

Analisi sperimentali e numeriche di cristalli sonici utilizzati in barriere antirumore

Tommaso D'Orazio

Dipartimento di Filosofia,
Comunicazione e Spettacolo,
Università degli studi Roma Tre,
Via Ostiense, 234, 00146 Roma
Tom.dorazio@uniroma3.it

Ricevuto: 23/2/2023

Accettato: 18/7/2023

DOI: 10.3280/ria2-2023oa15485

ISSN: 2385-2615

I cristalli sonici sono particolari strutture periodiche ovvero strutture in cui gli elementi che le compongono hanno una disposizione geometrica regolare e ripetitiva. Le loro caratteristiche macroscopiche non dipendono solo dalla loro struttura molecolare, ma anche e soprattutto dalla loro geometria realizzativa. Il presente lavoro si concentra nello sviluppo di questa tecnologia, i cristalli sonici, utilizzati come barriere antirumore. In particolare, verranno confrontati i risultati sperimentali dell'attenuazione sonora acquisiti tramite i test in laboratorio di acustica in sala anecoica e semi anecoica, condotti su barriere a cristalli sonici in scala ridotta (scala 1:3 in pianta e scala 1:2 e 1:4 in altezza), con i risultati numerici ottenuti tramite simulazioni realizzate con il Metodo degli Elementi Finiti (FEM) attraverso l'aiuto del software di calcolo MATLAB. Quindi, sarà possibile confrontare i valori dei modelli trattati e considerare tale tecnologia come una possibile soluzione alla riduzione dell'inquinamento acustico anche e soprattutto nel rispetto dell'ambiente essendo strutture costituite da scatterers (i singoli elementi che costituiscono le barriere) di materiale riciclato o naturale come derivati del legno. Ciò nonostante questo lavoro è stato svolto su modelli in scala e dunque i valori ottenuti non sono necessariamente validi per modelli di dimensioni reali.

Parole chiave: barriere acustiche, cristalli sonici, strutture periodiche, barriere in legno, metodo sperimentale, metodo numerico

Experimental and numerical analysis of sonic crystals used in noise barriers

Sonic crystals are special periodic structures where the composing elements have a regular and repetitive geometric arrangement. Their macroscopic characteristics depend not only on their molecular structure, but also and above all on their design geometry. This study focuses on the development of this technology, sonic crystals, used as noise barriers. Specifically, experimental results of sound attenuation obtained through laboratory tests in anechoic and semi-anechoic rooms, conducted on scaled-down sonic crystal barriers (1:3 scale in plan and 1:2 and 1:4 scale in height), will be compared with numerical results obtained through simulations realized with the Finite Element Method (FEM) using MATLAB calculation software. Therefore, by comparing these results, it will be possible to assert the validity of the models. Additionally, it will be confirmed that this technology can be a truly excellent solution for reducing noise pollution, especially in consideration of the environment, as the structures consist of scatterers (the individual elements that make up the barriers) made from recycled or natural materials such as wood derivatives. However, it should be noted that this study was conducted on scaled models, and thus the values obtained may not necessarily be valid for full-scale models.

Keywords: noise barriers, sonic crystals, periodic structures, wooden barriers, experimental method, numerical method

1 | Introduzione

La continua crescita del traffico veicolare e il gran numero di persone esposte ad esso hanno reso il disturbo del sonno e il fastidio causato dal rumore del traffico stradale importanti problemi riscontrati dai cittadini [1]. Gli studi hanno dimostrato che l'esposizione al rumore del traffico stradale può indurre ulteriori effetti negativi sulla salute, inclusi effetti cardiovascolari [2], disturbi dell'apprendimento e ipertensione cardiopatia ischemica [3]. L'esposizione al rumore del traffico stradale può essere ridotta applicando strategie di

mitigazione sulle fonti, come migliorare il motore e il design del veicolo [4], ridurre le emissioni di rumore dovuti al contatto pneumatici/strada utilizzando speciali superfici o ancora, incentivando una politica improntata verso la riduzione degli spostamenti attraverso l'uso degli autoveicoli [5] incoraggiando altre forme di spostamento più ecosostenibili e silenziose. Tali azioni, però, non sono sempre convenienti o idonee, o addirittura inefficaci, e quindi la realizzazione di barriere antirumore rappresenta la soluzione più diffusa per ridurre ulteriormente l'esposizione delle persone. La presenza di uno ostacolo come una barriera tra sorgente (i veicoli)

e ricevitore attenua efficacemente la propagazione dell'onda acustica. In generale infatti, un'onda sonora, interagendo con una superficie, viene in parte riflessa, in parte assorbita ed in parte trasmessa. Le barriere convenzionali sono elementi principalmente fonoassorbenti e in parte minore fonoisolanti, ovvero attenuano il rumore del traffico stradale soprattutto attraverso l'assorbimento dell'energia sonora incidente piuttosto che per mezzo della riflessione [6]. Agendo allora sulle dimensioni dell'ostacolo si può intervenire fino a limitare notevolmente la trasmissione acustica. A tal scopo, le barriere convenzionali vengono quindi realizzate con materiale compatto, con massa superficiale almeno pari a 20 kg/m², in modo che possa essere considerata marginale l'energia sonora che si trasmette attraverso la barriera [7]. Dal punto di vista spettrale, le barriere tradizionali hanno un buon comportamento di assorbimento che è quasi omogeneo su tutto lo spettro di emissione del traffico, generalmente tra 100 Hz e 5 kHz ma concentrato soprattutto dai 500 Hz ai 1500 Hz, con un picco focalizzato a 1 kHz [8]. Tuttavia, le barriere antirumore convenzionali presentano diverse problematiche, come la diffrazione ai bordi che riduce nettamente l'attenuazione sonora: a causa del fenomeno della diffrazione, infatti, le onde sonore curvano quando oltrepassano il bordo di un ostacolo, come il culmine di una barriera antirumore (in questo caso, la curvatura avviene verso il basso, cioè verso la zona da proteggere) raggiungendo il ricevente. Inoltre, le barriere antirumore convenzionali manifestano altri problemi, infatti una barriera antirumore tradizionale senza alcun trattamento assorbente può riflettere l'energia sonora di nuovo attraverso la carreggiata in direzione dei ricevitori sul lato opposto [9], oltre a problematiche legate alle dimensioni della struttura, poiché una barriera di lunghezza e altezza variabile ha un forte impatto che può limitare il campo visivo, ridurre la luce naturale e il passaggio dell'aria per le persone interessate [10]. Al fine di minimizzare gli svantaggi sopracitati, negli ultimi anni la ricerca si è focalizzata verso lo studio dei cristalli sonici come barriere antirumore [11][12][13][14][15][16]. Tra i vantaggi legati all'utilizzo di questa tecnologia, è importante notare il peso contenuto delle strutture, che consente di ridurre i costi di fondazione e limitare di conseguenza anche i carichi agenti su di esse, diminuendo perciò il momento ribaltante dovuto al vento o all'onda d'urto dei treni ad alta velocità [17]. Questo tipo di barriera, inoltre, permette la continuità della visibilità e del passaggio dell'aria. Il concept studiato nel seguente studio corrisponde ad una soluzione altamente sostenibile, in cui gli elementi strutturali sono costituiti da tronchi di legno ottenuti da operazioni di diradamento forestale. In termini di sostenibilità, inoltre, i ceppi che vengono proposti per questa soluzione necessitano solo di basse lavorazioni, come tornio e un trattamento conservativo, essi non richiedono quindi di un'ampia lavorazione minimizzando in questo modo i costi e l'impatto ambientale [18]. Il seguente lavoro presenta dunque uno studio sperimentale in laboratorio sull'attenuazione acustica prodotta da cristalli sonici. Essi sono in scala ridotta e sono composti da scatterers di legno al fine di formare

