

INTRODUZIONE AI METAMATERIALI ACUSTICI

di

* Prof. Massimo Garai – Università di Bologna

Introduzione

Fin dall'antichità gli esseri umani hanno cercato in natura i materiali più adatti per ogni specifico utilizzo; per esempio, il legno è stato impiegato per secoli come materiale da costruzione per le sue ottime caratteristiche strutturali. In seguito si è cercato di combinare materiali diversi per ottenere compositi che avessero caratteristiche migliori di quelle dei singoli materiali componenti; ne sono esempi il cemento armato e i compositi per rinforzo strutturale. In questi ultimi anni si sta affermando un nuovo paradigma concettuale che sta rivoluzionando il settore dei materiali nel suo complesso: è la rivoluzione dei metamateriali.

Innanzitutto, cerchiamo di spiegare il termine di nuovo conio “metamateriale”: è costituito dalla parola “materiale” con il prefisso “meta”, dal greco antico “μετά” che significa “oltre”; i metamateriali cioè avrebbero proprietà che “vanno oltre” quelle dei materiali naturali o delle loro combinazioni, permettendo di manipolare le onde (elettromagnetiche, ottiche, meccaniche, acustiche) ben oltre quello che si è fatto finora. Ciò è ottenuto senza agire a livello microscopico, come invece si fa nella pratica industriale corrente. Infatti, attualmente quando non si trova un materiale naturale adatto ad un certo scopo, si usano reazioni chimiche per produrre un composto con una nuova struttura a livello molecolare. Oppure si agisce a livello fisico con processi meccanici e termici, che comunque alterano la struttura microscopica dei materiali e richiedono attrezzature apposite, en-

ergia e denaro. In ogni caso, tutti questi processi rimangono dipendenti dalle proprietà delle materie prime lavorate.

Invece, i metamateriali possono essere creati a partire da materie prime comuni (metallo, plastica, legno ecc.) senza costosi processi di trasformazione fisico-chimica. Si parte da un materiale ordinario e si creano strutture ordinate secondo schemi matematici precisi, costituite dalla disposizione periodica di unità di base a una scala che sia minore o uguale a quella delle onde che si vogliono manipolare; per l'acustica si tratta di una scala che può andare da alcuni decimi di millimetro ad alcuni centimetri. Le leggi matematiche sottostanti a queste strutture producono proprietà fisiche straordinarie (elettromagnetiche, ottiche, meccaniche, acustiche), che vanno oltre le proprietà dei materiali naturali di partenza. Proprio nella struttura risiede il segreto dei metamateriali. Non importa quale sia il materiale di base, perché le proprietà emergenti del metamateriale sono date dalla sua organizzazione strutturale.

In questa nota introduttiva ci occuperemo solo dei metamateriali acustici; questi sono stati studiati in maniera sistematica nell'ultima trentina d'anni, ma ne esistono esempi precedenti, inventati quando ancora il termine metamateriale non era in uso: si pensi ai diffusori di Schröder, che hanno una forma studiata per diffondere in più direzioni l'energia sonora incidente su di essi senza assorbirla (o quasi), indipendentemente dal materiale di base (legno, gesso, plastica ecc.) con il quale sono realizzati (figura 1).

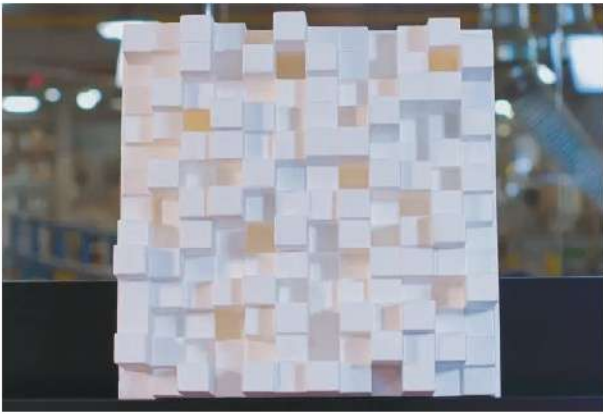


fig. 1 - Diffusore di Schröder “Skyline® G768” in gesso rinforzato con fibre di vetro (dal sito web di RPG Acoustical Systems LLC [1]).

Cristalli sonici

In questo settore in rapidissima espansione, si usa parlare di cristalli sonici (sonic crystals) quando la lunghezza caratteristica della loro struttura, a , è comparabile con la lunghezza d'onda del suono incidente, λ : $a \sim \lambda$. Si parla invece di metamateriali veri e propri quando la lunghezza caratteristica della loro struttura è molto minore della lunghezza d'onda: $a \ll \lambda$. Il più citato esempio di cristallo sonico è la scultura realizzata da Eusebio Sempère per la Fundación Juan March a Madrid, la quale produce una chiara attenuazione del suono in alcune bande di frequenza, come dimostrato da Martínez-Sala e colleghi in un famoso articolo pubblicato su Nature nel 1995 (figura 2, da [2]).

