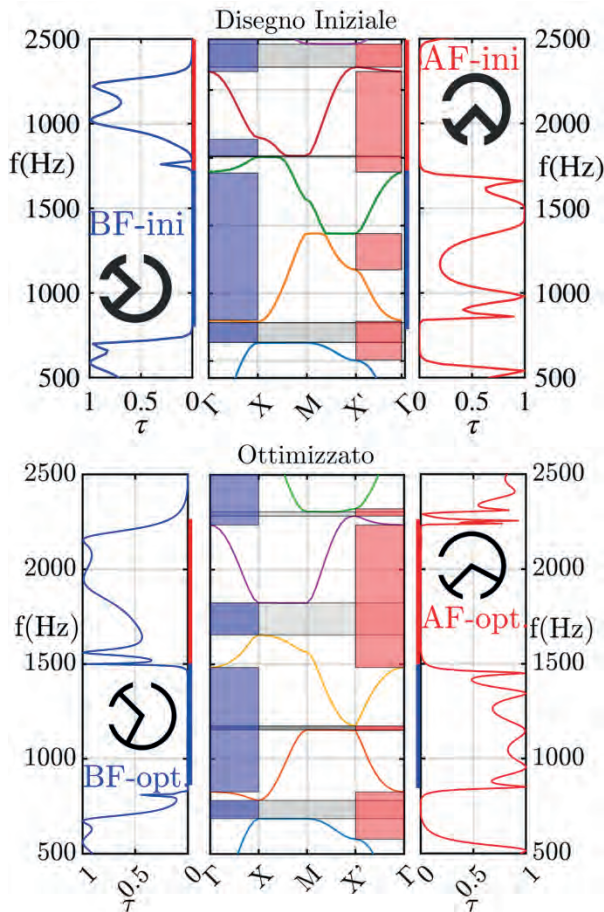


Fig. 5 – Confronto del diagramma a bande prima (in alto) e dopo il processo di ottimizzazione (in basso) per le orientazioni 0° e 90° . I LR-BG sono mostrati in grigio, i BG direzionali lungo X in blu e i BG direzionali lungo X' in rosso

Comparison of the band structures before (top) and after (bottom) the optimisation process for the 0° and 90° orientations. The LR-BGs are shown in grey, the directional BGs along X in blue, and the directional BGs along X' in red

Il valore relativo della frequenza di risonanza locale degli HR (f_{HR}) rispetto alla frequenza centrale del Bragg-BG (f_{Bragg}) è un fattore importante, poiché determina l'interazione tra i due BG. L'impiego di HR in uno SC non comporta necessariamente una riduzione della trasmissione attraverso la struttura. Pertanto, è necessario prestare particolare attenzione sia all'allineamento dei colli dei risonatori sia alle frequenze fondamentali degli HR integrati nei dispersori. La Figura 1 illustra un disegno

di dispersore composto da due HR, orientati a 0° e 90° , con cavità interne accoppiate. Tali cavità sono separate da una parete interna definita da un angolo $\theta = 118^\circ$. L'HR allineato a 90° , che presenta la cavità più grande, è sintonizzato a una frequenza più bassa ($f_{HR} = 760$ Hz), tale che $f_{HR} < f_{Bragg}$. Al contrario, l'HR allineato a 0° ha una cavità più piccola ed è sintonizzato a una frequenza più alta ($f_{HR} = 1800$ Hz), tale che $f_{HR} > f_{Bragg}$. Entrambi i risonatori condividono dimensioni identiche del collo, con larghezza $w = 0.025$ m e lunghezza $L = 0.006$ m.

In questa sezione si analizzano in modo sistematico i risultati numerici mostrati in Figura 5, fornendo una guida alla lettura dei diversi elementi grafici e alla loro interpretazione fisica.

La Figura 5 è composta da due parti. La parte superiore rappresenta la configurazione iniziale (ini), mentre la parte inferiore mostra la configurazione ottimizzata (opt). In ciascun caso, la figura è suddivisa in tre pannelli: al centro è riportato il diagramma di banda, mentre ai lati sono mostrati i coefficienti di trasmissione τ in funzione della frequenza per le due orientazioni dei dispersori.