delle barriere antirumore utilizzabili in ambito autostradale. Oltre ai valori misurati in laboratorio, è stato condotto anche uno studio analitico tramite il software MATLAB. Dunque, i risultati sono stati ottenuti tramite entrambi gli studi e successivamente sono stati confrontati. Nella seguente ricerca, sono stati condotti test in laboratorio con cristalli sonici utilizzati come barriere acustiche in scala 1:3 composte unicamente da legno di pino, a differenza dei lavori precedenti dove il materiale dei test era quasi esclusivamente composto da scatterers in PVC. L'obiettivo di questo lavoro, dunque, è quello di studiare, in via sperimentale e in via analitica, un'alternativa concreta alle barriere antirumore convenzionali.

2 | Cristalli sonici

L'oggetto di studio del presente lavoro sono i cristalli sonici. Questi, sono strutture periodiche artificiali non omogenee, dove i diffusori (gli scatterers) sono disposti in una configurazione periodica con un motivo quadrato, triangolare o rettangolare e hanno un'elevata impedenza acustica rispetto al mezzo in cui sono posti (ovvero l'aria) [19]. La disposizione periodica dei diffusori (gli scatterers) provoca un'attenuazione del suono selettiva in frequenza, nota come band gap. Il gap di banda sono regioni di frequenze in cui la propagazione del suono è significativamente limitata dal cristallo sonico dovuta all'interferenza distruttiva delle onde sonore che si riflettono sugli scatterers. Quando un'onda acustica interagisce con una struttura periodica forma bande di frequenze, dove certe frequenze sono lasciate passare attraverso la struttura senza molta attenuazione, mentre altre frequenze vengono attenuate [20]. Il meccanismo fisico che governa questo fenomeno è la legge di Bragg, la cui formulazione fu a seguito di esperimenti su onde elettromagnetiche nel 1913. Essa afferma che l'interferenza distruttiva di un'onda che colpisce il reticolo cristallino con angolo di incidenza θ , determina un band gap influenzato dal rapporto di densità M , ovvero il rapporto tra la densità del materiale dei diffusori (scatterers) e quella del mezzo in cui sono immersi (l'aria), la cui frequenza centrale f_{BG} è dipendente dalla costante del reticolo α , cioè la distanza tra due scatterers adiacenti, e da c , la velocità di propagazione del suono nel mezzo [21].

$$f_{BG} = \frac{c}{2\alpha \sin\theta} \quad (1)$$

Dove:

f_{BG} = Frequenza centrale del band gap

c = Velocità di propagazione del suono nell'aria (≈ 343 m/s)

α = Costante geometrica del reticolo

θ = Angolo dell'onda incidente

La legge di Bragg esprime in sostanza la condizione affinché l'interferenza tra le onde diffratte dai vari piani cristallini sia distruttiva. Per calcolare la riduzione del suono fornita dalle strutture periodiche, è stato introdotto il

concetto di *Insertion Loss (IL)* che descrive la perdita di potenza del segnale acustico a causa dell'inserimento della barriera [22].

L'*Insertion Loss* viene espresso dalla seguente formula:

$$IL = 10 \log_{10} \frac{P_T}{P_R} \quad (2)$$

Dove:

IL = Insertion Loss

PT = Potenza trasmessa prima della barriera

PR = Potenza ricevuta dopo la barriera

L'attenuazione sonora fornita dalla barriera acustica, calcolata in dB, è valutata quindi come differenza tra i livelli di pressione sonora medi misurati con e senza la barriera a cristalli sonici. L'*IL* avviene ogni volta che si inserisce un elemento di disturbo all'interno di una linea di trasmissione. La causa della riduzione del suono da parte della barriera è principalmente dovuta a due meccanismi: alla configurazione della struttura, come la disposizione geometrica e la distanza tra i diffusori, (quindi legata alla legge di Bragg), e alle proprietà acustiche dipendenti dalla geometria e dall'assorbimento acustico dei singoli elementi, che nel caso degli esperimenti in esame sono composti da pali cilindrici in legno di pino. La disposizione fisica e geometrica dell'intero cristallo sonico può essere definita specificando il contenuto di una singola cella unitaria, la cui ripetizione genera la struttura cristallina. Ogni cella unitaria, dunque, è caratterizzata da una costante reticolare α e da una frazione di riempimento ff . La costante reticolare, come detto, è un parametro relativo alla dimensione fisica e geometrica della cella elementare e quantifica la distanza tra i vari scatterers, mentre la frazione di riempimento è il rapporto tra il volume occupato dal singolo scatterer e il volume dell'intera cella elementare [23].

