

Sviluppo di una finestra metamateriale con ventilazione e attenuazione acustica ottimizzata

Gioia Fusaro

Department of Industrial Engineering,
University of Bologna,
Viale Risorgimento, 2, 40136 Bologna
gioia.fusaro@unibo.it

Ricevuto: 27/2/2023

Accettato: 5/9/2023

DOI: 10.3280/ria2-2023oa15499

ISSN: 2385-2615

La riduzione del rumore è un fattore fondamentale riguardo al comfort abitativo ed all'efficienza architettonica ed ingegneristica. Nella maggior parte dei casi, le persone che occupano gli edifici sono forzate a scegliere tra un ambiente ventilato naturalmente e uno silenzioso. D'altra parte, i metamateriali acustici (AMMs) hanno recentemente trovato interessanti applicazioni nelle condotte di ventilazione coniugando innovazione e sostenibilità. Precedenti studi dell'autrice hanno dimostrato che le finestre basate sui AMMs riescono a coniugare ventilazione naturale e attenuazione del rumore in entrata in modo ergonomico (cioè con una forma ottimizzata per l'utilizzo da parte dell'utente finale); tuttavia, risultava particolarmente scarso l'effetto di attenuazione acustica alle frequenze più basse (50-350 Hz). Questo studio si propone quindi di implementare il modello precedente con una metafinestra acustica ed ergonomica a grandezza naturale (AMW). Il sistema metamateriale viene potenziato raddoppiando il volume di risonanza originale e accoppiandolo con un risonatore che agisce a $3/4$ della lunghezza d'onda. Secondo l'analisi parametrica numerica FEM (già validata in precedenti esperimenti) sulla percentuale di apertura dell'AMW (da 3 a 33%) il Transmission Loss (TL) relativo alla finestra è migliorato complessivamente del 70% sull'intervallo di frequenze da 50 a 350 Hz. Tali risultati incoraggiano l'uso di nuove finestre ergonomiche metamateriali al posto di quelle standard per ottenere sia la ventilazione naturale che l'attenuazione del rumore nello spettro principale dell'udito, essendo risorse per applicazioni domestiche, sanitarie e pubbliche.

Questo lavoro fa parte della tesi di dottorato dell'autrice condotta tra la Sheffield University (UK) e l'A*STAR – Institute of High Performance Computing (SG), la quale riporta una metodologia multidisciplinare per implementare la tecnologia dei metamateriali acustici (AMMs) nella progettazione di finestre che permettano contemporaneamente l'isolamento acustico e la ventilazione naturale. La tesi di dottorato include i risultati delle indagini in Scienze Sociali e Naturali, Ergonomiche, Numeriche, Analitiche e Sperimentali per sviluppare un prototipo di finestra in scala reale utilizzando i AMMs. La cosiddetta metafinestra acustica (AMW) consente una TL di 10-60 dB su un intervallo di frequenza significativo per l'udito umano (50-5000 Hz) in una configurazione aperta, pur consentendo una ventilazione naturale sufficiente. Inoltre, l'AMW ha dimostrato di avere un impatto positivo sull'ambiente interno dal punto di vista della percezione sia fisica che umana grazie alla sua natura ergonomica e psicoacustica. Questo progetto di dottorato ha aperto un nuovo campo di indagine sui AMMs che non si limita alla riduzione del rumore, ma include anche l'ottimizzazione degli stimoli acustici esterni verso un comfort interno più completo.

Parole chiave: metamateriali acustici, ergonomia, ventilazione naturale, isolamento acustico, psicoacustica

Development of a full scale metamaterial window with optimised ventilation and noise-reduction performance

Noise reduction is a key factor regarding indoor comfort and energy-smart Architecture and Engineering. In most cases, occupants of the building must choose between a naturally ventilated indoor environment or a quiet one. On the other side, acoustic metamaterials (AMMs) have recently found interesting applications in ventilation ducts by conjugating innovation and sustainability. Previous research conducted by the author has proved AMM-based windows to be a resourceful way to address both natural ventilation and reduce the incoming noise propagation ergonomically (i.e. with design which is optimised for the use of the final user); however, the effective spectral range lacked in the lower frequencies (50-350 Hz). This study aims, therefore to implement the previous model with an ergonomic full-scale acoustic metawindow (AMW). The metamaterial system is enhanced by doubling the original resonating volume and coupling it with a $3/4$ wavelength resonator. According to the parametric numerical FEM analysis (already assessed in previ-

ous experiments) over the opening ratio of the AMW (going from 3 to 33%) the TL related to the window is improved overall by 70% on the frequency range from 50 to 350 Hz. Such results encourage the use of new AMMs ergonomic windows in place of standard ones to achieve both natural ventilation and noise attenuation in the hearing main spectrum, being resourceful for domestic, sanitary, and public applications.

This work is part of the author's PhD thesis led between Sheffield University (UK) and the A*STAR – Institute of High Performance Computing (SG), which reports a multidisciplinary methodology to implement acoustic metamaterial (AMM) technology in window design to allow noise insulation and natural ventilation simultaneously. The PhD thesis includes results from Social and Natural Sciences, Ergonomic, Numerical, Analytical and Experimental investigations to draw a full-scale window prototype using AMMs. The so-called acoustic metawindow (AMW) allows TL of 10-60dB on a significant frequency range for human hearing (50-5000 Hz) in an open configuration while allowing sufficient natural ventilation. In addition, the AMW is proven to positively impact the indoor environment from both physical and human perception points of view, thanks to its ergonomic and psychoacoustic nature. This PhD project has opened a new AMMs field of investigation that is not limited to noise reduction but also includes outdoor acoustic stimuli optimisation towards a more comprehensive indoor comfort.

Keywords: acoustic metamaterials, ergonomics, natural ventilation, sound insulation, psychoacoustics

1 | Introduzione

L'isolamento acustico delle facciate è un problema frequentemente considerato disconnesso dalle tecniche per la ventilazione e termoregolazione negli edifici. Le strategie per controllare questi diversi sistemi sono state sviluppate con approcci completamente separati che coinvolgono le caratteristiche dell'edificio [1]. Le finestre tradizionali, ad esempio, consentono il collegamento visivo con l'esterno, la ventilazione naturale e, quando sono chiuse, il parziale isolamento acustico. Tuttavia, il funzionamento dei sistemi tradizionali limita l'utente alla scelta di una funzione a discapito dell'altra e, di conseguenza, del comfort abitativo interno [2-4]. Finora, i ricercatori hanno utilizzato diverse metodologie per superare entrambi i problemi utilizzando, ad esempio, la ventilazione meccanica [5], sistemi di controllo del rumore attivo o passivo [6-10]. Questi ultimi hanno il duplice vantaggio di consumare basse quantità di energia e di poter essere implementati direttamente all'interno della finestra in base alle loro caratteristiche, ad esempio con pannelli perforati o microperforati (MPP) [8,11,12], materiali porosi [13,14] o metamateriali acustici (o Acoustic Metamaterials, AMMs) [15-18].