In realtà, questo non è il miglior esempio possibile di cristallo sonico, perché la scultura non è completamente periodica ed ha dimensioni finite. Comunque è utile per illustrare il principio su cui si basa l'attenuazione del suono nei cristalli sonici, che è noto come scattering di Bragg, originariamente scoperto con la diffusione dei raggi X nei cristalli (da cui il nome di cristalli sonici dato a strutture tipo la scultura di Sempère); vedere figura 3. Le onde sonore (rappresentate dalle frecce rosse) incidono su di una schiera regolare di cilindri (visti in pianta in figura 3) e subiscono una diffusione da ognuno di essi. Detti a la distanza tra due cilindri adiacenti e θ l'angolo di incidenza delle onde sonore, si ha interferenza costruttiva in riflessione tra due onde quando:

$$n\lambda = 2a \cdot \sin\theta \quad (1)$$

Questo provoca il ritorno di gran parte dell'energia sonora verso la sorgente e quindi l'attenuazione del suono che attraversa la schiera di cilindri alla lunghezza d'onda data. Ciò accade

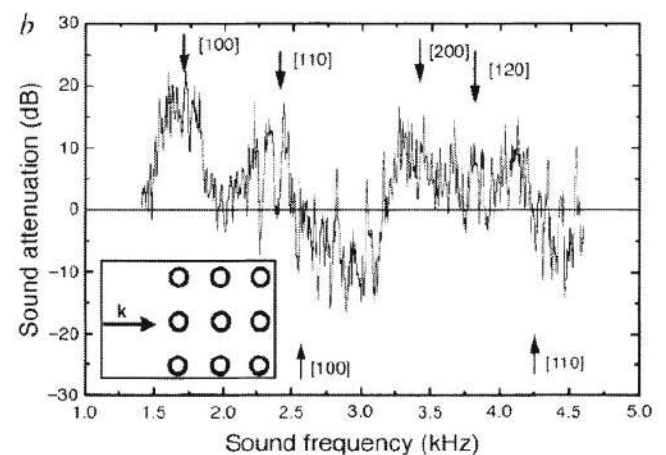


fig. 2 - A sinistra: “Órgano”, scultura cinemática di E. Sempère, Fundación Juan March, Madrid. A destra: Attenuazione del suono attraverso la scultura in funzione della frequenza (da [2]).

per tutte le frequenze tali che, indicando con c la velocità del suono in aria:

$$f_n = \frac{c}{\lambda} = n \frac{c}{2a \cdot \sin\theta} \quad (2)$$

Si determinano cioè delle *stop band* in frequenza nelle quali la trasmissione del suono attraverso la schiera di cilindri è impedita, benché i cilindri siano ben separati tra loro, mentre è forte la riflessione dal lato della sorgente sonora (figura 4). Occorre notare che le stop band non coprono l'intero intervallo delle frequenze udibili e che quindi a certe frequenze il suono passa attraverso il cristallo sonico senza rilevante attenuazione. Inoltre, le stop band possono essere parziali, cioè verificarsi solo per certe direzioni, o complete. Per questo è stato proposto da

più ricercatori di incrementare l'attenuazione aggiungendo altri effetti, basati su risonanze di Helmholtz ottenute forando ogni singolo cilindro, rivestimenti con materiali porosi, creazione di lacune locali nella schiera, ecc. [4], [5].

Data la selettività in frequenza dell'attenuazione sonora ottenibile, attualmente i cristalli sonici sono usati soprattutto come barriere antirumore per macchinari industriali che emettono energia sonora in specifiche bande di frequenza, sulle quali le stop band possono essere accordate (trasformatori, valvole per fluidi industriali, motori elettrici, ecc.), ma le potenziali applicazioni pratiche su larga scala sono ben maggiori. Per esempio, cristalli sonici ben progettati potrebbero in molti casi sostituire le barriere acustiche convenzionali con vantaggi sia economici