Nel pannello centrale, le curve colorate rappresentano la struttura a bande del cristallo sonico lungo il percorso $\Gamma-X-M-X'-\Gamma$. Le regioni ombreggiate indicano i bandgap (BG). In particolare:

- le regioni grigie rappresentano i BG completi, nei quali la propagazione è inibita per tutte le direzioni;
- le regioni blu indicano i BG direzionali associati all'orientazione a 0° (direzione ΓX);
- le regioni rosse indicano i BG direzionali associati all'orientazione a 90° (direzione $\Gamma X'$).

Nei pannelli laterali sono riportati i coefficienti di trasmissione τ , con $\tau = 0$ che indica assenza di propagazione e $\tau = 1$ trasmissione completa. Il pannello di sinistra (curve blu) corrisponde all'orientazione a 0° , mentre quello di destra (curve rosse) all'orientazione a 90° . I simboli grafici (freccie circolari) indicano visivamente l'orientazione dei dispersori nelle due configurazioni.

La lettura della figura può essere effettuata confrontando, per ciascuna configurazione, i BG del diagramma centrale con i minimi di τ nei pannelli laterali. In particolare, una regione di BG direzionale deve corrispondere a una riduzione della trasmissione ($\tau \approx 0$) nella curva associata alla stessa orientazione.

Nella configurazione iniziale (parte superiore), si osserva che per l'orientazione a 0° il BG direzionale blu (indicato come BF-ini) si estende approssimativamente nell'intervallo 750–1700 Hz e corrisponde a valori di τ prossimi a zero nel pannello sinistro. Per l'orientazione a 90° , il BG direzionale rosso (AF-ini) è localizzato nell'intervallo 1720–2470 Hz e produce una riduzione della trasmissione nel pannello destro. Tuttavia, le due bande non risultano complementari, lasciando intervalli di frequenza con trasmissione elevata in entrambe le configurazioni.

Dopo l'ottimizzazione (parte inferiore), la distribuzione dei BG viene modificata. Il BG blu a 0° (BF-opt) si restringe e si sposta nell'intervallo circa 830–1485 Hz, mantenendo valori di τ prossimi a zero. Il BG rosso a 90° (AF-opt) si sposta verso frequenze più basse, nell'intervallo 1500–2250 Hz, mantenendo una larghezza di banda comparabile alla configurazione

iniziale. Questo spostamento rende le due bande più complementari, riducendo la sovrapposizione delle regioni di trasmissione elevata.

I BG completi (regioni grigie) sono presenti in entrambe le configurazioni e corrispondono a frequenze per le quali τ è ridotto indipendentemente dall'orientazione. Questi BG non sono stati inclusi direttamente nella funzione costo dell'ottimizzazione, ma risultano comunque modificati dal processo. Prima dell'ottimizzazione, essi sono localizzati a 710–826 Hz, 1352 Hz, 1810 Hz e 2334–2470 Hz; dopo l'ottimizzazione compaiono negli intervalli 685–781 Hz, 1151–1174 Hz, 1655–1824 Hz e 2282–2304 Hz.

Infine, si osserva che la posizione relativa dei BG rispetto alla frequenza di Bragg ($f_{\text{Bragg}} = 1400$ Hz) è coerente con le frequenze di risonanza locali degli HR, evidenziando il ruolo dell'interazione tra Bragg-BG e HR-BG nel determinare la risposta complessiva del sistema.

3.3 | Confronto numerico e sperimentale della trasmittanza

Il confronto tra simulazioni numeriche e misure sperimentali mostra una buona concordanza degli spettri di attenuazione per le due configurazioni 0° e 90°. In entrambe le configurazioni si osservano chiaramente gli intervalli di alta attenuazione (IL) associati al comportamento di commutazione.