3 | Metodo sperimentale

In questa sezione viene proposto e analizzato l'utilizzo sperimentale di elementi tondi in legno, di piccolo diametro, 4 cm, per la realizzazione in scala delle barriere acustiche composte da cristalli sonici. Questi elementi sono ampiamente disponibili dalle operazioni di diradamento forestale e richiedono poca lavorazione per essere incorporati nella barriera acustica, dando vita a una soluzione interessante, sostenibile e praticabile. Nel laboratorio d'acustica, dunque, è stata allestita una camera chiusa nella quale è stato possibile creare le condizioni di configurazione anecoica e semi anecoica con lo scopo di rappresentare e confrontare, il più fedelmente possibile, la propagazione del suono 2D assunta dal modello numerico. Inoltre, l'importanza dell'utilizzo dei test in laboratorio è essenziale poiché grazie ai dati e i risultati derivati dagli esperimenti, è possibile prevedere e intuire effettivamente il comportamento dei cristalli sonici utilizzati realmente come barriere antirumore.

3.1 | Disposizione della prova in laboratorio

Le barriere composte da cristalli sonici che sono state testate in laboratorio presentano due tipi di configurazioni geometriche in pianta, barriere con distribuzione degli scatterers in pianta geometrica rettangolare e triangolare. In entrambi i tipi di disposizioni, gli scatterers, che sono costituiti da pali di legno di pino con diametro di 4 cm, sono stati disposti in quattro file, ed essi formano le barriere dei test. Le barriere testate in laboratorio hanno lo stesso valore di frazione di riempimento ff delle barriere reali e delle barriere implementate tramite il calcolo numerico e valgono rispettivamente 0.39 per le barriere a disposizione rettangolare e 0.45 per le barriere a geometria triangolare con costante reticolare α in entrambe le geometrie pari a 5,5 cm.

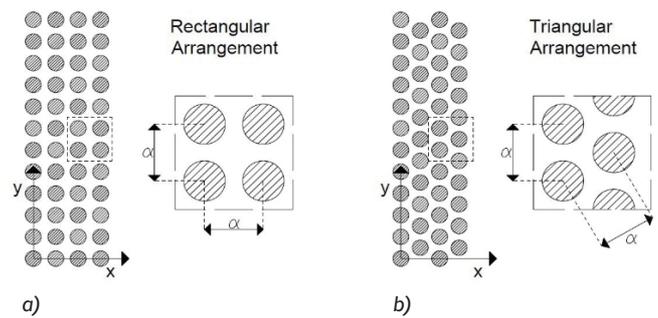


Fig. 1 – Differenti disposizioni geometriche in pianta: disposizione rettangolare a) e triangolare b)
Different geometric arrangements in plan: rectangular arrangement a) and triangular b)

I cristalli sonici trattati in laboratorio sono modelli perfettamente fedeli alle barriere reali ma in scala 1:3 in pianta, ovvero per quanto riguarda le dimensioni planimetriche dei diametri degli scatterers e delle distanze tra essi, mantenendo però la stessa frazione di riempimento delle barriere in scala reale (Fig. 1). In altezza invece, per le barriere usate nei test sono state adottate due scale differenti e perciò misurano due diverse quote, le barriere in scala 1:2 sono alte 1.2 metri mentre le barriere in scala 1:4 misurano 0.6 metri, essendo le barriere reali alte 2.4 m. La fonte sonora utilizzata per i test in laboratorio è costituita da uno speaker a una distanza pari a 35 cm dalla barriera e dall'altro lato di essa sono stati disposti quattro ricevitori. Una prima coppia di microfoni è stata disposta a 45 cm dal suolo mentre una seconda coppia alla distanza di 75 cm dal suolo. Inoltre, la prima coppia è stata collocata distante 10 cm dietro la barriera mentre la seconda a 30 cm dalla barriera (Fig. 2). In direzione parallela alla barriera invece, due ricevitori sono stati collocati alla distanza di 20 cm a destra della fonte sonora e due ricevitori sono stati disposti a 20 cm a sinistra della fonte sonora (Fig. 3). In questo modo sono stati registrati molteplici valori di attenuazione, ognuno prodotto da uno dei quattro ricevitori posti oltre la barriera. I risultati finali sono stati ottenuti infine tramite la media dei singoli valori registrati. Di seguito

sono state riportate due rappresentazioni grafiche che illustrano la disposizione laterale e in pianta dei test condotti in laboratorio:

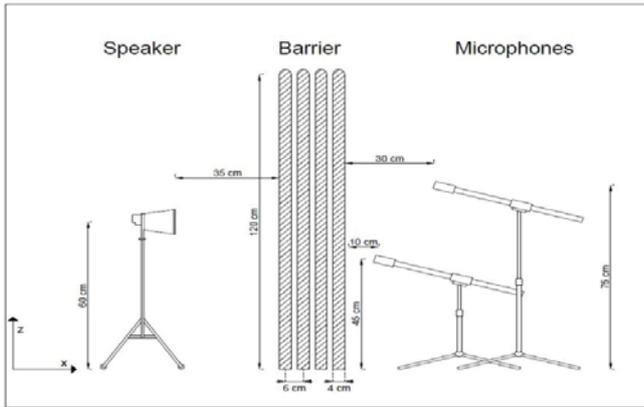


Fig. 2 – Disposizione laterale dei test in laboratorio
Lateral arrangement of tests in the laboratory

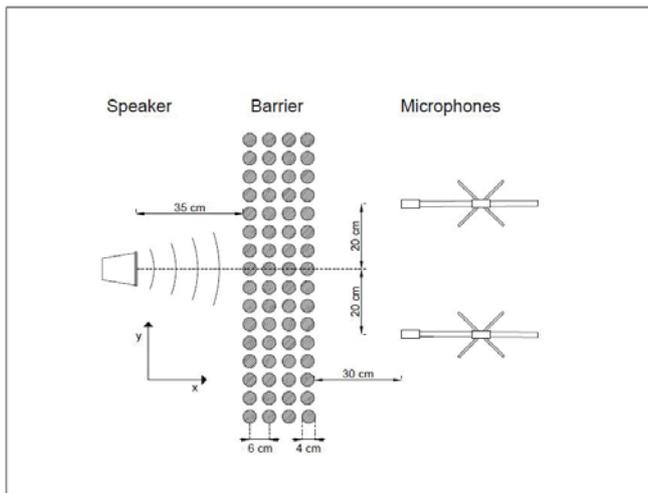


Fig. 3 – Disposizione in pianta dei test in laboratorio
Layout of laboratory tests

Il tipo di onda sonora generata dal traffico veicolare è di tipo lineare, essendo costituita dall'insieme delle singole auto in movimento, in laboratorio però, non potendo generare questo tipo di onda, sono stati adottati due tipi di speaker fissi, uno unidirezionale e uno omnidirezionale. Lo speaker omnidirezionale ha la caratteristica di generare onde sonore in tutte le direzioni con la stessa intensità, mentre lo speaker unidirezionale è il tipo di altoparlante monodirezionale che più fedelmente si può avvicinare al caso reale. In particolare, gli speaker utilizzati in laboratorio sono dispositivi acustici in grado di emettere rumore bianco, ovvero un particolare suono caratterizzato dall'ampiezza dell'onda sonora costante su tutto lo spettro delle frequenze interessate, o emettenti il suono "sweep", cioè un segnale composto da un tono puro la cui frequenza aumenta nel tempo con un certo andamento graduale.