I metamateriali sono una nuova tecnologia che negli ultimi 10 anni si è diffusa nell'ambito del controllo del rumore e possono essere definiti come sistemi compositi, le cui proprietà fisiche effettive (come la densità, il modulo di massa e l'impedenza effettivi) dipendono dalla struttura geometrica (e quindi dalle caratteristiche localmente risonanti, e direttamente dipendenti dalle sue caratteristiche geometriche) e non dal materiale costitutivo. Questa qualità permette di utilizzare i metamateriali anche in ambiti multi-fisici. I metamateriali per il controllo del rumore e della ventilazione sono tipicamente strutture simili a condotti con sistemi di risonanza incorporati

sui lati (ad esempio, metasuperfici e gabbie metamateriali) e sono nati per applicazioni meccaniche (insonorizzazione di motori endotermici) [19,20]. Negli ultimi decenni, i metamateriali acustici (AMM) sono stati utilizzati per affrontare problemi di ingegneria edilizia e di comfort interno, come la trasmissione del rumore e la ventilazione [2,21,22]. Sono stati progettati sistemi attivi e passivi per migliorare il comfort interno, ad esempio sistemi di ventilazione meccanica e di controllo attivo del rumore [23] o sistemi di schermatura (come negli alloggi delle tapparelle) [7]. Tuttavia, questi sistemi hanno incontrato alcune limitazioni in termini di requisiti energetici passivi, intervallo di frequenze a banda larga [24,25]. Inoltre è importante evidenziare come questi sistemi, per quanto innovativi, risultano difficilmente applicabili così come sono all'elemento infisso, avendo una scarsa implementazione ergonomica. Gli ultimi sviluppi della ricerca in discussione hanno mostrato un ampio miglioramento del design ergonomico della finestra implementata con AMMs [26-28]. I risultati mostrano aspetti positivi circa la ventilazione e riduzione del rumore in termini fisici e psicofisici (vedere Tabella 1), ma evidenziano limitazioni nelle frequenze più basse. Per questi motivi, è necessario studiare ulteriormente un design ideale di finestre basate su AMM per affrontare il controllo del rumore e la ventilazione naturale in un intervallo di frequenze più ampia.

Uno studio precedente ha esaminato le potenziali prestazioni di una metafinestra (AMW) attraverso 72 analisi parametriche condotte tramite simulazioni agli elementi finiti (FEM). [29]. I risultati hanno mostrato come una struttura AMM, controllando efficacemente lo spessore e l'altezza del telaio (T e H nella Figura 1a), può ottenere un'attenuazione del rumore e aumentare o ridurre il tempo di apertura senza dipendere da stimoli acustici esterni. Inoltre, lo studio precedente ha evidenziato che i modelli con T=7,5, 10, 15 e H=0,05-0,15 m

Tab. 1 – Descrizione delle fasi dell'approccio multi-disciplinare utilizzato nella tesi di dottorato da cui questo articolo è tratto
Description of the stages of the multi-disciplinary approach used in the doctoral thesis from which this article is taken

Metodo	Campo di validazione	Obiettivo
Analitico	Acustica, Vibro-acustica	Riproduzione e combinazione di metamateriali già esistenti per il controllo acustico e termico
Numerico	Acustica, Termo-acustica, Deformazione Termica e Fluido-dinamica	Ottimizzazione parametrica su specifici requisiti acustici/termici/di ventilazione
Sperimentale	Acustica, Termo-acustica, Deformazione Termica e Fluido-dinamica	Valutare il progetto finale ottimizzato numericamente
Ergonomico/ Percezione Umana	Psicoacustica, Soundscape, Stimolo Visivo	Valutare l'impatto del progetto finale sulla percezione umana e sulla funzione ergonomica

possono raggiungere valori significativi di TL con un tasso di ricambio d'aria ottimale in minuti (Air Change Rate in Minutes, ACRM), rendendo questo design adatto alla maggior parte delle funzioni pubbliche interne.

Questo studio mira ad ottimizzare le prestazioni di un progetto di una finestra basato su AMMs in scala reale, ampliando l'intervallo di frequenze di applicazione per includere l'intervallo 50-350 Hz, dove il modello precedente ha mostrato dei limiti. Il metodo di ottimizzazione in questione, si basa sulla configurazione spaziale definita da parametri geometrici, al fine di definire i valori ottimali con un approccio che tuttavia non presenta un'ottimizzazione non lineare tramite algoritmi (poiché le combinazioni dei vari parametri in gioco sono ancora relativamente poche, cioè 48 in totale). La caratterizzazione delle celle unitarie metamateriali (AMM) che costituiscono la finestra metamateriale (AMW), in relazione ad alcuni parametri geometrici, è stata dimostrata da precedenti studi parametrici [28]; tuttavia, questa configurazione originale non considerava il volume degli angoli incorporati nel telaio nell'unità successiva e nella AMW a scala reale. In questo studio, quindi, l'unità AMM è stata implementata attraverso una perforazione sui fianchi laterali (Figura 1b), che consente un aumento significativo del volume di risonanza accoppiato al resto del sistema AMW. Il metodo FEM è stato utilizzato per valutare l'ottimizzazione del TL di due diverse configurazioni perforate.