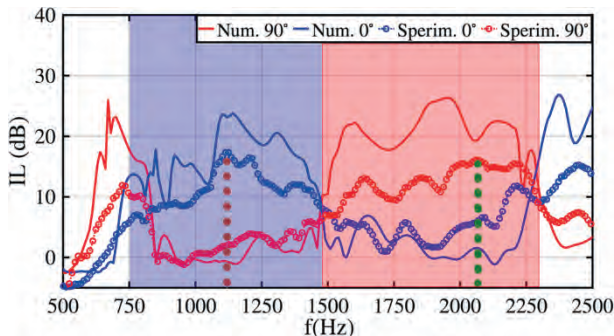


Fig. 6 – Insertion Loss. Risultati numerici e sperimentali a due frequenze rappresentative dei due regimi di funzionamento, in arancione (1110 Hz) e in verde (2070 Hz)

Insertion loss. Numerical and experimental results at two representative frequencies corresponding to the two operating regimes: orange (1110 Hz) and green (2070 Hz)

Nella regione di bassa frequenza, una configurazione presenta trasmissione elevata mentre l'altra mostra una forte riduzione del coefficiente di trasmissione. Nella regione di frequenza più alta, il comportamento si inverte. Questa inversione conferma il funzionamento del dispositivo come barriera acustica a doppio regime controllata mediante rotazione dei dispersori.

Le differenze residue tra risultati numerici e sperimentali sono compatibili con effetti di bordo, tolleranze geometriche di stampa, differenze tra modello ideale e struttura reale, e con la natura spazialmente non uniforme del campo trasmesso dietro una struttura finita. Nonostante tali effetti, le tendenze principali e la posizione delle bande operative sono ben riprodotte.

In alcuni intervalli di frequenza possono comparire valori di trasmittanza superiori all'unità. Questo effetto è attribuibile a interferenze costruttive locali, scattering multiplo e alla posizione del microfono in regioni del campo dove il contributo delle onde diffuse aumenta localmente la pressione rispetto alla misura di riferimento.

3.4 | Insertion Loss e mappe spaziali del campo acustico

Oltre alla trasmittanza, l'insertion loss (IL) è utilizzata per analizzare la variazione dei livelli di pressione acustica dovuta alla presenza del SC. La IL permette di rappresentare la risposta del dispositivo in termini di attenuazione acustica, con un'interpretazione diretta in decibel.

Il confronto tra insertion loss numerica e sperimentale conferma il comportamento complementare delle due configurazioni. Le differenze tra le mappe di IL per 0° e 90° evidenziano la capacità della struttura di modificare il campo trasmesso in funzione dell'orientazione dei dispersori.

Le mappe spaziali di IL tra configurazioni, ottenute a frequenze rappresentative delle due bande operative, mostrano una distribuzione non uniforme del campo dietro il SC. In prossimità della struttura si osservano differenze più marcate tra le due configurazioni, coerenti con il meccanismo di scattering e con gli effetti di dispersione multipla. Queste mappe confermano che la commutazione non è limitata a un singolo punto di misura, ma interessa una regione estesa del campo trasmesso.

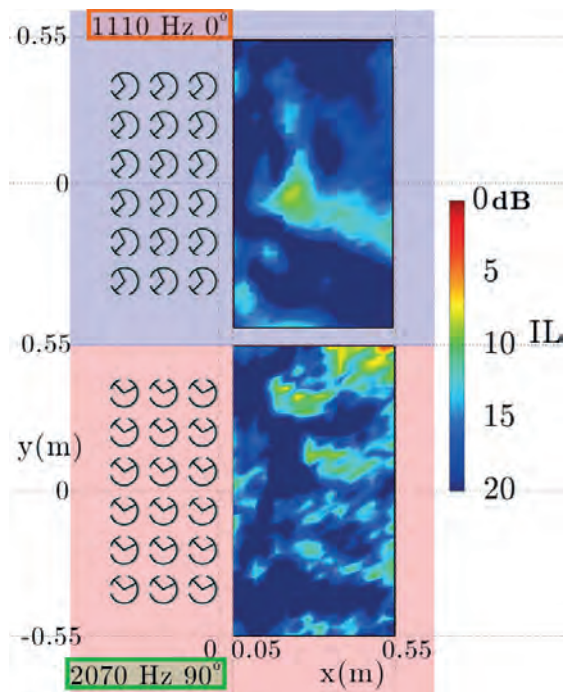


Fig. 7 – Mappe spaziali dell'Insertion Loss alle frequenze di migliore prestazione nei due regimi: in alto 1110 Hz (arancione) per BF-opt e in basso 2070 Hz (verde) per AF-opt
Spatial maps of insertion loss at the frequencies of best performance for the two operating regimes: top, 1110 Hz (orange) for BF-opt; bottom, 2070 Hz (green) for AF-opt

