

The logo consists of the letters 'AIA' in a bold, green, sans-serif font. The first 'A' is a solid block letter, while the second 'A' is formed by two vertical bars and a horizontal bar at the bottom, creating a stylized, open structure.

Rivista  
Italiana di  
Acustica

*Semestrale di diffusione scientifica e tecnica*

*v. 47, n. 2/2023*  
*luglio-dicembre*

**FrancoAngeli** 



**Direttore responsabile (Editor in Chief)**

Eleonora Carletti  
Istituto di Scienze e Tecnologie per l'Energia  
e la Mobilità Sostenibili (STEMS)  
Consiglio Nazionale delle Ricerche  
Sede di Ferrara, Via Canal Bianco, 28, 44124 Ferrara  
e-mail: eleonora.carletti@stems.cnr.it

**Responsabile di redazione (Editorial Manager)**

Francesco Pompoli  
Dipartimento di Ingegneria  
Università degli Studi di Ferrara  
Via Saragat, 1, 44121 Ferrara  
e-mail: francesco.pompoli@unife.it

**Vice-responsabile di redazione (Deputy Editorial Manager)**

Louena Shtrepi  
Department of Energy, DENERG  
Politecnico di Torino  
Corso Duca degli Abruzzi, 24, 10129 Torino  
e-mail: louena.shtrepi@polito.it

**Comitato di redazione (Editorial Committee)**

Francesco Aletta, f.aletta@ucl.ac.uk  
(University College London, United Kingdom)  
Umberto Berardi, uberardi@ryerson.ca  
(Toronto Metropolitan University, Canada)  
Davide Borelli, davide.borelli@unige.it  
(Università di Genova, Italia)  
Ulf Carlsson, ulfc@kth.se  
(KTH Royal Institute of Technology, Sweden)  
Luis Cueto, joseluis.cueto@uca.es  
(Universidad de Cadiz, Spain)  
Papatya Nur Dokmeci Yorukoglu, papatya@cankaya.edu.tr  
(Çankaya University, Turkey)  
Gianpiero Evola, gevola@unict.it  
(Università di Catania, Italia)  
Christ Glorieux, christ.glorieux@kuleuven.be  
(KU Leuven, Belgium)  
Claudia Guattari, claudia.guattari@uniroma3.it  
(Università Roma Tre, Italia)  
Zühre Sü Gül, zuhre@bilkent.edu.tr  
(Bilkent University, Turkey)  
Kirill Horoshenkov, k.horoshenkov@sheffield.ac.uk  
(University of Sheffield, United Kingdom)  
Kristian Jambrošić, kristian.jambrosic@fer.hr  
(University of Zagreb, Croatia)  
Cheol-Ho Jeong, chje@dtu.dk  
(Technical University of Denmark, Denmark)

Gaetano Licitra, tanosergio0@gmail.com  
(Consiglio Nazionale delle Ricerche IPCF, Italia)  
Edoardo Piana, edoardo.piana@unibs.it  
(Università di Brescia, Italia)  
Francesco Pompoli, francesco.pompoli@unife.it  
(Università di Ferrara, Italia)  
Chiara Rubino, chiara.rubino@poliba.it  
(Politecnico di Bari, Italia)  
Monika Rychtarikova, monika.rychtarikova@kuleuven.be  
(KU Leuven, Belgium)  
Louena Shtrepi, louena.shtrepi@polito.it  
(Politecnico di Torino, Italia)  
Simone Torresin, simone.torresin@unitn.it  
(Università di Trento, Italia)  
Konstantinos E. Vogiatzis, kvogiatz@civ.uth.gr  
(University of Thessaly, Greece)  
Jeremie Voix, jeremie.voix@etsmtl.ca  
(École de Technologie Supérieure, Montreal, Canada)

**Contatto e-mail della RIA**

ria@acustica-aia.it

La rivista utilizza una procedura di referaggio doppiamente cieco (double blind peer review process) in cui i revisori sono scelti in base alla specifica competenza e usa anche la procedura degli articoli su invito.

*The journal uses a double blind peer review process in which reviewers are chosen on the basis of specific expertise.*

*The journal also uses the invited paper procedure.*



Il presente volume è pubblicato in open access, ossia il file dell'intero lavoro è liberamente scaricabile dalla piattaforma **FrancoAngeli Open Access** (<http://bit.ly/francoangeli-oa>).

**FrancoAngeli Open Access** è la piattaforma per pubblicare articoli e monografie, rispettando gli standard etici e qualitativi e la messa a disposizione dei contenuti ad accesso aperto. Oltre a garantire il deposito nei maggiori archivi e repository internazionali OA, la sua integrazione con tutto il ricco catalogo di riviste e collane FrancoAngeli ne massimizza la visibilità e favorisce la facilità di ricerca per l'utente e la possibilità di impatto per l'autore.