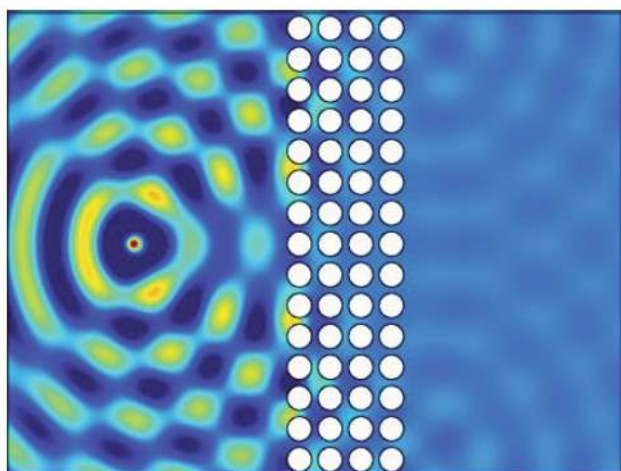
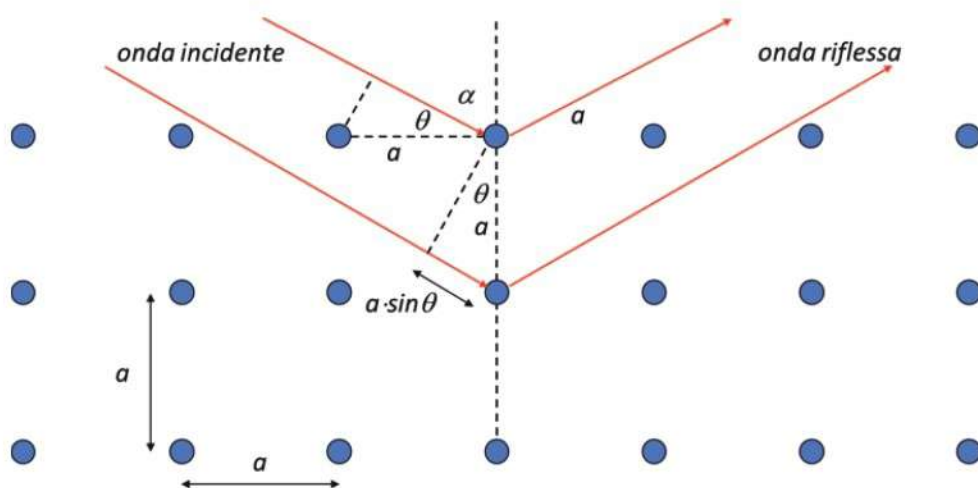


fig. 3 - Illustrazione schematica dello scattering di Bragg da parte di una schiera di cilindri disposti con simmetria quadrata. a è la distanza tra due cilindri adiacenti. θ è l'angolo di incidenza delle onde sonore.

fig. 4 - Simulazione della stop band a 858 Hz da parte di una schiera di cilindri disposti con simmetria quadrata in quattro file. La sorgente sonora è a sinistra (per una trattazione più approfondita si veda [3]).

che estetici. Infatti i cristalli sonici sono strutture più leggere delle barriere convenzionali, e quindi permettono un grande risparmio sulle fondazioni; inoltre, permettono ad aria e luce di passare liberamente, riducendo di molto l'impatto visivo. In teoria un uso mirato di barriere in cristalli sonici sulle infrastrutture di trasporto autostradale e ferroviario permetterebbe consistenti risparmi economici e una migliore accettazione da parte dei cittadini, in tanti casi nei quali è sufficiente un'attenuazione moderata.

Metamateriali sub-wavelength

Si può andare molto oltre le prestazioni dei cristalli sonici utilizzando strutture molto piccole rispetto alla lunghezza d'onda del suono (sub-wavelength) che combinate tra loro danno luogo a prestazioni fuori dal comune. In analogia alle sorprendenti scoperte nel campo delle onde elettromagnetiche, che per brevità qui tralascieremo, si può pensare di manipolare le onde acustiche con insiemi di elementi base, singolarmente detti celle unitarie o meta-atomi, aventi dimensioni caratteristiche che vanno da pochi millimetri a qualche decina di millimetri. Questi elementi base sono spesso prodotti con tecniche di additive manufacturing (stampa in 3D) a partire dal modello CAD. Il piccolo risonatore "arrotolato" (coiled up) descritto in [6], è un esempio di meta-atomo che, seppur realizzato in materiale plastico (PLA), presenta una serie di picchi di assorbimento acustico (figura 5).

Anche ognuno dei 25 risonatori di Helmholtz in figura 6 produce un picco di risonanza, ma l'insieme dei 25 risonatori produce una curva di assorbimento a banda larga ben difficilmente ottenibile su tutte queste frequenze e in uno spessore di soli 50 mm con i materiali acustici convenzionali.