La scelta di valutare la risposta su una regione di misura ampia è particolarmente rilevante a bassa frequenza, dove gli effetti di diffrazione ai bordi della struttura e la finitezza del campione influenzano in modo sensibile il campo acustico. In questo senso, l'analisi spaziale fornisce una validazione più completa del dispositivo rispetto a una misura puntuale.

4 | Conclusioni

È stata presentata una barriera acustica sintonizzabile basata su un SC di dispersori asimmetrici multirisonanti con risonatori di Helmholtz integrati. Il principio di funzionamento è fondato sull'interazione tra Bragg-BG e HR-BG, con una risposta dipendente dall'orientazione dei dispersori.

La rotazione di 90° dei dispersori consente di ottenere bande di attenuazione complementari nella gamma 500-2500 Hz, realizzando una commutazione passiva tra due configurazioni ortogonali. La geometria è stata migliorata mediante ottimizzazione multiobiettivo, con particolare attenzione agli intervalli di frequenza nelle due orientazioni.

La validazione sperimentale mediante prototipo stampato in 3D e misure in camera anecoica con scansione robotizzata del campo acustico ha mostrato una buona concordanza con le simulazioni numeriche. I risultati confermano la possibilità di controllare la attenuazione acustica attraverso una semplice rotazione dei dispersori, con una struttura geometrica relativamente semplice e adatta a fabbricazione additiva.

Come possibile sviluppo futuro, si propone di automatizzare la rotazione dei dispersori o di combinare altri meccanismi di controllo del rumore, come l'assorbimento, per aumentare sia l'intervallo di frequenza sia il livello di IL della SCNB.

L'approccio proposto è promettente per applicazioni di filtraggio acustico passivo e dispositivi riconfigurabili per il controllo del rumore. La combinazione di multirisonanza, periodicità e ottimizzazione geometrica costituisce una base solida per sviluppi futuri verso configurazioni con prestazioni più ampie o adattate a specifici scenari applicativi.

Conclusion

A tunable acoustic barrier based on a sonic crystal composed of multiresonant asymmetric scatterers with integrated Helmholtz resonators has been presented. The operating principle relies on the interaction between Bragg bandgaps and locally resonant bandgaps, leading to an orientation-dependent acoustic response.

A 90° rotation of the scatterers produces complementary attenuation bands within the 500–2500 Hz range, enabling passive switching between two orthogonal operating configurations. The geometry was improved through multiobjective optimisation, with particular attention given to the attenuation ranges associated with each orientation.

Experimental validation was carried out using a 3D-printed prototype and measurements performed in an anechoic chamber with a robotic acoustic-field scanning system. The experimental results showed good agreement with the numerical simulations. The results confirm

that the acoustic attenuation can be controlled through a simple rotation of the scatterers, while maintaining a relatively simple geometry suitable for additive manufacturing.

As a possible future development, the rotation of the scatterers could be automated or combined with additional noise-control mechanisms, such as acoustic absorption, in order to further increase both the operating frequency range and the insertion loss of the SCNB.

The proposed approach is promising for passive acoustic filtering and reconfigurable noise-control devices. The combination of multiresonance, periodicity and geometric optimisation provides a solid basis for future developments towards wider-band or application-specific configurations.

Ringraziamenti

Questo lavoro è stato supportato dal Progetto “6G-TWIN – Integrating Network Digital Twinning into Future AI-Based 6G System”, finanziato dalla Smart Networks and Services Joint Undertaking (SNS JU) nell'ambito del programma Horizon Europe dell'Unione Europea, Grant Agreement n. 101136314.