Per saperne di più:

[http://www.francoangeli.it/come\\_pubblicare/pubblicare\\_19.asp](http://www.francoangeli.it/come_pubblicare/pubblicare_19.asp)

I lettori che desiderano informarsi sui libri e le riviste da noi pubblicati possono consultare il nostro sito Internet: [www.francoangeli.it](http://www.francoangeli.it) e iscriversi nella home page al servizio "Informatemi" per ricevere via e-mail le segnalazioni delle novità.



Rivista  
Italiana di  
Acustica

*Semestrale di diffusione scientifica e tecnica*

*v. 47, n. 2/2023*

*luglio-dicembre*

**FrancoAngeli** 

Autorizzazione n. 17488/1978 del Tribunale di Roma –  
Direttore responsabile: Eleonora Carletti – Semestrale  
Poste Italiane Spa – Sped. in abb. post. – D.L. 353/2003  
(conv. in L. 27/02/2004 n. 46) art. 1, comma 1, DCB Milano  
Copyright © 2023 by FrancoAngeli s.r.l.

L'opera, comprese tutte le sue parti, è tutelata dalla legge sul diritto  
d'autore ed è pubblicata con licenza *Creative Commons*  
*Attribuzione-Non Commerciale-Non opere derivate 4.0 Internazionale*  
(CC-BY-NC-ND 4.0).

*L'Utente, nel momento in cui effettua il download dell'opera, accetta*  
*tutte le condizioni della licenza d'uso dell'opera previste e comunicate*  
*sul sito*  
<https://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/4.0/deed.it>

v. 47, Il semestre 2023

# Indice

## Editoriale/Editorial

- 7 **Tempo di bilanci, di ringraziamenti e di elezioni**  
Francesco Asdrubali

## Articoli scientifici/Scientific papers

- 9 **Sviluppo di una finestra metamateriale con ventilazione e attenuazione acustica ottimizzata**  
Gioia Fusaro
- 17 **Metodi di deep learning acustico per il riconoscimento dei dissesti della pavimentazione stradale**  
Alessandro Monticelli
- 25 **Analisi sperimentali e numeriche di cristalli sonici utilizzati in barriere antirumore**  
Tommaso D'Orazio
- 35 **Indagine sull'ambiente sonoro in alcune aree alpine della Valle d'Aosta**  
Giovanni Brambilla, Christian Tibone, Filippo Berlier, Christian Tartin, Daniele Crea, Marco Cappio Borlino

## Note tecniche/Technical notes

- 49 **Galleria Commerciale dell'Aeroporto di Fiumicino: analisi acustica di un ambiente di grandi dimensioni**  
Paola Pulella, Lucia Busa, Sergio Luzzi, Aurora Berna Berionni, Alessandro Ferreri
- 55 **Riflessioni sul rumore intrusivo da sorgente specifica**  
Giovanni Brambilla
- 63 **Colour Enhanced Time/Pressure Envelope (CETPE), a novel on-screen rendering of digital sound**  
Cesare Brizio

## Vita dell'associazione/Life of the association

- 73 **Resoconto del Seminario AIA "L'evoluzione del controllo delle vibrazioni: smart sensor networks & industry 4.0"**  
Alessandro Schiavi
- 76 **Resoconto del 49° Convegno Nazionale AIA**  
Francesco Pompoli, Patrizio Fausti
- 80 **Resoconto del X Convegno della European Acoustical Association, Forum Acusticum 2023**  
Arianna Astolfi, Francesco Asdrubali
- 84 **Beautiful Sounds 2023. Suoni positivi per luoghi felici**  
Sergio Luzzi
- 86 **Resoconto del Symposium on the Acoustics of Poro-Elastic Materials. SAPEM2023**  
Elio Di Giulio, Raffaele Dragonetti, Marialuisa Napolitano, Rosario Aniello Romano
- 5 | **Rivista Italiana di Acustica v. 47, n. 2, 2023**





# Tempo di bilanci, di ringraziamenti e di elezioni

Francesco Asdrubali\*

Sta terminando il 2023, l'ultimo di questa consiliatura, e pertanto il 2024, come previsto dal nostro Statuto, sarà l'anno dell'elezione del nuovo Consiglio Direttivo e del nuovo Presidente. Quando questo numero della Rivista Italiana di Acustica sarà disponibile, saranno state avviate le votazioni on line, ai sensi del Regolamento elettorale dell'Associazione.

A me non resta che raccontare ciò che chi sarà eletto riceverà in eredità, ringraziare chi ha contribuito ai grandi risultati ottenuti ed auspicare che l'Associazione possa proseguire efficacemente la sua opera di diffusione della cultura in ambito acustico.

Il triennio 2021-2023 che si sta concludendo è stato molto importante per la vita dell'Associazione: nonostante l'inizio sia stato segnato pesantemente dalla pandemia, al punto che si è dovuto tenere online il Convegno Nazionale del 2021 e rinunciare a febbraio 2022 all'evento celebrativo a Ferrara del cinquantesimo anniversario, l'AIA ha dimostrato grande resilienza e vitalità, come testimoniato dalla pluralità di iniziative messe in campo.