Nei metamateriali sub-wavelength vengono ingegnosamente sfruttati effetti di risonanza di cavità o di membrana, spesso trascurati nelle applicazioni convenzionali che solitamente privilegiano i materiali porosi. Ciò comporta il controllo accurato di effetti reattivi, nei quali entra in gioco la parte immaginaria dell'impedenza acustica, per ottenere le prestazioni vo-

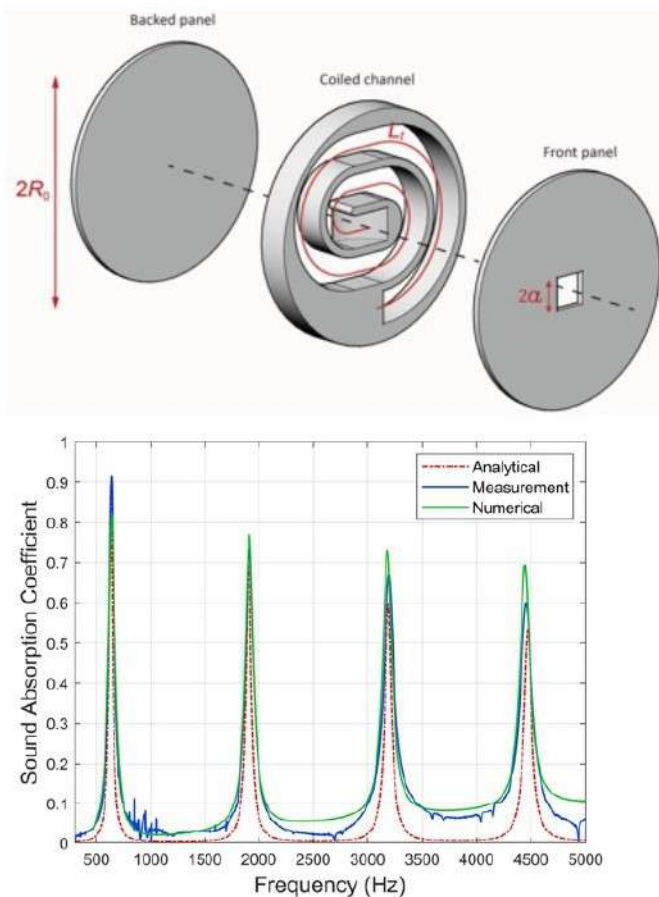


fig. 5 - Risonatore coiled up e relative curve di assorbimento acustico (da [6]). $R_0 = 19,5 \text{ mm}$, $a = 2,8 \text{ mm}$, $L_t = 133,1 \text{ mm}$.

lute, e per questo è necessaria una trattazione analitica è più complessa di quella normalmente in uso. In realtà, i metamateriali acustici derivano per analogia dai metamateriali elettromagnetici, che sono nati dall'idea di considerare permittività elettrica e permeabilità magnetiche a valori negativi. Di conseguenza, nel trattare i metamateriali acustici si considerano modulo elastico e densità come grandezze a valori complessi e funzioni della frequenza; i comportamenti inusuali dei metamateriali emergono proprio quando queste proprietà assumono valori negativi o immaginari puri. Ma è proprio la padronanza di questa maggiore complessità analitica che apre la strada alla progettazione a tavolino di effetti non convenzionali, come l'assorbimento acustico elevatissimo in precise bande di frequenza appena visto, o un buon isolamento acustico con strutture leggerissime. Per esempio, la membrana sottile a quattro strati di figura 7 presenta un potere fonoisolante mag-

giore o uguale a 40 dB nell'intervallo da 50 Hz a 1000 Hz (curva viola a destra) con una massa areica di soli 15 kg/m² in uno spessore complessivo di 15 mm [8].

Sempre in tema di isolamento acustico, sono allo studio finestre che lascino passare l'aria per ventilazione naturale come se fossero aperte pur attenuando il rumore come se fossero chiuse. Dunque si ottiene un evidente risparmio energetico, perché si evita l'uso del condizionatore, senza rinunciare al comfort termico. Questo è possibile grazie all'uso accorto di metamateriali acustici che attenuano il rumore lungo i percorsi del flusso d'aria. La figura 8 mostra un prototipo, tratto da [9].

I metamateriali possono migliorare anche le prestazioni di oggetti d'uso quotidiano. Per esempio, nel settore dell'elettroacustica, una nota azienda produttrice di diffusori acustici ha brevettato una sorgente sonora che include un metamateriale a due strati, costituito da due dischi in plastica con 15 canali a $\lambda/4$ ognuno, risonanti su diverse lunghezze d'onda (figura 9, da [10]). La combinazione delle risonanze di tutti i canali produce un forte assorbimento acustico su di un ampio intervallo di frequenze, studiato per eliminare le distorsioni in alta frequenza non eliminabili con sistemi tradizionali e generare un suono particolarmente pulito. Il tutto senza l'uso di materiali porosi.