2 | Metodi

2.1 | Impostazioni geometriche e ottimizzazione della banda larga attraverso l'aumento del volume di risonanza

Come già realizzato in uno studio precedente per l'unità AMW [26], l'ottimizzazione acustica è stata studiata per il progetto AMW in scala reale. Nello studio di Fusaro et al. [26], so-

no state testate numericamente tre configurazioni di perforazione per l'unità AMW al fine di migliorare le prestazioni acustiche nell'intervallo di frequenze più basse. L'estensione del volume risonante attraverso la perforazione dei pannelli delle celle dell'unità AMM è stata studiata per raggiungere una risonanza che influisce sulla larghezza di banda a bassa frequenza. A titolo di confronto, sono state studiate tre configurazioni (configurazioni A, B e C) con diverse percentuali e disposizioni di perforazione e confrontate con le prestazioni TL del modello di telaio originale. Solo i lati interni degli angoli del telaio sono stati modificati di conseguenza con un rapporto di perforazione del 14% o del 7% (dove la percentuale è calcolata con il rapporto tra l'area dell'intero pannello interno e l'area perforata). Il diametro dei fori di perforazione è $d=6\times10^{-3}$ m. Questo parametro rappresenta anche la distanza tra ciascun foro di perforazione (vedi Figura 1b).

Poiché nello studio precedente le configurazioni B e C sono risultate le combinazioni di perforazione più efficaci all'interno dei pannelli dell'unità AMM, l'ottimizzazione dell'AMW in scala reale è stata studiata seguendo questi due approcci. La configurazione B prevede il 7% di perforazione sui pannelli appartenenti a 2/4 delle stesse unità AMM, mentre la configurazione C prevede il 7% di perforazione dell'area complessiva dei pannelli applicata a un pannello di ciascuna unità AMM. Per semplicità di rappresentazione dei risultati e poiché lo studio precedente ha dimostrato che $H=0,0-0,15$ m è ottimale per la riduzione del rumore e la ventilazione naturale [29], verranno testati solo questi modelli. Inoltre, poiché $H=0,15$ m è un modello di serramento piuttosto ingombrante e non

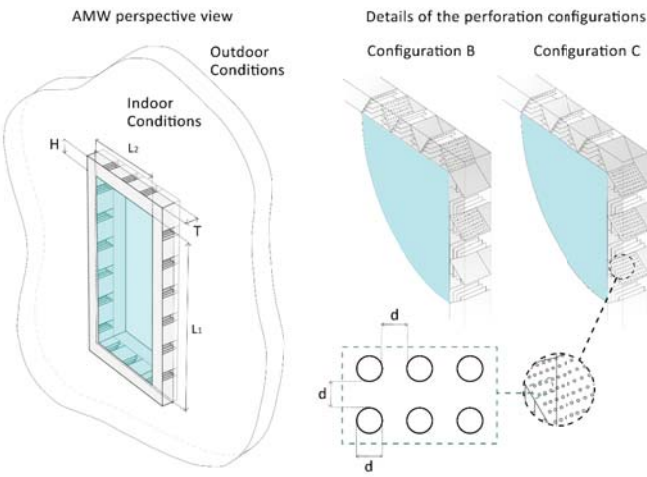


Fig. 1 – Schemi a) del sistema di apertura dell'AMW in scala reale e dei parametri studiati (altezza del telaio, H, e spessore, T) e parametri fissi (lunghezza $L_1=1.2$ m e larghezza $L_2=0.6$ m del pannello centrale trasparente); e b) dei dettagli delle configurazioni di perforazione B e C studiate in questo studio per ottimizzare l'efficacia alle basse frequenze. Diametro e distanza dei fori $d=6\times10^{-3}$ m

Schematics a) of the full-scale AMW aperture system and the studied parameters (frame height, H, and thickness, T) and fixed parameters (length $L_1=1.2$ m and width $L_2=0.6$ m of the central transparent panel); and b) of the details of the B and C perforation configurations studied in this study to optimise effectiveness at low frequencies. Diameter and distance of holes $d=6\times10^{-3}$ m

facilmente reperibile sul mercato, sarà ulteriormente escluso dall'indagine. Nelle configurazioni B e C, il volume risonante passa da $7.7 \times 10^{-4} \text{ m}^3$ ($H=0.05 \text{ m}$) a $30.8 \times 10^{-4} \text{ m}^3$ ($H=0.10 \text{ m}$), e i pannelli perforati all'interno della geometria dell'unità AMW sono posizionati in modo diverso per verificare anche in questo caso in scala reale se la posizione della perforazione è un parametro determinante per il TL dell'AMW. Come negli studi precedenti, lo spessore dei confini interni che compongono la geometria AMW è considerato trascurabile.

2.2 | Impostazione del modello FEM e condizioni al contorno

Il TL è qui calcolato attraverso il modello numerico, implementato utilizzando il software commerciale FEM Comsol Multiphysics. Gli elementi geometrici inclusi sono un confine sferico di 0,9 m di raggio, una divisione di 0,13 m al centro (che rappresenta la parete dell'edificio) e il sistema AMW collegato a un lato della divisione (vedere Figura 2). Le partizioni della sfera rappresentano gli ambienti interni ed esterni. Pertanto, la geometria di AMW è posizionata sulla "parete interna". La dimensione del pannello centrale trasparente dell'AMW è di $1,2 \times 0,6 \text{ m}$. L'onda di ingresso (modellata come campo di pressione di fondo e avente direzione di propagazione sferica) passa attraverso l'AMW e si irradia attraverso i fori di ventilazione distribuiti lungo la superficie delle unità AMM. Come illustrato nella Figura 2, per questo studio sono stati considerati pochi parametri.

Per l'indagine sulla banda larga acustica, le condizioni acustiche semi-infinite sono applicate sulle due superfici limite della sfera. Le condizioni di radiazione di onde sferiche libere sono applicate a tutta la geometria sferica. Le pareti di separazione e la geometria della AMW sono caratterizzate come confini interni rigidi per il suono. In questo studio, la trasmissione del suono attraverso le pareti dell'AMW e il possibile effetto viscoso-termico nei canali stretti del risonatore sono trascurati. Per quanto riguarda le perdite visco-termiche, infatti, il modello numerico è stato impostato per valutare la capacità minima di isolamento acustico del modello. Inoltre, il modello numerico è già stato validato in altri lavori pubblicati con un accordo positivo con i risultati sperimentali [26,30]. Il dominio 3D è riempito d'aria, dove si utilizzano la densità dell'aria e la velocità del suono a temperatura ambiente. Il confine esterno è caratterizzato da un campo di pressione di fondo diretto verso l'interno con un'ampiezza di pressione di 1 Pa e una velocità del suono di 343 m/s. Il TL è calcolato dalla riduzione della potenza sonora attraverso l'interfaccia del metamateriale (in dB). Per quanto riguarda la dimensione della maglia per lo studio 3D, questo modello risulta molto complesso e, poiché la convergenza dei risultati è dimostrata, è necessaria una semplificazione; quindi, la dimensione massima consentita degli elementi è di $343/6/2000=0,0286 \text{ m}$. Lo studio è un'analisi nel dominio della frequenza da 50 a 5000 Hz con un passo di 100 Hz. A causa dell'entità significative della geometria il passo di