I Convegni Nazionali sono stati eventi di grande successo scientifico e organizzativo, grazie al significativo impegno dei Comitati locali, che ringrazio, in particolare nelle persone di Francesco Martellotta, Patrizio Fausti e Francesco Pompoli. Il 48° Convegno Nazionale AIA, organizzato in collaborazione con l'Università della Basilicata, il Politecnico di Bari e il Conservatorio «E.R. Duni» di Matera, si è tenuto a Matera dal 25 al 27 maggio 2022, mentre il 49° Convegno Nazionale AIA, organizzato in collaborazione con l'Università di Ferrara e il CNR STEMS sede di Ferrara, si è tenuto a Ferrara dal 7 al 9 giugno 2023. Da segnalare la crescente presenza di giovani acustici, che sono tornati a frequentare con entusiasmo il Convegno AIA, e questo è senza dubbio un bel segnale per il futuro dell'Associazione.

In occasione del Convegno di Matera, grande risalto è stato dato alle celebrazioni del 50° anniversario dell'AIA: si è tenuta una partecipata Tavola Rotonda e sono stati elaborati diversi materiali, tuttora presenti sul sito dell'Associazione, che ci ricordano chi siamo e da dove veniamo, per proseguire con entusiasmo l'opera di chi ci ha preceduto. Colgo l'occasione per ringraziare tutti i componenti del Comitato celebrazioni: Giovanni Brambilla, Patrizio Fausti, Luigi Maffei ed Alessandro Peretti.

A livello internazionale, il triennio è stato caratterizzato da due eventi di cui l'AIA è stata promotrice ed organizzatrice, ed in particolare il Simposio internazionale "The Acoustics of

Ancient Theatres", già in calendario nel 2020 ma riprogrammato a causa della pandemia, che si è tenuto a Verona dal 6 all' 8 Luglio 2022, ed il Forum Acusticum, che si è tenuto presso il Politecnico di Torino dall'11 al 15 settembre 2023.

Il Simposio, organizzato da AIA in collaborazione con il TC Room and Building Acoustics dell'Associazione Europea di Acustica (EAA) e l'Istituto Ellenico di Acustica (HEL.IN.A.), con Patrizio Fausti e Arianna Astolfi come Chair, ha visto una qualificata partecipazione di studiosi dell'acustica dei teatri antichi provenienti da tutto il mondo. AIA ha realizzato, per conto di EAA, un sito internet dedicato agli atti del Simposio ([www.eaa-saat.eu/](http://www.eaa-saat.eu/)), dove sono stati raccolti gli atti della precedente edizione, tenutasi a Patrasso nel 2011, e che potrà essere utilizzato anche per le edizioni future.

Di Forum Acusticum, evento internazionale per il quale ho avuto l'onore di svolgere il ruolo di Co-Chair, insieme al Chair, la vulcanica Arianna Astolfi, si riferisce in un altro Editoriale di questo numero della RIA. Per la qualità delle Relazioni ad invito e delle memorie scientifiche, la varietà dei temi congressuali, la numerosità dei partecipanti, la pluralità delle visite tecniche, la ricchezza del programma sociale, oltre che per la validissima Summer School organizzata da Louena Shtrepi e che ha preceduto il congresso, l'edizione di Forum Acusticum 2023 sarà senza dubbio ricordata come memorabile negli anni a venire.

Accanto a questi eventi principali, ve ne sono stati diversi in presenza, quali seminari e giornate di studio, nonché, numerosissimi, online: tra gli altri, ricordo i webinar della serie Aspettando Matera (11 incontri tra primavera 2021 e primavera 2022), Aspettando Ferrara (3 incontri nella primavera del 2023), incontri AIA-AICARR (4 nel 2021), incontri della serie AIA Incontra le Associazioni (4 nel 2023), ed ancora gli incontri tecnici del venerdì con i Sostenitori (14 tra 2021 e 2023). Non è possibile in questa sede elencarli puntualmente tutti, ma si tratta di un programma ricchissimo che l'Associazione ha offerto ai propri Soci e a tutti coloro che si occupano di acustica nel nostro Paese, dando voce ad una pluralità di esperienze e competenze, con contributi anche di altre discipline, per un totale di 40 eventi online e 8 eventi in presenza: in media, un evento ogni 20 giorni.

Il programma per il mandato di Presidenza 2021-2023, che ha visto la costituzione di numerosi gruppi di lavoro con un'ampia rappresentanza di soci, non solo di membri del Consiglio Direttivo, ha avuto una significativa e soddisfacente attuazione.