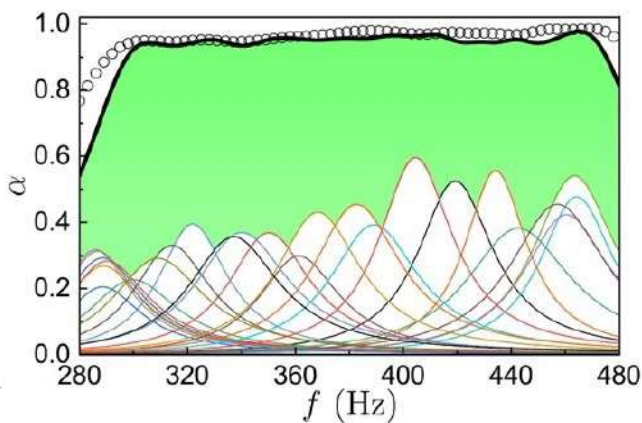
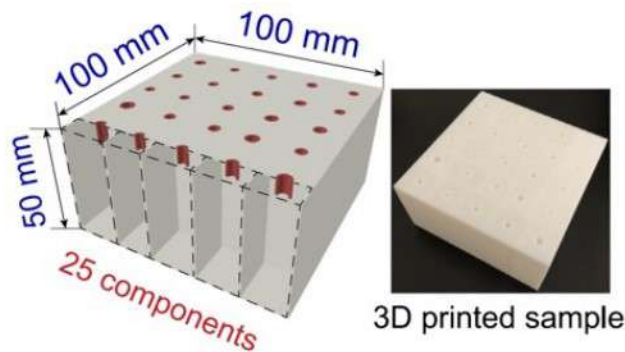


fig. 6 - In alto: risonatore multiplo composto da 25 unità base. In basso: curve di assorbimento acustico; in basso per i singoli risonatori, in alto curva complessiva calcolata (tratto continuo) e misurata (cerchietti bianchi). Da [7].

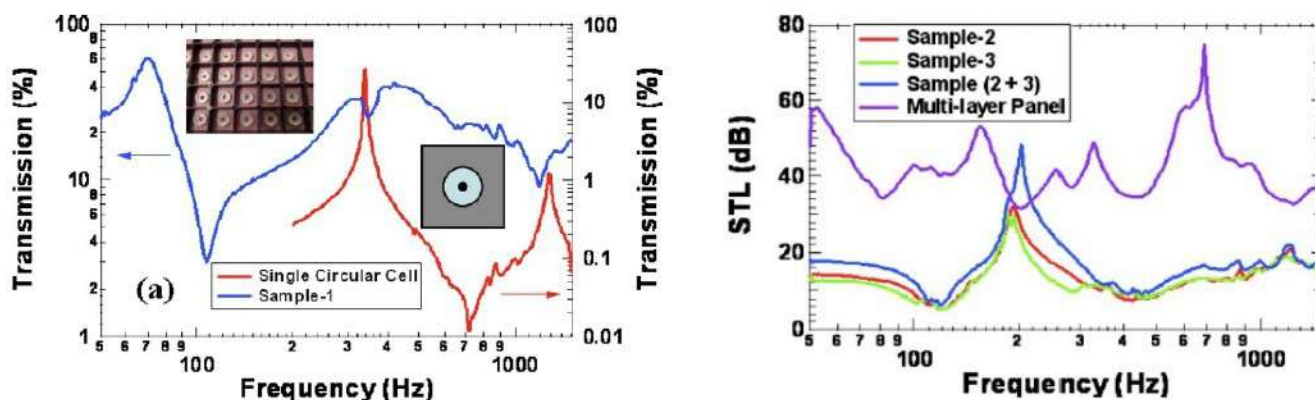


fig. 7 - A sinistra: membrana sottile e curva del fattore di trasmissione. A destra: curve di potere fonoisolante per due strati singoli (curve rossa e verde), per uno strato doppio (curva blu) e per quattro strati combinati (curva viola). Da [8].

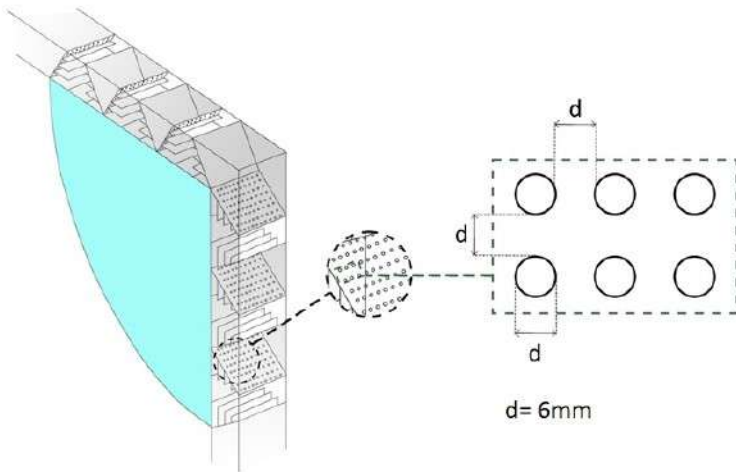


fig. 8 - Prototipo di finestra con una cornice dotata di condotti trattati con metamateriali per ottenere contemporaneamente ventilazione naturale e attenuazione sonora, da [9].