3.2 | Risultati della prova in laboratorio

La gamma di frequenze studiate nei test in laboratorio coincide con la banda di frequenze che determinano maggior interesse per questo tipo di trattazione, ovvero l'estensione di frequenze che abitualmente si verifica a causa del traffico stradale, che si sviluppa tipicamente dai 500 Hz fino ai 1500 Hz circa, con un picco centrato generalmente sui 1000 Hz [24].

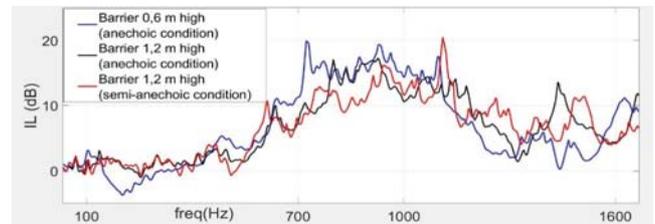


Fig. 4 – Grafici dei valori di Insertion Loss derivati dai test in laboratorio per barriere a geometria rettangolare
Graphs of Insertion Loss values derived from laboratory tests for rectangular barriers

Determinato il gap di frequenza interessato, tramite i test in laboratorio, sono stati ricavati i valori dell'Insertion Loss dovuti all'effetto delle barriere dei test in relazione alla frequenza. Di seguito sono stati rappresentati i grafici dell'attenuazione acustica dei test in laboratorio (Fig. 4), (Fig. 5), dove nelle ordinate è stato posto l'IL in dB e nelle ascisse i valori di frequenza in scala logaritmica fino a 1600 Hz.

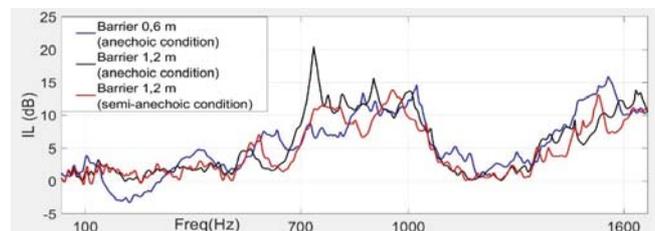


Fig. 5 – Grafici dei valori di Insertion Loss derivati dai test in laboratorio per barriere a geometria triangolare
Graphs of Insertion Loss values derived from laboratory tests for triangular barriers

Dai grafici rilevati in laboratorio è possibile notare che i valori di IL derivati dallo stesso tipo di geometria di barriera sono abbastanza simili tra loro. Si osserva che l'attenuazione generata dalla geometria rettangolare determina valori di attenuazione acustica più alti rispetto all'attenuazione causata dalla geometria triangolare. In particolare, si può constatare che la fascia di frequenze maggiormente attenuate per la barriera a geometria rettangolare, ovvero il band gap, coincide per tutti i casi esaminati per questa geometria, alla fascia di frequenze che va circa da 700 Hz fino a 1300 Hz con frequenza centrale intorno a 1 kHz. Per le barriere a geometria triangolare invece, il band gap risulta essere più stretto e comprende le frequenze da circa 700 Hz fino alle

1100 Hz con frequenza centrale intorno ai 900 Hz. Questi valori confermano ciò che ci si aspettava, ovvero sono conformi con i valori tipici della banda di frequenze generata dal rumore traffico stradale, poiché la scelta della disposizione geometrica, delle dimensioni e della distanza tra gli scatterers che compongono le barriere, produce l'attenuazione del livello sonoro di questa precisa fascia di frequenze. La configurazione che comporta i valori minori di IL per entrambe le disposizioni, cioè sia per la barriera a geometria rettangolare, sia per la barriera a geometria triangolare, avviene con la configurazione di stanza semi anecoica. Questo avviene perché, presumibilmente, con tale specifica disposizione, le onde sonore generate dallo speaker possono riflettersi anche sul pavimento, raggiungendo così più facilmente i rilevatori posti dietro alla barriera e determinare dunque un'attenuazione più debole del cristallo sonico. Inoltre, come già anticipato, le dimensioni in pianta dei modelli utilizzati in laboratorio sono in scala 1:3 perciò le dimensioni degli scatterers e le distanze tra essi sono tre volte minori delle misure delle barriere reali, lasciando inalterate però le proporzioni e dunque la frazione di riempimento. Questo implica che le frequenze attenuate dal modello sono tre volte maggiori di quelle assorbite dal cristallo sonico di dimensioni reali, e, dunque, per poter confrontare i valori dei modelli sperimentali con quelli reali, nei grafici illustrati è stato necessario dividere i valori derivati dai test empirici per tre.

4 | Metodo numerico

Nel presente studio si vogliono comparare i risultati derivanti dal metodo sperimentale assunti tramite i test conseguiti in laboratorio, con i risultati derivati dal calcolo numerico utilizzando la tecnica del Metodo degli Elementi Finiti (FEM) implementata tramite MATLAB. Il FEM è una tecnica di modellazione numerica idonea alla risoluzione di problemi ingegneristici complessi e non omogenei, descritti da equazioni differenziali, in maniera semplificata e approssimata, tramite l'utilizzo di operazioni di discretizzazione, le quali consentono di trasformare le suddette equazioni differenziali in equazioni algebriche, di più semplice risoluzione e accessibile al calcolo automatico.

4.1 | Modellazione FEM tramite MATLAB

In questa sezione verranno descritti i criteri con cui è stata eseguita la modellazione e verranno di seguito illustrati i risultati derivati dal Metodo degli Elementi Finiti tramite il software per il calcolo numerico MATLAB. Per creare la modellazione tramite il software di calcolo, è stata considerata solo una parte della barriera, ovvero, nella direzione longitudinale (asse y), la porzione della struttura che comprende le semi distanze a destra e a sinistra tra due scatterers adiacenti e, nella direzione trasversale (asse x), la distanza che va dalla fonte acustica, fino ai ricettori posti oltre la barriera.