Mi preme innanzitutto mettere in evidenza il grande risultato ottenuto con il rilancio della Rivista Italiana di Acustica: grazie al notevole impegno di Francesco Pompoli (Responsabile di Redazione), Eleonora Carletti (Direttore Responsabile)

\* Presidente Associazione Italiana di Acustica

e Louena Shtrepi (Vice Responsabile di Redazione), la rivista dal 2022 ha un nuovo Comitato Editoriale, caratterizzato dalla presenza di validi acustici italiani (tra cui molti giovani) e di studiosi stranieri, una nuova veste grafica e tipografica, un editore professionale (FrancoAngeli), nuove sezioni sulla vita dell'Associazione. Molti sono i contributi scientifici e le note tecniche pervenute; uno Special Issue è stato dedicato al Simposio sui teatri antichi di Verona.

L'attività di comunicazione è stata ulteriormente potenziata in chiave moderna, anche grazie al sito in continuo rinnovamento, al canale You Tube, dove sono disponibili le registrazioni di tutti i webinar, al nuovo profilo LinkedIn. In particolare, il sito è stato arricchito con molteplici, aggiornati contenuti tecnici e normativi (la Sezione "AIA Informa"), al fine di fornire un valido servizio ai Soci, e con la sezione "La Banca AIA", dove saranno pubblicati bandi, concorsi, richieste di collaborazioni. Ringrazio per l'efficace attività di coordinamento il Responsabile dei servizi IT, Luca Barbaresi, nonché Anna Magrini e Chiara Bartalucci per il lavoro svolto.

Si è intensificata la collaborazione con le altre Associazioni quali AES, AICARR, AIDII, SIE, IBPSA Italia ed è stato sottoscritto un nuovo accordo con SIAF (Società Italiana di Audiologia e Foniatria), nella convinzione che l'interdisciplinarietà ed il confronto tra diversi saperi siano uno stimolo per la crescita scientifica e culturale.

È proseguita l'attività di AIA nell'ambito dei corsi aggiornamento per Tecnici Competenti in Acustica, con eventi satelliti ai Convegni Nazionali ed altre attività di aggiornamento organizzate con ordini professionali oppure patrocinata; ringrazio in particolare Francesco Martellotta ed Andrea Tombolato per il loro contributo. Al fine di avvicinare ulteriormente i giovani professionisti all'Associazione, è stato istituito un nuovo premio annuale, consegnato in occasione del Convegno Nazionale, dedicato a giovani professionisti di età inferiore ai 35 anni, e che si affianca ai premi Sacerdote, Giacomini e Barducci. Ringrazio tutti coloro che hanno fatto parte delle commissioni di aggiudicazione dei premi e che hanno valutato i numerosi candidati, ed in particolare Eleonora Carletti ed Andrea Cerniglia.

È proseguita, grazie all'impegno di Sergio Luzzi e di tutto il gruppo di lavoro, coordinato da Chiara Bartalucci e Sara Delle Macchie, anche la collaborazione di AIA con numerosi soggetti istituzionali nazionali e internazionali per le iniziative dell'International Year of Sound, che si è concluso a Torino in occasione di Forum Acusticum, e per la realizzazione di INAD International Noise Awareness Day, un meritevole evento di sensibilizzazione sulle problematiche legate al rumore cui aderiscono da anni scuole ed amministrazioni comunali di tutta Italia. AIA ha inoltre rafforzato la sua collaborazione con Udito Italia Onlus, impegnata nella sensibilizzazione e prevenzione dei disturbi uditivi; in tale ambito ho avuto l'onore di rappresentare l'AIA a tavoli di lavoro ed eventi al Ministero della Salute.

Si è infine adeguato, grazie al sapiente contributo di Gianni Brambilla, il Regolamento elettorale, al fine di rendere il processo più trasparente e coerente con lo Statuto.

Le numerose attività descritte sono riuscite a coinvolgere un numero crescente di soci e simpatizzanti: i soci iscritti sono cresciuti ben oltre i 300, recuperando il calo fisiologico dovuto al periodo della pandemia; gli iscritti al sito e ai webinar sono stati così numerosi che il nostro database ha superato i 4000 nominativi; i sostenitori commerciali sono passati dai 4 del 2021 ai 13 del 2023. È stata istituita nel 2023 una nuova categoria di sostenitori, Platinum, che si è andata ad aggiungere a quelle tradizionali Oro, Argento e Bronzo, e che ha subito riscontrato l'interesse di tre aziende. Ringrazio di cuore tutti i sostenitori commerciali, che, insieme a quelli istituzionali, contribuiscono a dare supporto e visibilità all'Associazione.

Tutto quanto descritto non sarebbe stato possibile senza il contributo dei membri del Consiglio Direttivo, dei Revisori dei Conti (Lucilla Aiello, Daniele Bertoni e Alessandro Schiavi), del prezioso ed esperto Segretario generale Sergio Luzzi, della rigorosa ed attenta Tesoriera Francesca Pedrielli ed infine – last but not least – di Simona Senesi, Segretaria Amministrativa dalla grande cortesia, disponibilità e professionalità.

Auspico per l'AIA un futuro radioso ed auguro buon lavoro a chi verrà dopo di me. Ad maiora!