Bibliografia

- [1] S.A. Cummer, J. Christensen, A. Alù, Controlling sound with acoustic metamaterials, *Nat Rev Mater* 1 (2016) 16001. <https://doi.org/10.1038/natrevmats.2016.1>.
- [2] G. Ma, P. Sheng, Acoustic metamaterials: From local resonances to broad horizons, *Sci. Adv.* 2 (2016) e1501595. <https://doi.org/10.1126/sciadv.1501595>.
- [3] W.E. Kock, F.K. Harvey, Refracting Sound Waves, *The Journal of the Acoustical Society of America* 21 (1949) 471–481. <https://doi.org/10.1121/1.1906536>.
- [4] C. Rubio, D. Caballero, J.V. Sanchez-Perez, R. Martinez-Sala, J. Sanchez-Dehesa, F. Meseguer, F. Cervera, The existence of full gaps and deaf bands in two-dimensional sonic crystals, *J. Lightwave Technol.* 17 (1999) 2202–2207. <https://doi.org/10.1109/50.803012>.
- [5] L. Bragg, X-Ray Crystallography, *Scientific American* 219 (1968) 58–74. <https://doi.org/10.1038/scientificamerican0768-58>.
- [6] C. Kittel, *Introduction to solid state physics*, 8th ed, Wiley, Hoboken, NJ, 2005.
- [7] H. von Helmholtz, *Die Lehre von den Tonempfindungen als physiologische Grundlage für die Theorie der Musik*, Vieweg, Braunschweig, 1863.
- [8] B. Yuan, V.F. Humphrey, J. Wen, X. Wen, On the coupling of resonance and Bragg scattering effects in three-dimensional locally resonant sonic materials, *Ultrasonics* 53 (2013) 1332–1343. <https://doi.org/10.1016/j.ultras.2013.03.019>.
- [9] M.P. Peiró-Torres, S. Castiñeira-Ibáñez, J. Redondo, J.V. Sánchez-Pérez, Interferences in locally resonant sonic metamaterials formed from Helmholtz resonators, *Applied Physics Letters* 114 (2019) 171901. <https://doi.org/10.1063/1.5092375>.
- [10] J. Guo, J. Cao, Y. Xiao, H. Shen, J. Wen, Interplay of local resonances and Bragg band gaps in acoustic waveguides with periodic detuned resonators, *Physics Letters A* 384 (2020) 126253. <https://doi.org/10.1016/j.physleta.2020.126253>.
- [11] M. Cenedese, E. Belloni, F. Braghin, Interaction of Bragg scattering bandgaps and local resonators in mono-coupled