La porzione di spazio così delimitata è un rettangolo largo quanto la costante reticolare α e lungo quanto la distanza tra lo speaker e i microfoni (Fig. 6). In questo modo è stato possibile considerare l'onda incidente come un'onda piana, come effettivamente si verifica nel caso reale. Le misure adottate per il calcolo numerico corrispondono alle reali dimensioni delle barriere, costituite quindi da scatterers di diametro 12 cm e costante reticolare pari 17 cm.

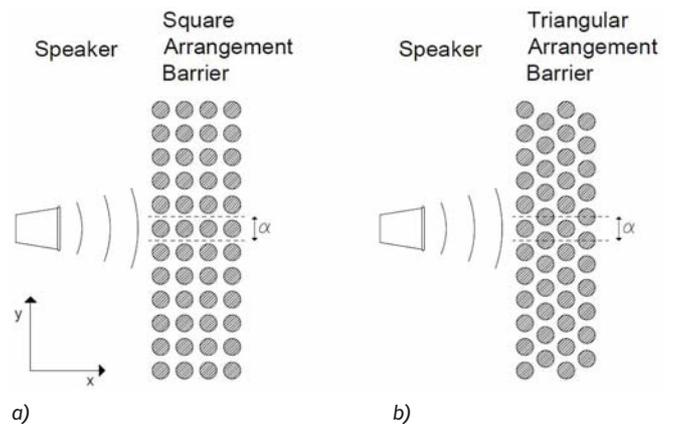


Fig. 6 – Porzione d'area considerata per la modellazione con il metodo FEM per le barriere a geometria rettangolare a) e triangolare b)

Portion of area considered for modeling with the FEM method for barriers with rectangular a) and triangular geometry b)

Nei lati corti dell'area rettangolare così creata sono state disposte le configurazioni al contorno di air impedance, che rappresenta l'opposizione che esercita l'aria alla propagazione del flusso sonoro, mentre nei lati paralleli alla direzione del flusso sonoro, cioè i lati più lunghi del rettangolo, e al perimetro degli scatterers, è stata fissata la condizione di parete rigida (rigid wall), ovvero di impedenza infinita, perché si assume che attraverso queste superfici non sia permesso il flusso sonoro. Dalla Fig. 7 si può notare la struttura delle mesh all'interno dell'area d'interesse. In particolare, le mesh si assottigliano e i nodi diventano più capillari man mano che si avvicinano ai punti di maggiore importanza, ovvero in prossimità degli scatterers.

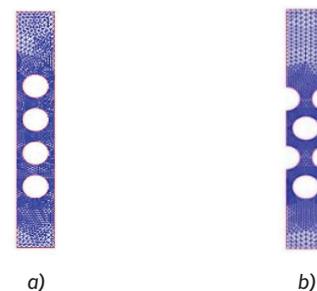


Fig. 7 – Modellazione mesh della disposizione geometrica rettangolare a) e disposizione geometrica triangolare b)
Mash modeling of rectangular geometric arrangement a) and triangular geometric arrangement b)

5 | Confronto del metodo sperimentale e del metodo numerico

In questa sezione della trattazione vi è un confronto tra i valori di attenuazione sonora dovuti ai test sperimentali in laboratorio per entrambe le geometrie di barriere, rettangolari e triangolari, con i valori derivati dal metodo numerico (Fig. 8), (Fig. 9).

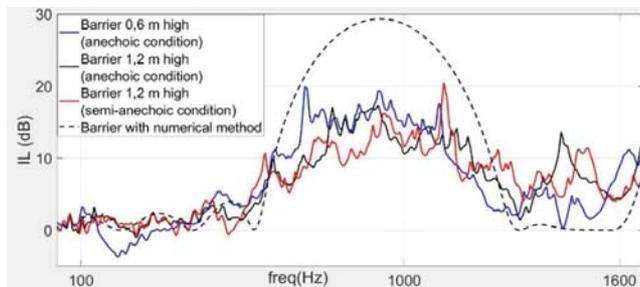


Fig. 8 – Grafici dei valori di Insertion Loss derivati dai test in laboratorio per barriere a geometria rettangolare
Graphs of Insertion Loss values derived from laboratory tests for rectangular barriers

Confrontando i risultati sperimentali con quelli derivati dal calcolo numerico per le barriere a geometria rettangolare si può osservare che l'andamento dei valori di attenuazione acustica è sufficientemente analogo. Per entrambi gli approcci di studio, sperimentale e numerico, i valori di *IL* mostrano una bassa attenuazione acustica per le frequenze minori fino a circa 400 Hz e presentano un gap di banda che va da circa 600 Hz a 1300 Hz. Nell'approccio numerico, inoltre, si può notare che la frequenza maggiormente attenuata coincide anche con la frequenza centrale del band gap che si attesta intorno a 1000 Hz. Dai risultati dell'approccio sperimentale invece, la frequenza centrale rimane intorno a 1 kHz però non si percepisce un picco di attenuazione relativo a questa frequenza.

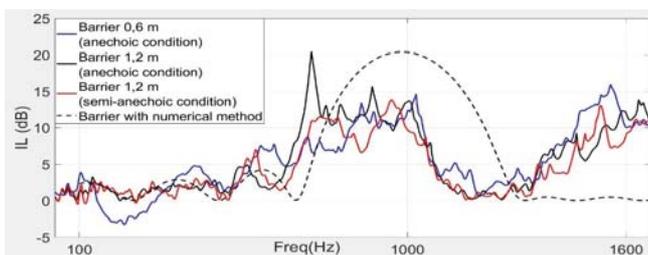


Fig. 9 – Grafici dei valori di Insertion Loss derivati dai test in laboratorio per barriere a geometria triangolare
Graphs of Insertion Loss values derived from laboratory tests for triangular barriers

Confrontando i risultati sperimentali con quelli derivati dal calcolo numerico per le barriere a geometria triangolare è possibile osservare andamenti lievemente differenti dei valori di attenuazione acustica. Per entrambi gli approcci di studio, sperimentale e numerico, i valori di *IL* mostrano una bassa attenuazione acustica per le frequenze minori fino a circa

500 Hz. Nel caso sperimentale, si può notare che il band gap si attesta tra 650 Hz a 1 kHz circa, con la frequenza centrale intorno a 800 Hz. Questo risulta prima del band gap prodotto dai risultati del calcolo numerico che si colloca da circa 700 Hz a 1300 Hz con frequenza centrale intorno a 1 kHz. Il band gap derivato dal calcolo numerico si dimostra dunque più ampio e spostato verso le alte frequenze rispetto ai valori originati dalle prove in laboratorio. Per ultimo si può notare che le barriere sperimentali determinano un'ulteriore attenuazione intorno alla frequenza di 1500 Hz mentre tramite il metodo numerico non si riscontra questa ulteriore attenuazione nella sopraindicata fascia di frequenze.