Applicazioni esotiche dei metamateriali

Si potrebbero citare molti altri studi pionieristici che sfruttano le insolite potenzialità dei metamateriali acustici. Per esempio sono stati proposti metamateriali che riflettono il suono solo in direzioni predefinite [11]; se applicati alle barriere acustiche, potrebbero riflettere il suono verso il basso, limitando lo scavalco per diffrazione e migliorando di conseguenza l'insertion loss.

Sono anche stati realizzati prototipi di piastre opportunamente sagomate che imprigionano l'energia delle onde elastiche in piccole regioni confinate dalle quali non esce più (i cosiddetti acoustic black holes [12]). Se si accoppia la zona di confinamento con un materiale ad alto smorzamento, si diminuisce notevolmente l'energia di vibrazione delle piastre e di conseguenza l'irradiazione sonora, migliorando di conseguenza l'isolamento acustico.

Ma forse l'idea più futuristica è quella dell'occultamento acustico (acoustical cloaking): si tratterebbe di nascondere un oggetto alle onde acustiche semplicemente ricoprendolo con una sottile membrana in metamateriale, cioè una metasuperficie: l'applicazione all'occultamento di oggetti dalla rilevazione sonar è evidente. La figura 10, tratta da [13], mostra l'effetto atteso da una particolare metasuperficie che nasconde un rilievo triangolare, un tipico oggetto di riferimento solitamente usato per provare l'occultamento acustico.

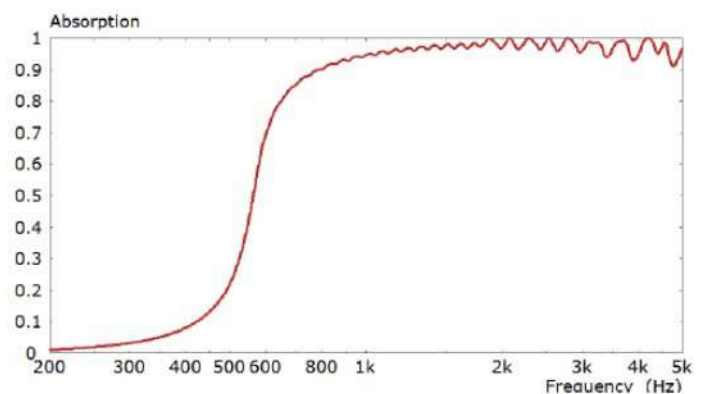


fig. 9 - A sinistra: assorbitore acustico a 15+15 canali a $\lambda/4$. A destra: curva di assorbimento acustico globale. Dal sito web [10].