frequenza scelto per questo studio è quello che ottimizza risultati in banda larga e tempi computazionali ragionevoli (per ogni configurazione che combini valori diversi di H, T e perforazione pannello B o C, ci vogliono dalle 24 alle 56 ore e in totale si hanno 48 combinazioni). Una volta che si sarà definito un range di H e T ottimali, si procederà ad una analisi più specifica anche in termini di passo di frequenza. Nei risultati, il TL è mostrato in modo lineare all'interno delle frequenze di simulazione (Figura 3).

Per avere una visione più globale dell'innovazione legata all'applicazione di una tecnologia metamateriale negli infissi, si è infine inclusa nelle stesse condizioni al contorno (sia geometriche che fisiche un esempio di finestra scorrevole standard. Tale finestra standard presenta una parte centrale con stessa superficie della AMW ($0.6 \times 1.2 \text{ m}$) e la cui apertura è stata regolata per ogni step dello studio parametrico, per far sì che fosse comparabile al modello metamateriale. Figura 2c presenta tale geometria con evidenziata in giallo il rapporto di superficie di apertura comparabile a quello della AMW.

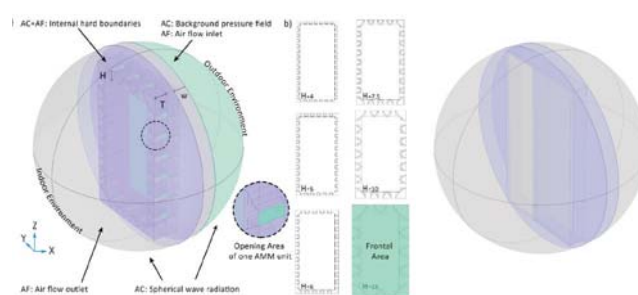


Fig. 2 – a) Rappresentazione 3D delle condizioni al contorno e dei parametri utilizzati negli studi di acustica (AC) e di flusso d'aria (AF). b) Sezione 2D di AMW per mostrare la variazione del parametro H. c) Rappresentazione 3D di una finestra a scorrimento standard con rapporto di superficie di apertura comparabile a quello della AMW

a) 3D representation of the boundary conditions and parameters used in the acoustic (AC) and airflow (AF) studies. b) 2D section of AMW to show the variation of parameter H. c) 3D representation of a standard sliding window with an opening surface ratio comparable to that of the AMW

3 | Risultati

La Figura 3 mostra un confronto tra i due grafici relativi al TL delle configurazioni B e C caratterizzate da $H=0,1 \text{ m}$ e $T=0,13 \text{ m}$ (a), $T=0,11 \text{ m}$ (b), $T=0,09 \text{ m}$ (c), $T=0,07 \text{ m}$ (d), $T=0,05 \text{ m}$ (e), $T=0,03 \text{ m}$ (f). Questi valori di T decrescenti rappresentano il meccanismo di chiusura dell'AMW.

In questo confronto schematico si può osservare l'aumento di efficacia del TL in relazione alla diminuzione dell'apertura della finestra. Complessivamente, B e C mostrano un TL elevato in tutto l'intervallo di frequenze (50-5000 Hz). L'analisi numerica determina un potenziale minimo di TL di 10 dB, particolarmente evidente per l'intervallo delle basse frequenze (50-500 Hz). Inoltre, confrontando le configurazioni ottimizzate (B e C) con l'RMS del TL originale su scala

reale (rappresentato nel grafico con la linea rossa), il TL è complessivamente migliorato su tutto l'intervallo delle frequenze in entrambi i casi. In particolare, la configurazione C mostra prestazioni migliori in quanto è inferiore all'AMW originale solo negli intervalli di frequenza di 1850-1900 Hz, mentre la configurazione B non ottimizza il TL a 1500-1600 Hz, 1850-1900 Hz, 3900-4100 Hz. La configurazione C crea una condizione di risonanza che ottimizza il sistema meglio di B. Questo probabilmente perché i pannelli perforati non sono accoppiati. Infatti, nella unità AMM della configurazione C sono presenti un pannello obliquo con cavità risonanti originale e uno con cavità e fori che permettono di raddoppiare il volume risonante (vedi Figura 1b).

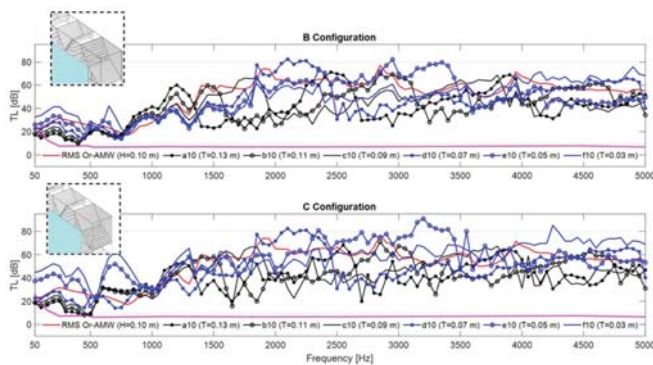


Fig. 3 – Confronto schematico delle configurazioni B e C di TL caratterizzate da $H=0,1$ m e $T=0,13$ m (a), $T=0,11$ m (b), $T=0,09$ m (c), $T=0,07$ m (d), $T=0,05$ m (e), $T=0,03$ m (f). Due linee puntinate sono tracciate per dei valori di TL = 10 dB e TL = 80 dB, come riferimento per le prestazioni complessive del TL, mentre la linea rosa indica la TL relativa ad una finestra a scorrimento standard con rapporto di superficie di apertura comparabile a quello della AMW. La linea rossa rappresenta l'RMS del TL AMW originale su scala reale. Il dettaglio nell'angolo superiore sinistro rappresenta i fianchi perforate che contraddistinguono la Configurazione B e C
Schematic comparison of TL configurations B and C characterised by $H=0.1$ m and $T=0.13$ m (a), $T=0.11$ m (b), $T=0.09$ m (c), $T=0.07$ m (d), $T=0.05$ m (e), $T=0.03$ m (f). Two dotted lines are drawn for TL = 10 dB and TL = 80 dB, as a reference for the overall TL performance, while the pink line indicates the TL for a standard sliding window with an opening surface ratio comparable to that of the AMW. The red line represents the RMS of the original full-scale AMW TL. The detail in the upper left corner represents the perforated sidewalls that characterise Configuration B and C