# 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 basata 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.

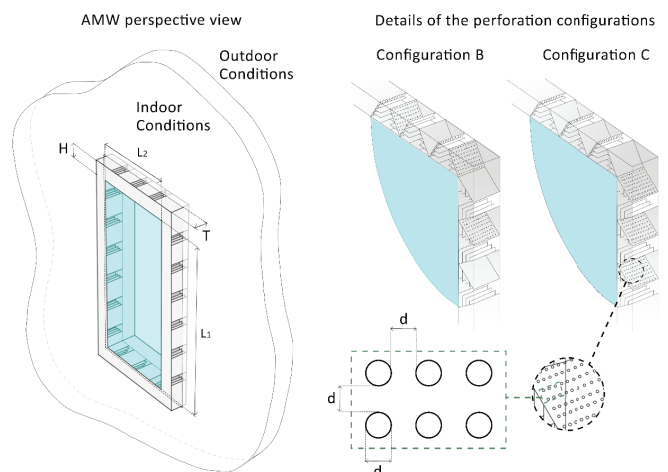
## 2 | Metodi

### 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  $d=6 \times 10^{-3}$  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  $d=6 \times 10^{-3}$  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  $d=6 \times 10^{-3}$  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.

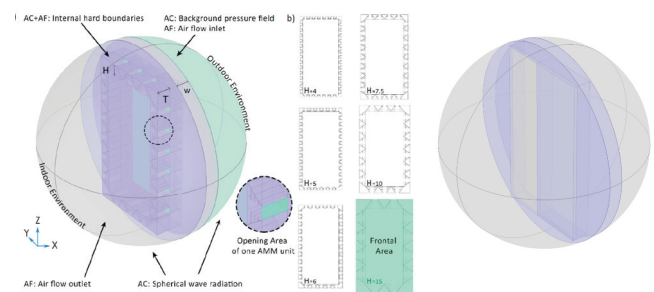
## 2.2 | Impostazione del modello FEM e condizioni al contorno

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**

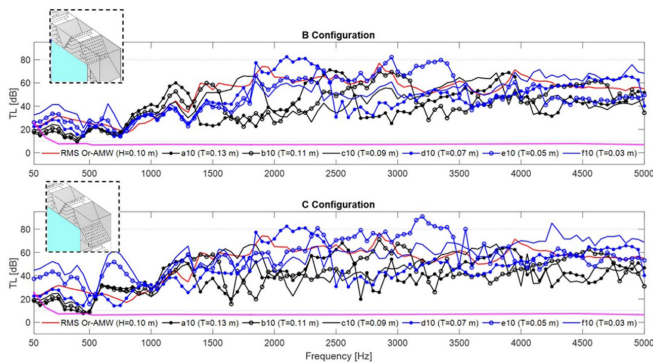
**a) 3D representation of the boundary conditions and parameters used in the acoustic (AC) and airflow (AF) studies. b) 2D section of AMW to show the variation of parameter H. c) 3D representation of a standard sliding window with an opening surface ratio comparable to that of the AMW**

## 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).

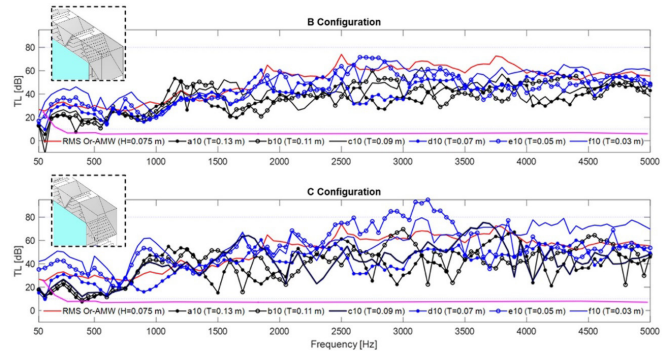


**Fig. 3 – Confronto schematico delle configurazioni B e C di TL caratterizzate da  $H=0,1$  m e  $T=0,13$  m (a),  $T=0,11$  m (b),  $T=0,09$  m (c),  $T=0,07$  m (d),  $T=0,05$  m (e),  $T=0,03$  m (f). Due linee puntinate sono tracciate per dei valori di TL = 10 dB e TL = 80 dB, come riferimento per 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

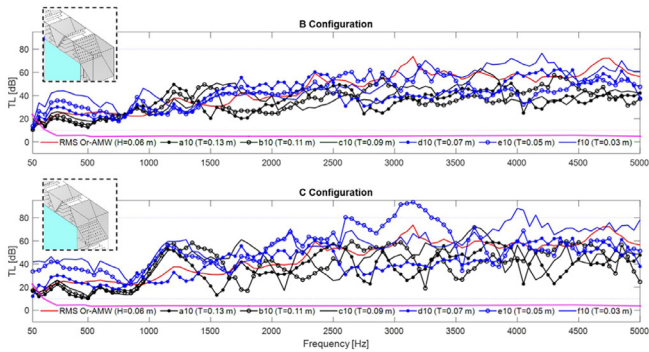
gradi di apertura maggiori ( $T=0,13, 0,11, 0,09$  m). È possibile ipotizzare che, grazie alla sua natura geometrica uniforme, anche in questo caso, la configurazione C consenta di ottimizzare il TL e di superare gli eventuali aumenti di trasmissione come nel caso di B (cfr. Figura 4).