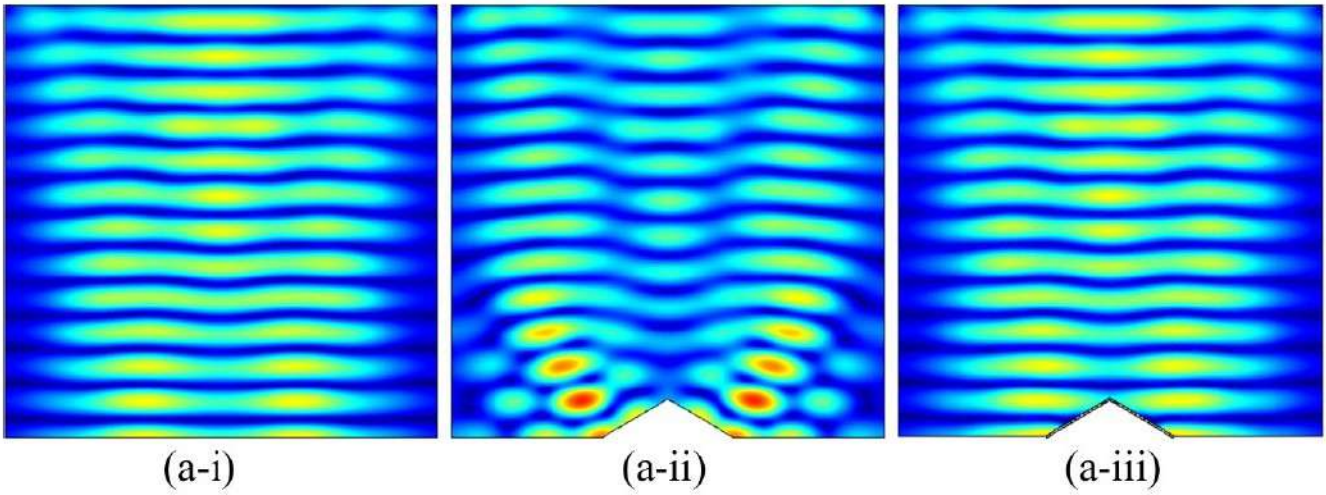


fig. 10 - Da sinistra a destra: (a-i) onda acustica a 1082 Hz incidente su di una superficie piana e compatta; (a-ii) la stessa onda incidente su di un rilievo triangolare; la riflessione dal rilievo perturba il campo sonoro e rivela l'oggetto; (a-iii) la stessa onda incidente sul rilievo triangolare ricoperto da una metasuperficie occultante: il campo risulta praticamente uguale a quello in assenza di rilievo, il quale risulta quindi "invisibile" all'onda sonora. Da [13].

Metamateriali a grande scala

Concludiamo questa breve introduzione ai metamateriali acustici con un'applicazione che è attualmente molto studiata per i potenziali grandi benefici nel settore delle fondazioni antisismiche. Infatti, il principio base dei metamateriali, e cioè la combinazione di strutture periodiche calcolate per dare un'attenuazione eccezionale in specifici range di frequenza di un campo ondulatorio, è possibile anche a una scala comparabile con quella delle onde sismiche. Secondo un recente studio di Gupta et al. [14], è possibile progettare fondazioni per edifici costituite da metamateriali periodici in 2D aventi stop band per l'attenuazione delle onde sismiche nell'intervallo tra 2 Hz e 8 Hz, dove si concentra la maggior parte dell'energia di queste onde distruttive. La figura 11 riporta un esempio di struttura in acciaio (con frequenza naturale a 4,5 Hz) posta su due diverse fondazioni, l'una realizzata con un metamateriale costituito da strati periodici di acciaio e piombo affogati in una matrice elastica, l'altra realizzata semplice-

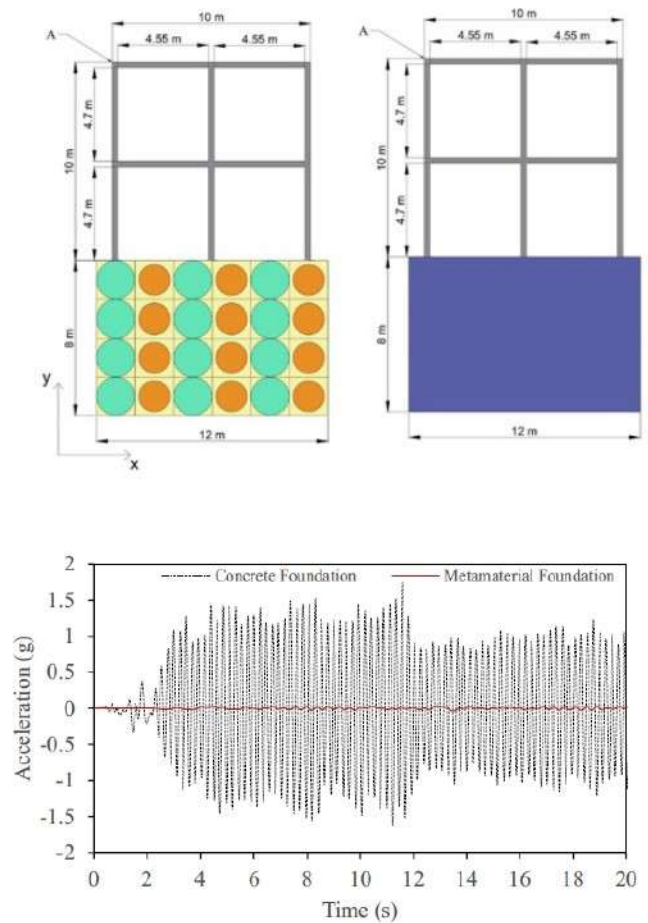


fig. 11 - Dall'alto in basso: (a) struttura in acciaio su fondazione in metamateriale; (b) struttura in acciaio su fondazione in calcestruzzo; (c) risposte nel tempo delle due strutture, nel punto A, al terremoto della Imperial Valley (1940): curva nera tratteggiata per la fondazione in calcestruzzo, curva rossa continua per la fondazione in metamateriale. Da [14].

mente in calcestruzzo. La stessa figura 11 riporta anche la simulazione numerica nei due casi della risposta alle onde registrate in occasione del terremoto della Imperial Valley (USA 1940, magnitudo 6,95, picco di accelerazione 0,2107 g). La miglior prestazione della fondazione in metamateriale non ha bisogno di commenti.