6 | Discussione dei risultati

Di seguito sono esposte per entrambe le tipologie di barriere, a geometria in pianta rettangolare e triangolare, la tabella riassuntiva con i valori di attenuazione acustica espressi tramite i livelli di *IL* valutati in dB, registrati in laboratorio e i livelli di *Insertion Loss* calcolati tramite il metodo numerico. Le tabelle riportano inoltre la regione di frequenze maggiormente attenuate, ovvero il band gap, il valore dei diametri, la costante reticolare α e la frazione di riempimento *ff*.

Tab. 1 – Valori di Insertion Loss, del band gap, dei diametri, della costante reticolare α e della frazione di riempimento *ff* relativi alle barriere a geometria rettangolare e triangolare derivati dai test sperimentali e dal calcolo numerico
Insertion Loss, band gap, diameters, lattice constant α and filling fraction *ff* values for rectangular and triangular geometry barriers derived from experimental tests and numerical calculation

Experimental	Method	Insertion Loss Peak [dB]	Band Gap [Hz]	Diameter [cm]	α [cm]	<i>ff</i>
Rectangular Geometry	Barrier 0,6 m Anechoic Condition	20	700-110	4	5,5	0,39
	Barrier 1,2 m Anechoic Condition	21	800-1200	4	5,5	0,39
	Barrier 1,2 m Semi-Anechoic Condition	18	900-1100	4	5,5	0,39
Triangular Geometry	Barrier 0,6 m Anechoic Condition	15	850-1050	4	5,5	0,45
	Barrier 1,2 m Anechoic Condition	20	750-1000	4	5,5	0,45
	Barrier 1,2 m Semi-Anechoic Condition	14	750-950	4	5,5	0,45
Numerical method		Insertion Loss Peak [dB]	Band Gap [Hz]	Diameter [cm]	α [cm]	<i>ff</i>
Rectangular Geometry		29	650-1300	12	17	0,39
Triangular Geometry		20	750-1300	12	17	0,45

Dalla tabella riassuntiva possiamo facilmente fare un confronto diretto tra i valori prodotti dai test in laboratorio e dei risultati derivati dal calcolo numerico. Prendendo ora in esame i valori relativi all'*IL* della barriera a geometria in pianta rettangolare, notiamo che i picchi di attenuazione acustica sono notevolmente superiori nel caso condotto tramite il

software di calcolo rispetto ai valori misurati in laboratorio. Inoltre, anche il range di frequenze maggiormente attenuate, il band gap, risulta essere più ampio nel caso derivato dal calcolo numerico rispetto alle misurazioni conseguite in laboratorio. Facendo una comparazione tra i risultati sperimentali e quelli derivati dal Metodo degli Elementi Finiti per le barriere a geometria in pianta triangolare, si può osservare che i valori di *Insertion Loss* appaiono essere più simili tra loro rispetto ai risultati provenienti dalle barriere a geometria rettangolare. Nonostante ciò, per le barriere a geometria triangolare, i valori di *IL* derivati dal calcolo numerico appaiono essere generalmente superiori rispetto ai valori dei test in laboratorio e il band gap risulta posticipato verso le frequenze più alte. Dal confronto dei due metodi di studio, sperimentale e numerico, possiamo affermare che i risultati sono sufficientemente simili anche se emergono alcune difformità. Queste discordanze possono essere causate dall'unione di vari fattori, come per esempio la non perfetta geometria in pianta rettangolare e triangolare delle barriere prese in esame durante i test in laboratorio, le imperfezioni nella geometria cilindrica dei singoli scatterers, la non perfetta condizione di stanza anecoica che potrebbe portare a riflessioni sonore indesiderate durante la registrazione dei risultati, errori derivati dai microfoni e, particolarmente importante, la differenza di rappresentazione della sorgente sonora nelle prove dei test conseguiti in laboratorio rispetto alla modellazione numerica tramite il software di calcolo. La sorgente acustica adottata in laboratorio, infatti, è costituita da uno speaker, questo è una sorgente puntiforme e perciò emette onde acustiche con simmetria sferica. Tale tipo di sorgente ben rappresenta sorgenti acustiche reali come sorgenti industriali, per esempio, ma non strade e ferrovie. Infatti, nel caso reale, la sorgente sonora è rappresentata dalle autovetture che si muovono parallelamente alle barriere e questo tipo di sorgente è descritta come una sorgente lineare. Le sorgenti lineari possiedono una simmetria cilindrica e perciò l'onda acustica trasmessa ha una geometria piana. Proprio questa è la fondamentale differenza tra il tipo di onda emanata dall'altoparlante all'interno del laboratorio durante i test sperimentali e la schematizzazione condotta con il Metodo degli Elementi Finiti. Nel metodo numerico, infatti, la schematizzazione della sorgente riflette il caso reale poiché l'onda trasmessa è piana a differenza dell'onda sferica testata in laboratorio.