**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).

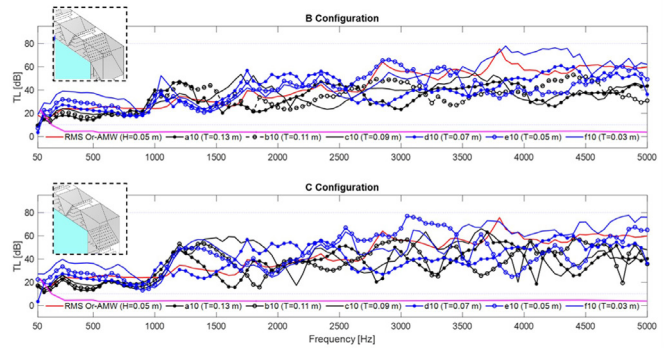


**Fig. 5 – Confronto schematico delle configurazioni B e C di TL caratterizzate da  $H=0,06$  m e  $T=0,13$  m (a),  $T=0,11$  m (b),  $T=0,09$  m (c),  $T=0,07$  m (d),  $T=0,05$  m (e),  $T=0,03$  m (f). Due linee punteggiate sono tracciate per dei valori di  $TL = 10$  dB e  $TL = 80$  dB, come riferimento 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 AMW 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 punteggiate 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. The red line represents the RMS of the original full-scale AMW TL, 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  $\Delta TL$  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  $\Delta TL$  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.



# Metodi di deep learning acustico per il riconoscimento dei dissesti della pavimentazione stradale

Alessandro Monticelli

Dipartimento di Fisica E. Fermi,  
Università di Pisa,  
Largo Bruno Pontecorvo, 3, 56127 Pisa  
a.monticelli1@studenti.unipi.it

**Ricevuto:** 28/2/2023

**Accettato:** 17/5/2023

**DOI:** 10.3280/ria2-2023oa15509

**ISSN:** 2385-2615

Nel seguente lavoro è stata proposta una metodologia basata su tecniche di deep learning per la valutazione delle condizioni della superficie stradale a partire da segnali acustici misurati all'interno della cavità dello pneumatico. Il progetto è stato svolto in collaborazione con Ipool srl., nel contesto del progetto SURFAce, finanziato dalla regione Toscana. Sono state proposte tre architetture di classificazione: una LSTM (*Long short-term memory network*) basata sull'andamento temporale di un insieme di descrittori spettrali e due CNN (*Convolutional neural network*), una incentrata sugli spettrogrammi dei segnali, l'altra sui Mel-frequency cepstral coefficients (MFCC). Il dataset di ground truth è stato acquisito tramite un laboratorio mobile e classificato mediante strumenti di analisi appositamente sviluppati. Due delle tre architetture proposte hanno fornito risultati incoraggianti. L'implementazione di tali strumenti su dispositivi mobili potrebbe rendere possibile la classificazione dello stato della pavimentazione in tempo reale con ridotti costi economici e temporali.

**Parole chiave:** tire cavity noise, deep learning, valutazione delle condizioni stradali

## Acoustical deep learning methods for road pavement distress recognition

In the following work, a deep learning-based methodology was proposed to evaluate road surface conditions starting from acoustic signals measured inside the car tire cavity. The project was carried out in collaboration with Ipool srl., in the context of the SURFAce project, funded by the Tuscany region. Three different classification architectures were proposed: An LSTM, based on the time series of a set of spectral descriptors, and two CNNs, the first focused on the signals' spectrograms and the second on their Mel-frequency cepstral coefficients (MFCCs). The ground truth data set was acquired through a mobile laboratory and classified through aptly developed analysis tools. Two of the three proposed architectures have provided encouraging results, and their implementation on portable systems could lead to real-time pavement classification in a cost and time-efficient way.

**Keywords:** tire cavity noise, deep learning, road condition assessment

## 1 | Introduzione

Il rumore da traffico veicolare rappresenta uno dei principali agenti di disturbo acustico in ambiente urbano. Le due sorgenti principali che contribuiscono a tale emissione acustica sono il rumore del motore e il rumore da rotolamento associato agli pneumatici. Ricerche sull'argomento (ad esempio quella condotta da Ipool) hanno permesso di evidenziare come il rumore da rotolamento sia dominante a velocità superiori a 40km/h [1]. La progressiva introduzione dei veicoli elettrici, inoltre, ha ridotto ulteriormente la componente rumorosa associata al funzionamento del motore dell'autoveicolo [2]. Per questo motivo, il monitoraggio del rumore da rotolamento costituisce uno dei campi di ricerca più attivi nell'ambito dell'acustica ambientale.