- periodic structure, *Journal of Applied Physics* 129 (2021) 124501:1-124501:17. <https://doi.org/10.1063/5.0038438>.
- [12] T. D'Orazio, F. Asdrubali, L. Godinho, M. Veloso, P. Amado-Mendes, Experimental and Numerical Analysis of Wooden Sonic Crystals Applied as Noise Barriers, *Environments* 10 (2023) 116:1-116-20. <https://doi.org/10.3390/environments10070116>.
- [13] G. Iannace, G. Ciaburro, A. Trematerra, Metamaterials acoustic barrier, *Applied Acoustics* 181 (2021) 108172. <https://doi.org/10.1016/j.apacoust.2021.108172>.
- [14] F. Morandi, M. Miniaci, A. Marzani, L. Barbaresi, M. Garai, Standardised acoustic characterisation of sonic crystals noise barriers: Sound insulation and reflection properties, *Applied Acoustics* 114 (2016) 294-306. <https://doi.org/10.1016/j.apacoust.2016.07.028>.
- [15] G. Fusaro, M. Garai, Acoustic Requalification of an Urban Evolving Site and Design of a Noise Barrier: A Case Study at the Bologna Engineering School, *Applied Sciences* 14 (2024) 1837:1-1837:18. <https://doi.org/10.3390/app14051837>.
- [16] J. Redondo, D. Ramírez-Solana, R. Picó, Increasing the Insertion Loss of Sonic Crystal Noise Barriers with Helmholtz Resonators, *Applied Sciences* 13 (2023) 3662:1-3662:13. <https://doi.org/10.3390/app13063662>.
- [17] J. Redondo, L. Godinho, K. Staliunas, J.V. Sanchez-Perez, An equivalent lattice-modified model of interfering Bragg bandgaps and Locally Resonant Stop Bands for phononic crystal made from Locally Resonant elements, *Applied Acoustics* 211 (2023) 109555:1-109555:6. <https://doi.org/10.1016/j.apacoust.2023.109555>.
- [18] W. Zhou, B. Wu, Muhammad, Q. Du, G. Huang, C. Lü, W. Chen, Actively tunable transverse waves in soft membrane-type acoustic metamaterials, *Journal of Applied Physics* 123 (2018) 165304. <https://doi.org/10.1063/1.5015979>.
- [19] M. Padlewski, M. Volery, R. Fleury, H. Lissek, X. Guo, Active Acoustic Su-Schrieffer-Heeger-Like Metamaterial, *Phys. Rev. Applied* 20 (2023) 014022. <https://doi.org/10.1103/PhysRevApplied.20.014022>.
- [20] M. Thota, K.W. Wang, Reconfigurable origami sonic barriers with tunable bandgaps for traffic noise mitigation, *Journal of Applied Physics* 122 (2017) 154901. <https://doi.org/10.1063/1.4991026>.
- [21] B. Wu, W. Jiang, J. Jiang, Z. Zhao, Y. Tang, W. Zhou, W. Chen, Wave Manipulation in Intelligent Metamaterials: Recent Progress and Prospects, *Adv Funct Materials* 34 (2024) 2316745. <https://doi.org/10.1002/adfm.202316745>.
- [22] L. Chang, X. Li, Z. Guo, Y. Cao, Y. Lu, R. Garziera, H. Jiang, On-demand tunable metamaterials design for noise attenuation with machine learning, *Materials & Design* 238 (2024) 112685. <https://doi.org/10.1016/j.matdes.2024.112685>.
- [23] J.M. Herrero, S. García-Nieto, X. Blasco, V. Romero-García, J.V. Sánchez-Pérez, L.M. Garcia-Raffi, Optimization of sonic crystal attenuation properties by ev-MOGA multiobjective evolutionary algorithm, *Struct Multidisc Optim* 39 (2009) 203-215. <https://doi.org/10.1007/s00158-008-0323-7>.
- [24] J. Galiana-Nieves, J. Redondo, D. Benítez Aragón, D. Ramírez-Solana, J.M. Herrero, Evolutionary optimization processes for acoustic applications where size matters, *Inter Noise* 265 (2022) 4125-4135. https://doi.org/10.3397/IN_2022_0589.
- [25] A. Bravais, Mémoire sur les systèmes formés par des points distribués régulièrement sur un plan ou dans l'espace, Bachelier, Paris, 1850. <https://books.google.es/books?id=S56znQEACAAJ>.
- [26] L. Brillouin, *Wave Propagation in Periodic Structures*, Dover, New York, 1953.
- [27] L.E. Kinsler, A.R. Frey, A.B. Coppens, J.V. Sanders, *Fundamentals of Acoustics*, John Wiley & Sons, New York, US, 2000.
- [28] G. Floquet, Sur les équations différentielles linéaires à coefficients périodiques, *Annales Scientifiques de l'Ecole Normale Supérieure* 12 (1883) 47-88. <https://doi.org/10.24033/asens.220>.
- [29] D. Ramírez-Solana, J. Redondo, M.P. Fanti, M. Gulzari, Multiobjective design optimization of a tunable acoustic switch using multiresonant asymmetric scatterers, *Struct Multidisc Optim* 69 (2026) 36. <https://doi.org/10.1007/s00158-025-04238-x>.
- [30] G.P. Ward, R.K. Lovelock, A.R.J. Murray, A.P. Hibbins, J.R. Sambles, J.D. Smith, Boundary-Layer Effects on Acoustic Transmission Through Narrow Slit Cavities, *Phys. Rev. Lett.* 115 (2015) 044302. <https://doi.org/10.1103/PhysRevLett.115.044302>.