7 | Conclusioni

Il presente articolo ha esplorato la tecnologia dei cristalli sonici applicati come barriere antirumore in campo autostradale. Sono stati condotti test in laboratorio utilizzando cristalli sonici composti da scatterers in legno di pino in scala 1:3 e successivamente le stesse barriere sono state studiate analiticamente tramite il software MATLAB. Il confronto dei risultati ottenuti tramite le sperimentazioni in laboratorio e i valori ottenuti mediante la modellazione analitica mostrano una adeguata corrispondenza ed in linea con i valori conse-

guiti da altri studi precedenti [25]. In particolare, è possibile notare che la disposizione con 4 file di scatterers e con geometria rettangolare ha prodotto ottimi risultati in materia di attenuazione acustica. Le barriere antirumore a cristalli sonici, dunque, sono soluzioni che potrebbero realmente essere efficaci nell'abbattimento del rumore generato dal traffico stradale risolvendo le problematiche legate alle barriere antirumore convenzionali come la diffrazione ai bordi della barriera, la riflessione dell'onda acustica incidente e il limitato accesso di aria e luce attraverso di esse. Oltre a ciò, le barriere a cristalli sonici comporterebbero ben altri vantaggi. Infatti, essendo costituite da scatterers di materiale riciclato o naturale come derivati del legno o anche tronchi di legno interi reperibili direttamente in loco, questo tipo di soluzione risulta essere concorde con le attuali politiche verdi, dimostrando una certa attenzione verso il rispetto dell'ambiente e dell'economia circolare. Inoltre, questo tipo di barriere presenterebbe anche vantaggi pratici, poiché sono strutture più leggere rispetto alle barriere antirumore convenzionali e possono essere costruite con maggior facilità. Difatti la costruzione della barriera acustica a cristalli sonici può essere eseguita con l'analoga attrezzatura utilizzata per l'installazione di pali di servizio per linee di comunicazione, introducendo i tronchi nel terreno ad una determinata profondità. La soluzione proposta può essere vista quindi come una soluzione tecnologicamente semplice e sostenibile, con elevate potenzialità nella mitigazione del rumore da traffico. Questa tipologia di barriere antirumore infine può utilizzare meno materiale ed essere competitiva in termini di costi, presentando un certo livello di trasparenza e basso impatto visivo. In aggiunta possono essere adeguatamente sintonizzate effettuando la corretta disposizione di diffusori, al fine di controllare le proprietà di attenuazione del suono per diverse situazioni. Proprio per tale motivo, questo tipo di tecnologia può essere ben adattabile anche per altre sorgenti acustiche, poiché cambiando opportunamente la disposizione, le dimensioni e la geometria della barriera è possibile attenuare differenti bande di frequenze. Nonostante le ottime proprietà di questo tipo di barriere, l'uso di cristalli sonici come barriere antirumore sta ancora faticando per diffondersi. In effetti, gli scenari dei casi reali richiedono un tributo in termini di utilizzo dello spazio (che non sempre è possibile ottenere), poiché l'area necessaria per l'installazione di tali strutture risulta essere superiore a quello necessario per una barriera antirumore convenzionale. Inoltre, nei casi pratici in cui i cristalli sonici sono stati installati ai lati della strada, si è osservato che queste strutture possono accumulare molto sporco tra i cilindri durante il loro normale utilizzo. Al fine di preservare l'igiene e la loro efficacia, quindi, è necessaria una pulizia costante, che rappresenta un aumento dei costi di manutenzione.

Un ulteriore aspetto relativo al reale funzionamento di questo tipo di barriere è rappresentato dall'effettiva area di mitigazione dietro di esse. Infatti, tutte le sperimentazioni studiate sono state eseguite vicino alla barriera, mentre sono necessari studi che dimostrino come i cristalli sonici possano essere efficaci a distanze maggiori. Al fine di espandere l'a-

rea di mitigazione alle distanze residenziali, potrebbe essere necessario aumentare l'altezza del cilindro, ma ciò comporterebbe rafforzare le fondazioni e aumenterebbe i costi di produzione e di messa in opera. Dunque, questa soluzione merita di essere approfondita anche da ricerche future. In merito, è doveroso citare il lavoro di Hsiao Mun Lee et al. [26] dove le barriere antirumore costituite da cristalli sonici sono state utilizzate per creare un labirinto in un parco giochi per bambini, mentre altri studi hanno persino analizzato come interi alberi possano attenuare il rumore se correttamente distribuiti nello spazio agendo proprio come cristalli sonici [27].

Conclusions

This article has explored the technology of sonic crystals applied as noise barriers in highway settings. Laboratory tests were conducted using sonic crystals made of pine wood scatterers at a 1:3 scale, and the same barriers were subsequently analyzed through MATLAB software. The comparison of the results obtained through laboratory experiments and the values obtained through analytical modeling show an adequate correspondence and in line with the values achieved with other previous studies [25]. In particular, it can be noted that the arrangement with 4 rows of rectangular geometry scatterers has produced excellent results in terms of acoustic attenuation. Sonic crystal noise barriers, therefore, are solutions that could be truly effective in reducing traffic-generated noise by solving problems related to conventional noise barriers such as diffraction at the barrier edges, reflection of the incident acoustic wave, and limited access to air and light through them. In addition, sonic crystal barriers would also have other advantages. In fact, being composed of recycled or natural material scatterers such as wood derivatives or even whole logs of wood that can be found directly on-site, this type of solution is in line with current green policies, demonstrating a certain attention to environmental respect and circular economy. Moreover, this type of barrier would also have practical advantages, as it is lighter than conventional noise barriers and can be constructed more easily. In fact, the construction of a sonic crystal noise barrier can be carried out with the same equipment used to install service poles for communication lines, by introducing the logs into the ground at a certain depth. The proposed solution can thus be seen as a technologically simple and sustainable solution, with high potential in traffic noise mitigation. Finally, this type of noise barrier can use less material and be cost-competitive, presenting a certain level of transparency and low visual impact. In addition, they can be adequately tuned by correctly placing diffusers to control the sound attenuation properties for different situations. For this reason, this type of technology can also be adapted to other acoustic sources, as changing the arrangement, dimensions, and geometry of the barrier can attenuate different frequency bands. Despite the excellent properties of this type of barrier, the use of sonic crystals as noise barriers is still struggling to spread. In fact, real-world scenarios require a tribute in terms of space usage (which is not always obtainable), as the area required for the installation of such structures is higher than that required for a conventional noise barrier. In addition, in practical cases where sonic crystals have been installed on the sides of the road, it has been observed that these structures can accumulate a lot of dirt between the cylinders during their normal use. In order to preserve hygiene and their effectiveness, therefore, constant cleaning is required, which represents an increase in maintenance costs.

A further problem related to the actual functioning of this type of barrier is represented by the effective mitigation area behind them. In fact, all the studied experiments were performed near the barrier, while studies are needed to demonstrate how sonic crystals can be effective at greater distances. In order to expand the mitigation area to residential distances, it may be necessary to increase the cylinder's height, but this would imply to strengthen foundations and increase production and installation costs. Therefore, this solution deserves further investigation in future research. In this regard, it is worth mentioning the work of Hsiao Mun Lee et al. [25], where sound barrier walls made of sonic crystals were used to create a maze in a children's playground, while other studies have even analyzed how entire trees can attenuate noise if properly distributed in space [26].