Conclusioni

Con i metamateriali anche in acustica, è esplosa l'era dei materiali "ingegnerizzati": si sta passando dall'uso delle proprietà che i materiali convenzionali, reperibili in natura o prodotti con tecniche tradizionali, potevano offrire al progetto di (meta-)strutture che abbiano le proprietà desiderate indipendentemente o quasi dai materiali costituenti. Si è scoperto infatti che è possibile manipolare le onde acustiche, sia in aria che nei mezzi solidi, controllando la struttura fine dei metamateriali, qualunque sia la materia prima costituente. Si tratta di assemblare secondo simmetrie predeterminate unità di base che collettivamente esibiscono effetti straordinari. Quindi lo spettro delle possibilità a disposizione degli acustici si è ampliato enormemente, ma è richiesta una maggiore padronanza degli strumenti analitici e numerici necessari per progettare i metamateriali.

I progressi in questo campo sono continui e molto rapidi; la letteratura scientifica si sta moltiplicando in maniera esponenziale: ciò è indice del fatto che ci sono enormi potenzialità e quindi l'impatto sulla nostra vita quotidiana sarà notevole. Siamo appena agli inizi di un radicale cambio di prospettiva nel campo dei materiali acustici. **E**

* Prof. Massimo Garai

Professore ordinario presso il Dipartimento di Ingegneria Industriale dell'Università di Bologna.

Presidente della Commissione Acustica e Vibrazioni dell'UNI.

Coordinatore del CEN/TC 256/SC 1/WG 40 e del CEN/TC226/WG6.

Tecnico competente in acustica secondo la Legge 447/95 e certificato al livello 3 (massimo) dal CICPND.

Bibliografia

1. <https://www.rpgacoustic.com/> (visitato 12/02/2023)
2. R. Martínez-Sala, J. Sancho, J. V. Sánchez, V. Gómez, J. Llinares, F. Meseguer. Sound attenuation by sculpture. *Nature* 378, 241 (1995). <https://doi.org/10.1038/378241a0>
3. 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, 294-306 (2016). <https://dx.doi.org/10.1016/j.apacoust.2016.07.028>.
4. D. P. Elford, L. Chalmers, F. V. Kusmartsev, G. M. Swallowe. Matryoshka locally resonant sonic crystal. *Journal of the Acoustical Society of America* 130, 2746 (2011). <https://doi.org/10.1121/1.3643818>.
5. V. Romero-García, J. V. Sánchez-Pérez. Hole distribution in phononic crystals: Design and optimization. *Journal of the Acoustical Society of America* 125, 3774 (2009). <https://doi.org/10.1121/1.3126948>.
6. M. Cingolani, G. Fusaro, G. Fratoni, M. Garai. Influence of thermal deformations on sound absorption of three-dimensional printed metamaterials. *Journal of the Acoustical Society of America*, 151(6), 3770-3779, (2022). <https://doi.org/10.1121/10.0011552>.
7. S. Huang, Z. Zhou, D. Li, T. Liu, X. Wang, J. Zhu, Y. Li. Compact broadband acoustic sink with coherently coupled weak resonances. *Science Bulletin*, 65, 373-379 (2020). <https://doi.org/10.1016/j.scib.2019.11.008>.
8. Z. Yang, H. M. Dai, N. H. Chan, G. C. Ma, P. Sheng. Acoustic metamaterial panels for sound attenuation in the 50–1000 Hz regime. *Applied Physics Letters* 96, 041906 (2010). <https://doi.org/10.1063/1.3299007>.
9. G. Fusaro, M. Garai, J. Kang. Broadband potential optimisation of a full scale acoustic metawindow performance. *Proceedings of the Inter-Noise 2022; Glasgow (UK)* (2022).
10. KEF. LS50 Meta & LS50 Wireless II White paper. From <https://eu.kef.com>.
11. X. Wang, D. Mao, W. Yu, Z. Jiang. Sound barriers from materials of inhomogeneous impedance. *Journal of the Acoustical Society of America* 137(6), 3190-3197(2015).
12. A. Pelat, F. Gautier, S. C. Conlon, F. Semperlotti. The acoustic black hole: A review of theory and applications. *Journal of Sound and Vibration*, 476, 115316 (2020). <https://doi.org/10.1016/j.jsv.2020.115316>.
13. H. Esfahlani, S. Karkar, H. Lissek. Acoustic carpet cloak based on an ultrathin metasurface. *Physical Review B* 94, 014302 (2016).
14. A. Gupta, R. Sharma, A. Thakur, P. Gulia. Metamaterial foundation for seismic wave attenuation for low and wide frequency band. *Scientific Reports* 13, 2293 (2023). <https://doi.org/10.1038/s41598-023-27678-1>.