Il metodo più utilizzato per la valutazione dell'impatto acustico del rumore da rotolamento è costituito dal metodo standardizzato CPX [3] (*"Close proximity method"*) che consiste nella misurazione dei livelli acustici nell'immediata vicin-

anza della zona di contatto tra lo pneumatico e la pavimentazione stradale.

In tempi recenti, è stato proposto un nuovo metodo per l'esame del rumore da rotolamento, basato sull'analisi dei segnali di rumore acustico misurati all'interno della cavità dello pneumatico (metodo TCN [4], *"Tire cavity noise"*). Alcuni studi recenti [5] hanno evidenziato una forte correlazione tra i livelli CPX a basse frequenze (dove la componente di rumore influenzata dalle vibrazioni dello pneumatico causate dall'interazione con la pavimentazione risulta dominante) e livelli TCN a basse frequenze. Ricerche analoghe hanno permesso di evidenziare una simile correlazione tra lo spettro TCN e lo spettro della tessitura stradale [6], valutato considerando la limitata deformabilità dello pneumatico, facendo riferimento alla descrizione di tale fenomeno fornita dalla formula di enveloping di Clapp [7] riportata in equazione (1).

$$\frac{\pi E u(x)}{2(1-\nu^2)} + c_0 = - \int_a^b p(\epsilon) \ln|\epsilon - x| d\epsilon \quad (1)$$

Nell'equazione  $E$  indica il modulo di Young dello pneumatico,  $\nu$  il suo coefficiente di Poisson,  $u(x)$  la deformazione dello pneumatico nella zona di contatto, valutata lungo la direzione longitudinale;  $p(\epsilon)$  il campo di pressione in prossimità della zona di contatto, valutato lungo la direzione longitudinale;  $a$  e  $b$  indicano gli estremi di tale area.

Tali indagini sembrano suggerire la possibilità di ricavare informazioni rilevanti sullo stato della tessitura stradale a partire da segnali TCN, valutati nell'intervallo delle basse frequenze (100-1000 Hz), dove la correlazione tra le osservabili risulta significativa [8].

La correlazione così evidenziata tra rumore TCN e tessitura stradale non risulta facilmente modellizzabile da un punto di vista matematico, sebbene un modello correlante la macro-tessitura stradale e il rumore TCN sia stato fornito da J. Pinay et al. [9], i quali hanno ricavato una relazione che lega il  $L_{eq}$ (TCN) ad un indice sintetico per la valutazione delle condizioni stradali (MPD, "Mean profile depth"). In Equazione (2) è riportata la relazione tra il livello di pressione interna e le altre grandezze fisiche rilevanti per la sua valutazione.

$$L_{TCN} = a + b * \log(v) + cMPD + dF_{load} + ep \quad (2)$$

Nell'equazione precedente  $v$  indica la velocità del veicolo,  $MPD$  la Mean profile depth della pavimentazione,  $F_{load}$  il carico verticale associato alla ruota in esame e  $p$  la pressione di gonfiaggio dello pneumatico. I parametri  $a$ ,  $b$ ,  $c$ ,  $d$  ed  $e$  sono coefficienti di regressione.

Nel 2022, tuttavia, uno studio condotto da Schiaffino et al. [10] ha dimostrato come metodi di classificazione basati sul machine learning possano essere utilizzati ai fini della classificazione delle condizioni del manto stradale, ottenendo risultati incoraggianti.

Nel presente lavoro, è stata valutata la possibilità di sviluppare sistemi di riconoscimento dello stato della pavimentazione stradale a partire da segnali TCN basati sulle recenti tecniche di deep learning. Sono state quindi sviluppate tre diverse architetture, le quali sono state applicate ad un problema di classificazione a tre classi.

## 2 | Metodi

### 2.1 | Apparato sperimentale

Le misurazioni sono state effettuate attraverso un laboratorio mobile equipaggiato con la seguente strumentazione:

- I. una videocamera GoPro, per l'acquisizione di rilievi video;
- II. un encoder rotativo, connesso alla ruota posteriore sinistra, capace di inviare 20 segnali impulsivi per giro, utilizzato per la valutazione della distanza percorsa e della velocità del veicolo;
- III. un accelerometro, connesso alla medesima scheda di acquisizione per l'encoder, capace di misurare le vibrazioni trasmesse dai dissesti stradali al veicolo;

IV. un sensore TCN, costituito da un microfono a condensatore connesso ad un microcontroller Raspberry Pi Zero. Tale strumento permette la misurazione dei segnali di rumore all'interno dello pneumatico e l'invio dei file wav al computer di bordo mediante una porta Wi-Fi.

I dati relativi alla posizione sono stati inoltre monitorati tramite i sensori GPS presenti nei telefoni cellulari, in maniera tale da permettere una geolocalizzazione dei risultati di misura. I segnali di pressione acustica TCN sono stati acquisiti ad una frequenza di campionamento di 16kHz.