La Figura 4 mostra il TL ottimizzato delle Configurazioni B e C dell'AM in scala reale, caratterizzato da un'altezza del telaio $H=0,075$ m. Il valore decrescente di T ($a=T=0,13$ m, $b=T=0,11$ m, $c=T=0,09$ m, $d=T=0,07$ m, $e=T=0,05$ m, $f=T=0,03$ m) rappresenta lo spessore della finestra con H costante, e quindi le prestazioni dell'AMW a diversi gradi di chiusura. Complessivamente, l'analisi numerica delle configurazioni B e C evidenzia un TL significativo. Inoltre, in questo caso, C funziona meglio di B in generale in tutta l'intervallo di frequenze 50-5000 Hz. Questo risultato è particolarmente evidente se confrontato con il TL RMS della AMW originale (rappresentato nel grafico con la linea rossa). Si evidenzia un calo significativo tra 50 e 100 Hz per B, che mostra un aumento del segnale acustico trasmesso attraverso da questa configurazione per i

gradi di apertura maggiori ($T=0,13$, $0,11$, $0,09$ m). È possibile ipotizzare che, grazie alla sua natura geometrica uniforme, anche in questo caso, la configurazione C consenta di ottimizzare il TL e di superare gli eventuali aumenti di trasmissione come nel caso di B (cfr. Figura 4).

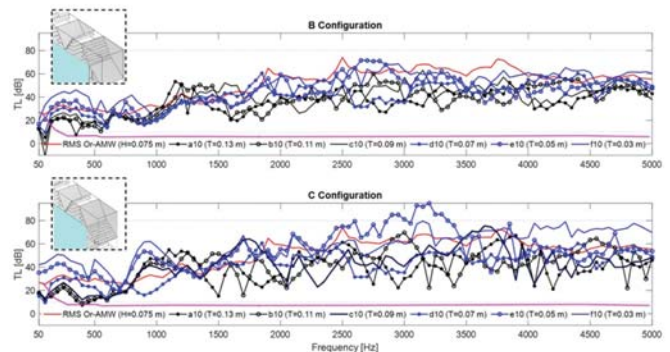


Fig. 4 – Confronto schematico delle configurazioni B e C di TL caratterizzate da $H=0,075$ m e $T=0,13$ m (a), $T=0,11$ m (b), $T=0,09$ m (c), $T=0,07$ m (d), $T=0,05$ m (e), $T=0,03$ m (f). Due linee puntinate sono tracciate per dei valori di TL = 10 dB e TL = 80 dB, come riferimento per le prestazioni complessive del TL, mentre la linea rosa indica la TL relativa ad una finestra a scorrimento standard con rapporto di superficie di apertura comparabile a quello della AMW. La linea rossa rappresenta l'RMS del TL AMW originale su scala reale. Il dettaglio nell'angolo superiore sinistro rappresenta i fianchi perforate che contraddistinguono la Configurazione B e C
Schematic comparison of TL configurations B and C characterised by $H=0.075$ m and $T=0.13$ m (a), $T=0.11$ m (b), $T=0.09$ m (c), $T=0.07$ m (d), $T=0.05$ m (e), $T=0.03$ m (f). Two dotted lines are drawn for TL = 10 dB and TL = 80 dB, as a reference for the overall TL performance, while the pink line indicates the TL for a standard sliding window with an opening surface ratio comparable to that of the AMW. The red line represents the RMS of the original full-scale AMW TL. The detail in the upper left corner represents the perforated sidewalls that characterise Configuration B and C

La Figura 5 mostra un confronto del TL tra le configurazioni B e C caratterizzate da $H=0,06$ m e da un valore di T decrescente che rappresenta il meccanismo di chiusura della AMW ($a=T=0,13$ m, $b=T=0,11$ m, $c=T=0,09$ m, $d=T=0,07$ m, $e=T=0,05$ m, $f=T=0,03$ m). Quindi, anche per uno spessore del telaio $H=0,06$ m, l'efficacia del TL è associata alla riduzione dell'apertura della finestra. Complessivamente, B e C mostrano un TL considerevole in tutta l'intervallo di frequenze 50-5000 Hz (TL minimo=10 dB e TL massimo=84 dB). L'analisi numerica mostra gli evidenti vantaggi della configurazione C, evidenziando le migliori performance rispetto a B anche confrontando il valore RMS del TL AMW originale su scala reale (rappresentato nel grafico con la linea rossa). Si nota l'ottimizzazione del TL nella configurazione C dell'AMW per tutto l'intervallo di frequenza (50-5000Hz). Inoltre, per un telaio con $H=0,06$ m, la configurazione C crea una condizione di risonanza che ottimizza il sistema meglio di B, poiché i pannelli perforati non sono accoppiati e anche la risonanza dell'unità AMM è migliorata rispetto a quella speculare (vedere Figura 5).

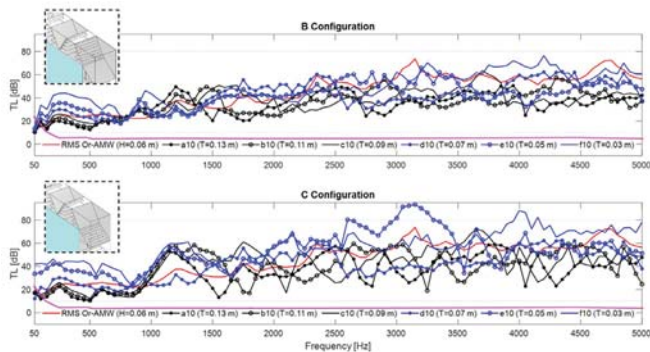


Fig. 5 – Confronto schematico delle configurazioni B e C di TL caratterizzate da $H=0,06$ m e $T=0,13$ m (a), $T=0,11$ m (b), $T=0,09$ m (c), $T=0,07$ m (d), $T=0,05$ m (e), $T=0,03$ m (f). Due linee puntinate sono tracciate per dei valori di $TL = 10$ dB e $TL = 80$ dB, come riferimento per le prestazioni complessive del TL, mentre la linea rosa indica la TL relativa ad una finestra a scorrimento standard con rapporto di superficie di apertura comparabile a quello della AMW. La linea rossa rappresenta l'RMS del TL AMW originale su scala reale. Il dettaglio nell'angolo superiore sinistro rappresenta i fianchi perforate che contraddistinguono la Configurazione B e C