Bibliografia

- [1] Muzet, A. Environmental noise, sleep and health. *Sleep Med. Rev.* 2007, 11, 135-142..
- [2] Babisch, W. Road traffic noise and cardiovascular risk. *Noise Health* 2008, 10, 27.
- [3] De Kluizenaar, Y.; Janssen, S.A.; van Lenthe, F.J.; Miedema, H.M.; Mackenbach, J.P. Long-term road traffic noise exposure is associated with an increase in morning tiredness. *J. Acoust. Soc. Am.* 2009, 126, 626-633.
- [4] Chetoni, M.; Ascari, E.; Bianco, F.; Fredianelli, L.; Licitra, G.; Cori, L. Global noise score indicator for classroom evaluation of acoustic performances. in LIFE GIOCONDA project. *Noise Mapp.* 2016, 3.
- [5] Licitra, G.; Moro, A.; Teti, L.; Del Pizzo, A.; Bianco, F. Modelling of acoustic ageing of rubberized pavements. *Appl. Acoust.* 2019, 146, 237-245.
- [6] Nilsson ME, Andéhn M, Lešna P. Evaluating roadside noise barriers using an annoyance- reduction criterion. *J Acoust Soc Am* 2008;124(6):3561-7.
- [7] Watts GR, Godfrey NS. Effects on roadside noise levels of sound absorptive materials in noise barriers. *Appl Acoust* 1999;58(4):385-402.
- [8] Garai, M.; Guidorzi, P. European methodology for testing the airborne sound insulation characteristics of noise barriers in situ: Experimental verification and comparison with laboratory data. *J. Acoust. Soc. Am.* 2000, 108, 1054-1067.
- [9] Mir, F.; Saadatzi, M.; Ahmed, R.U.; Banerjee, S. Acoustoelastic MetaWall noise barriers for industrial application with simultaneous energy harvesting capability. *Appl. Acoust.* 2018, 139, 282-292.
- [10] Lee, J.; Kim, J.; Park, T.; Chang, S.; Kim, I. Reduction Effects of Shaped Noise Barrier for Reflected Sound. *J. Civ. Environ. Eng.* 2015, 5, 1.
- [11] Suslick, K.S.; Crum, L.A.; Crocker, M.J. *Encyclopedia of Acoustics*; John Wiley & Sons: Crocker, MJ, USA, 1997;pp. 271-282.
- [12] Morandi, F., Miniaci, M., Marzani, A., Barbaresi, L., & Garai, M. (2016). Standardised acoustic characterisation of sonic crystals noise barriers: Sound insulation and reflection properties. *Applied Acoustics*, 114, 294-306.
- [13] Morandi, F., Miniaci, M., Guidorzi, P., Marzani, A., & Garai, M. (2015). Acoustic measurements on a sonic crystals barrier. *Energy Procedia*, 78, 134-139.

- [14] Godinho, L.; Santos, P.G.; Amado-Mendes, P.; Pereira, A.; Martins, M. Experimental and numerical analysis of sustainable sonic crystal barriers based on timber logs. In Proceedings of the EuroRegio2016, Porto, Portugal, 13-15 June 2016.
- [15] Fredianelli, L., Del Pizzo, L. G., & Licitra, G. (2019). Recent developments in sonic crystals as barriers for road traffic noise mitigation. *Environments*, 6(2), 14.
- [16] R. Picó, V.J. Sánchez-Morcillo, I. Pérez-Arjona, K. Staliunas; Spatial filtering of sound beams by sonic crystals. *Applied Acoustics* Volume 73, Issue 4, April 2012, Pages 302-306.
- [17] Morandi, F.; Marzani, A.; De Cesaris, S.; Barbaresi, L.; Garai, M. Sonic crystals as tunable noise barriers. *Riv. Ital. Acust.* 2017, 40, 1-19.
- [18] García-Chocano, V.M.; Sánchez-Dehesa, J. Optimum attenuation of broadband noise by sonic crystals made of recycled materials, *Appl. Acoustics*, vol. 74 (1), 2013, pp. 58-62.
- [19] Hsu J.-C. Local resonances-induced low-frequency band gaps in two-dimensional phononic crystal slabs with periodic stepped resonators. *J Phys D: Appl Phys* 2011;44(5):055401.
- [20] Li, X.F.; Ni, X.; Feng, L.; Lu, M.H.; He, C.; Chen, Y.F. Tunable unidirectional sound propagation through a sonic-crystal-based acoustic diode. *Phys. Rev. Lett.* 2011, 106, 084301.
- [21] Chong, Y. Sonic Crystal Noise Barriers. Ph.D. Thesis, The Open University, Milton Keynes, UK, 2012.
- [22] Santos, P.; Carbajo, J.; Rui, D.; Godinho, L.; Mendes, P.A.; Soriano, J.R. Insertion loss provided by sonic crystal type barrier – Experimental and numerical evaluation on a reduced scale model. In Proceedings of the 45_ Congreso Espanol de Acustica, Murcia, Spain, 29-31, 48-51, 63-64, October 2014.
- [23] Koussa, F.; Defrance, J.; Jean, P.; Blanc-Benon, P. Acoustical efficiency of a sonic crystal assisted noise barrier, *Acta Acustica united with Acustica*, 99, 2013, pp. 399-409.
- [24] Can A, Leclercq L, Lelong J., Botteldooren D. Traffic noise spectrum analysis: dynamic modeling vs. experimental observations. *Appl Acoust* 2010; 71(8):764-70.
- [25] Mohapatra K.; Jena D.P.; Insertion loss of sonic crystal made with multi resonant shells, *Applied Acoustics* 171 (2021) 107676.
- [26] Hsiao Mun Lee; Kian Meng Lim; Heow Pueh Lee; A maze structure for sound attenuation. *Applied Acoustics* 115 (2017) 88-92.
- [27] Martinez-Sala, R.; Rubio, C.; Garcia-Raffi, L.M.; Sanchez-Perez, J.V.; Sanchez-Perez, E.A.; Llinares, J. Control of noise by trees arranged like sonic crystals. *J. Sound Vib.*, 291(100), 2006