Schematic comparison of TL configurations B and C characterised by $H=0.06$ m and $T=0.13$ m (a), $T=0.11$ m (b), $T=0.09$ m (c), $T=0.07$ m (d), $T=0.05$ m (e), $T=0.03$ m (f). Two dotted lines are drawn for $TL = 10$ dB and $TL = 80$ dB, as a reference for the overall TL performance, while the pink line indicates the TL for a standard sliding window with an opening surface ratio comparable to that of the AMW. The red line represents the RMS of the original full-scale AMW TL. The detail in the upper left corner represents the perforated sidewalls that characterise Configuration B and C

Infine, la Figura 6 mostra il TL delle configurazioni ottimizzate B e C dell'AMW in scala reale, caratterizzate da un'altezza del telaio $H=0,05$ m. Il valore decrescente di T ($a=T=0,13$ m, $b=T=0,11$ m, $c=T=0,09$ m, $d=T=0,07$ m, $e=T=0,05$ m, $f=T=0,03$ m) rappresenta lo spessore della finestra con H costante e, di conseguenza, le prestazioni dell'AMW a diversi gradi di chiusura. Nel complesso, l'analisi numerica delle configurazioni B e C evidenzia un TL significativo. Inoltre, in questo caso, C performa meglio di B in tutta l'intervallo di frequenze da 50 a 5000 Hz, il che significa che le dimensioni ridotte dell'unità AMM all'interno del telaio neutralizzano il contributo risonante della configurazione C uniformemente perforata. Il confronto con il TL RMS dell'AMW originale (rappresentato dal grafico della linea rossa) mostra il vantaggio complessivo dei nuovi modelli ottimizzati (cfr. Figura 6).

Nel complesso, le configurazioni B e C riportano prestazioni migliori rispetto alla configurazione originale. Nel caso di studio della AMW in scala reale, infatti, esse consentono all'unità AMM di avere il volume di risonanza maggiore, dimostrando che la percentuale di perforazione è un fattore cruciale per la progettazione di una finestra AMM. Questo risultato è particolarmente evidente alle basse frequenze (50-500 Hz), dove si raggiunge una media di 25 dB di TL. È importante notare, inoltre, che la disposizione dei pannelli perforati diventa più cruciale con l'aumento dell'altezza del telaio (H). È possibile ipotizzare che, grazie alla sua natura geometrica uniforme, la configurazione C consenta di ottimizzare il TL e di superare le limitazioni e persino i possibili ingrandimenti

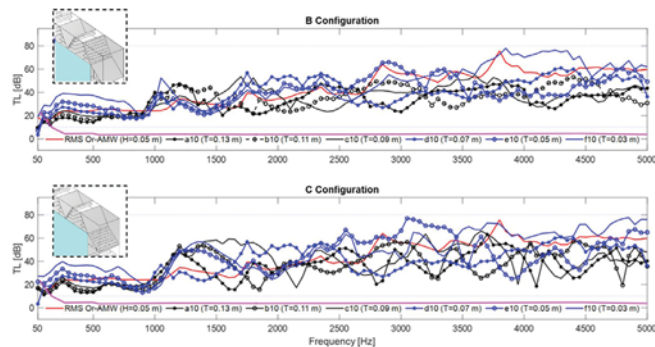


Fig. 6 – Confronto schematico delle configurazioni B e C di TL caratterizzate da $H=0,05$ m e $T=0,13$ m (a), $T=0,11$ m (b), $T=0,09$ m (c), $T=0,07$ m (d), $T=0,05$ m (e), $T=0,03$ m (f). Due linee puntinate sono tracciate per dei valori di $TL = 10$ dB e $TL = 80$ dB, come riferimento per le prestazioni complessive del TL. La linea rossa rappresenta l'RMS del TL AMW originale su scala reale, mentre la linea rosa indica la TL relativa ad una finestra a scorrimento standard con rapporto di superficie di apertura comparabile a quello della AMW. Il dettaglio nell'angolo superiore sinistro rappresenta i fianchi perforate che contraddistinguono la Configurazione B e C

Schematic comparison of TL configurations B and C characterised by $H=0.05$ m and $T=0.13$ m (a), $T=0.11$ m (b), $T=0.09$ m (c), $T=0.07$ m (d), $T=0.05$ m (e), $T=0.03$ m (f). Two dotted lines are drawn for $TL = 10$ dB and $TL = 80$ dB, as a reference for the overall TL performance, while the pink line indicates the TL for a standard sliding window with an opening surface ratio comparable to that of the AMW. The detail in the upper left corner represents the perforated sidewalls that characterise Configuration B and C

Schematic comparison of TL configurations B and C characterised by $H=0.05$ m and $T=0.13$ m (a), $T=0.11$ m (b), $T=0.09$ m (c), $T=0.07$ m (d), $T=0.05$ m (e), $T=0.03$ m (f). Two dotted lines are drawn for $TL = 10$ dB and $TL = 80$ dB, as a reference for the overall TL performance, while the pink line indicates the TL for a standard sliding window with an opening surface ratio comparable to that of the AMW. The detail in the upper left corner represents the perforated sidewalls that characterise Configuration B and C

causati da B in un intervallo di frequenze più bassa (50-100 Hz). Oltre al miglioramento acustico rispetto al modello originale di AMW in scala reale e alla variante B, la configurazione C potrebbe risultare più conveniente per un processo industrializzato, poiché questo specifico design, caratterizzato da unità AMM tutte uguali, potrebbe consentire la fabbricazione in serie degli elementi dell'unità AMM. Tale caratteristica semplificherebbe il processo produttivo portando ad un vantaggio sia in termini di tempistiche e costi di produzione. Infine, bisogna evidenziare come questo lavoro sia frutto di una sovrapposizione di effetti di risonanze locali dell'intera struttura AMW. Per quanto riguarda potenziali effetti di interazione tra le strutture risonanti e ciascun pannello perforato in futuro, sarebbe interessante considerare solo il TL relativo alle unità metamateriali con pannelli perforati senza considerare le strutture risonanti frontali (il pannello frontale) come già sperimentato in precedenti lavori dell'autore [28]. In questo modo si riuscirebbe a verificare meglio il reale contributo dell'inclusione del pannello perforato rispetto alla sovrapposizione con altri componenti geometriche della AMW.

4 | Conclusioni

Questo studio ha esplorato l'applicabilità di un sistema AMW in scala reale sviluppato, in precedenza, per la riduzione del rumore e la ventilazione naturale. Sono state effettuate 48 analisi parametriche per valutare l'efficacia di due parametri

di progettazione: lo spessore e l'altezza del telaio (T e H) per un modello in scala reale di AMW ottimizzato ad ampio spettro di frequenza.

Innanzitutto, dal punto di vista dell'acustica, il modello base di AMW in scala reale riduce efficacemente il rumore in ingresso con un ΔTL minimo di 1,5 dB e massimo di 55,7 dB su una finestra scorrevole standard. Tuttavia, la riduzione del rumore è garantita dalla personalizzazione del design della AMW (in funzione di H) e del grado di apertura (in funzione di T).

Per quanto riguarda l'analisi numerica, le perdite visco-termiche sono state trascurate per valutare l'impatto acustico minimo della geometria metamateriale unicamente (considerando che questo parametro nel caso attuale non comporta una variazione significativa tra risultato numerico e sperimentale come dimostrato dalla letteratura). Tuttavia la mancata considerazione degli effetti dissipativi può portare a un mancato accordo dei risultati quando vengono confrontati con quelli sperimentali, per cui in studi futuri le componenti visco-termiche saranno implementate nel modello numerico.

L'analisi numerica del modello ottimizzato acusticamente di AMW (in diversi design personalizzabili in base a T e H) mostra infine che con una struttura perforata su misura dell'unità AMM [8], l'attenuazione del rumore può essere ottenuta in modo coerente nell'intervallo di frequenza 50-5000 Hz, e il tempo di apertura può essere aumentato o ridotto per lo più senza dipendere dagli stimoli acustici esterni. Inoltre, i modelli con T= 7,5, 10, 15 cm possono raggiungere valori significativi di TL con un tasso di ricambio d'aria ottimale in minuti (ACRM) (dimostrato nello studio precedente [29,31]), rendendo questo design adatto alla maggior parte delle funzioni pubbliche interne. Infine, nonostante il modello numerico sia già stato validato in altri lavori pubblicati con un accordo positivo con i risultati sperimentali [26,30], si anticipa che studi futuri permetteranno di passare ad una validazione del design ottimale (inteso come combinazione dei parametri H e di perforazione dei pannelli come B o C), attraverso metodi sperimentali di isolamento da facciata.

Conclusions

This study explored the applicability of a previously developed full-scale AMW system for noise reduction and natural ventilation. Forty-eight parametric analyses were performed to evaluate the effectiveness of two design parameters: frame thickness and frame height (T and H) for a full-scale, optimised AMW model.

Firstly, from an acoustic point of view, the basic full-scale model of AMW effectively reduces the incoming noise with a minimum ΔTL of 1.5 dB and a maximum of 55.7 dB on a standard sliding window. However, noise reduction is ensured by customising the design of the AMW (as a function of H) and the degree of opening (as a function of T).

As far as the numerical analysis is concerned, viscothermal losses were neglected in order to assess the minimum acoustic impact of the metamaterial geometry only (considering that this parameter in the present case does not entail a significant variation between numerical and experimental results as demonstrated in the

literature). However, the neglect of dissipative effects may lead to a lack of agreement of the results when compared with the experimental ones, so in future studies the visco-thermal components will be implemented in the numerical model.

Finally, numerical analysis of the acoustically optimised AMW model (in different designs that can be customised according to T and H) shows that with a customised perforated structure of the AMM unit [8], noise attenuation can be consistently achieved in the frequency range 50-5000 Hz, and the opening time can be increased or reduced mostly without depending on external acoustic stimuli. Furthermore, models with T=7.5, 10, 15 cm can achieve significant TL values with an optimal air change rate in minutes (ACRM) (demonstrated in the previous study [29,31]), making this design suitable for most indoor public functions. Finally, although the numerical model has already been validated in other published works with a positive agreement with the experimental results [26,30], it is anticipated that future studies will allow for a validation of the optimal design (understood as a combination of H and panel perforation parameters such as B or C), through experimental façade insulation methods.

Bibliografia

- [1] Harvie-Clark, J.; Chilton, A.; Conlan, N.; Trew, D. Assessing Noise with Provisions for Ventilation and Overheating in Dwellings. *J. Build. Serv. Eng. Res. Technol.* 2019, 40, 263-273, doi:10.1177/0143624418824232.
- [2] Public Health England *Review and Update of Occupancy Factors for UK Homes*; London, 2018.
- [3] Fusaro, G.; Kang, J. Participatory Approach to Draw Ergonomic Criteria for Window Design. *Int. J. Ind. Ergon.* 2021, 82, doi:10.1016/j.ergon.2021.103098.
- [4] Tang, S.K. A Review on Natural Ventilation-Enabling Façade Noise Control Devices for Congested High-Rise Cities. *Appl. Sci.* 2017, 7, doi:10.3390/app7020175.
- [5] Du, L.; Lau, S.K.; Lee, S.E.; Danzer, M.K. Experimental Study on Noise Reduction and Ventilation Performances of Sound-Proofed Ventilation Window. *Build. Environ.* 2020, 181, 107105, doi:10.1016/j.buildenv.2020.107105.
- [6] Lam, B.; Shi, D.; Belyi, V.; Wen, S.; Gan, W.S.; Li, K.; Lee, I. Active Control of Low-Frequency Noise through a Single Top-Hung Window in a Full-Sized Room. *Appl. Sci.* 2020, 10, doi:10.3390/app10196817.
- [7] Asdrubali, F.; Buratti, C. Sound Intensity Investigation of the Acoustics Performances of High Insulation Ventilating Windows Integrated with Rolling Shutter Boxes. *Appl. Acoust.* 2005, 66, 1088-1101, doi:10.1016/j.apacoust.2005.02.001.
- [8] Kang, J.; Brocklesby, M.W. Feasibility of Applying Micro-Perforated Absorbers in Acoustic Window Systems. *Appl. Acoust.* 2005, 66, 669-689, doi:10.1016/J.APACoust.2004.06.011.
- [9] Wang, X.; Luo, X.; Yang, B.; Huang, Z. Ultrathin and Durable Open Metamaterials for Simultaneous Ventilation and Sound Reduction. *Appl. Phys. Lett.* 2019, 115, 171902, doi:10.1063/1.5121366.
- [10] De Salis, M.H.F.; Oldham, D.J.; Sharples, S. Noise Control Strategies for Naturally Ventilated Buildings. *Build. Environ.* 2002, 37, 471-484, doi:10.1016/S0360-1323(01)00047-6.
- [11] Pan, L.; Martellotta, F. A Parametric Study of the Acoustic Performance of Resonant Absorbers Made of Micro-Perforated Membranes and Perforated Panels. *Appl. Sci.* 2020, 10, doi:10.3390/app10051581.

- [12] Carbajo, J.; Ghaffari Mosanenzadeh, S.; Kim, S.; Fang, N.X. Sound Absorption of Acoustic Resonators with Oblique Perforations. *Appl. Phys. Lett.* 2020, 116, doi:10.1063/1.5132886.
- [13] Zhou, Y.; Li, D.; Li, Y.; Hao, T. Perfect Acoustic Absorption by Subwavelength Metaporous Composite. *Appl. Phys. Lett.* 2019, 115, doi:10.1063/1.5107439.
- [14] Li, D.; Jiang, Z.; Li, L.; Liu, X.; Wang, X.; He, M. Investigation of Acoustic Properties on Wideband Sound-Absorber Composed of Hollow Perforated Spherical Structure with Extended Tubes and Porous Materials. *Appl. Sci.* 2020, 10, 1-11, doi:10.3390/app10248978.
- [15] Yu, X. Design and In-Situ Measurement of the Acoustic Performance of a Metasurface Ventilation Window. *Appl. Acoust.* 2019, 152, 127-132, doi:10.1016/j.apacoust.2019.04.003.
- [16] Kumar, S.; Lee, H.P. Labyrinthine Acoustic Metastructures Enabling Broadband Sound Absorption and Ventilation. *Appl. Phys. Lett.* 2020, 116, doi:10.1063/5.0004520.
- [17] Jiménez, N.; Groby, J.-P.; Pagneux, V.; Romero-García, V. Iridescent Perfect Absorption in Critically-Coupled Acoustic Metamaterials Using the Transfer Matrix Method. *Appl. Sci.* 2017, 7, 618, doi:10.3390/app7060618.
- [18] Zhang, J.; Romero-García, V.; Theocharis, G.; Richoux, O.; Achilleos, V.; Frantzeskakis, D.J. Dark Solitons in Acoustic Transmission Line Metamaterials. *Appl. Sci.* 2018, 8, doi:10.3390/app8071186.
- [19] Shen, C.; Xie, Y.; Li, J.; Cummer, S.A.; Jing, Y. Acoustic Metacages for Sound Shielding with Steady Air Flow. *J. Appl. Phys.* 2018, 123, 124501, doi:10.1063/1.5009441.
- [20] Jiménez, N.; Romero-García, V.; Pagneux, V.; Groby, J.P. Rainbow-Trapping Absorbers: Broadband, Perfect and Asymmetric Sound Absorption by Subwavelength Panels for Transmission Problems. *Sci. Rep.* 2017, 7, 1-12, doi:10.1038/s41598-017-13706-4.
- [21] Kumar, S.; Xiang, T.B.; Lee, H.P. Ventilated Acoustic Metamaterial Window Panels for Simultaneous Noise Shielding and Air Circulation. *Appl. Acoust.* 2020, 159, 107088, doi:10.1016/j.apacoust.2019.107088.
- [22] Shao, C.; Xiong, W.; Long, H.; Tao, J.; Cheng, Y.; Liu, X. Ultra-Sparse Metamaterials Absorber for Broadband Low-Frequency Sound with Free Ventilation. *J. Acoust. Soc. Am.* 2021, 150, 1044-1056, doi:10.1121/10.0005850.
- [23] Lam, B.; Shi, C.; Shi, D.; Gan, W.S. Active Control of Sound through Full-Sized Open Windows. *Build. Environ.* 2018, 141, 16-27.
- [24] Lim, H.S.; Kim, G. The Renovation of Window Mechanism for Natural Ventilation in a High-Rise Residential Building. *Int. J. Vent.* 2018, 17, 17-30, doi:10.1080/14733315.2017.1351733.
- [25] Sorgato, M.J.; Melo, A.P.; Lamberts, R. The Effect of Window Opening Ventilation Control on Residential Building Energy Consumption. *Energy Build.* 2016, 133, 1-13, doi:10.1016/j.enbuild.2016.09.059.
- [26] Fusaro, G.; Yu, X.; Lu, Z.; Cui, F.; Kang, J. A Metawindow with Optimised Acoustic and Ventilation Performance. *Appl. Sci.* 2021, 11, 1-16, doi:10.3390/app11073168.
- [27] Fusaro, G.; Kang, J.; Asdrubali, F.; Chang, W.-S. Assessment of Acoustic Metawindow Unit through Psychoacoustic Analysis and Human Perception. *Appl. Acoust.* 2022, doi:https://doi.org/10.1016/j.apacoust.2022.108885.
28. Fusaro, G.; Yu, X.; Kang, J.; Cui, F. Development of Metacage for Noise Control and Natural Ventilation in a Window System. *Appl. Acoust.* 2020, 170, 107510, doi:10.1016/j.apacoust.2020.107510.
- [29] Fusaro, G.; Yu, X.; Cui, F.; Kang, J. Full-Scale Metamaterial Window for Building Application. In Proceedings of the Inter-Noise 2020; Seoul, 2020.
- [30] Yu, X.; Lu, Z.; Liu, T.; Cheng, L.; Zhu, J.; Cui, F. Sound Transmission through a Periodic Acoustic Metamaterial Grating. *J. Sound Vib.* 2019, 449, 140-156, doi:10.1016/j.jsv.2019.02.042.
- [31] Fusaro, G. Development of a Window System with Optimised Ventilation and Noise-Reduction Performance: An Approach Using Metamaterials., University of Sheffield, 2022.