I segnali sono stati sincronizzati con l'ausilio di un dosso artificiale, rilevabile distintamente da tutti gli strumenti coinvolti nel processo di misura. In questo modo è stato possibile rapportare tutti i segnali acquisiti alla medesima base temporale, in modo tale da associare a ciascun segnale audio un'informazione sulla condizione della relativa pavimentazione, ottenuta a partire dal rilievo video.

I siti di misura sono stati selezionati valutando la possibilità di acquisire dati relativi a sezioni omogenee e estese di pavimentazioni in diverse condizioni. Le condizioni di traffico sono state inoltre valutate, poiché, affinché i dati potessero essere considerati rappresentativi, le misure effettuate a velocità minori di 30 km/h o in presenza di forti accelerazioni o decelerazioni sono state scartate. Le misure, infine, sono state effettuate in condizioni meteorologiche favorevoli durante la fascia serale (19-22) del periodo estivo (luglio-agosto 2022), su pavimentazioni asciutte.

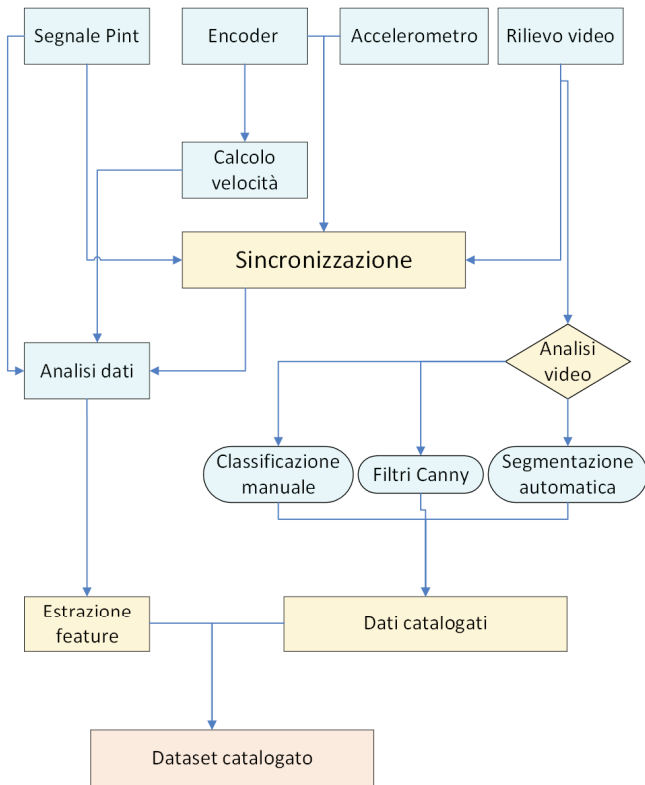
### 2.2 | Creazione del ground truth data set

I dati acquisiti durante le campagne di misura sono stati in seguito suddivisi in segmenti da 1s ciascuno, i quali sono stati utilizzati per la creazione di un dataset di ground truth, contenente segnali classificati utilizzabili per l'allenamento di un classificatore. In Figura 1 è riportata una rappresentazione schematica della metodologia sperimentale

I dati così ottenuti sono stati suddivisi in tre classi distinte: una relativa a pavimentazioni in buone condizioni ("good"), una relativa a superfici danneggiate ("bad") e una relativa a tessiture contenenti uno specifico tipo di ammaloramento ("pothole"), definita come una buca di forma approssimativamente circolare di diametro superiore ai 100 mm [11]. Attraverso tale processo di classificazione, è stato possibile selezionare un data set di 2850 campioni (950 per ciascuna classe), su cui sono state effettuate le operazioni di allenamento e validazione delle reti neurali.

A partire da questi dati, sono stati isolati due diversi data set: un set di allenamento, costituito da 800 campioni per ciascuna classe, e un set di validazione, costituito da 150 campioni per ciascuna classe.

In un secondo momento, è stato realizzato un ulteriore set di dati, utilizzato per testare l'efficienza finale della rete. Tale data set (detto data set di test) è stato realizzato a partire da 150 campioni per ciascuna classe.



**Fig. 1 – Rappresentazione schematica della metodologia sperimentale**  
**Schematic of the experimental methodology**

### 2.3 | Architetture testate

Nel presente lavoro sono state testate tre distinte architetture per la classificazione dei dati audio TCN: una rete LSTM [12] (*Long short term memory network*) e due reti CNN [13, 14] (*Convolutional neural network*). La scelta di queste architetture dipende dai diversi modi possibili in cui i segnali acustici possono essere caratterizzati: le reti LSTM permettono di classificare dati di input rappresentati tramite serie temporali, mentre le reti CNN permettono una classificazione di un segnale a partire da una sua rappresentazione grafica (ad esempio spettrogrammi, spettrogrammi in scala di frequenze Mel e MFCC [15]).

La prima rete CNN è stata progettata per permettere una classificazione a partire dagli spettrogrammi dei segnali (*"SpectNet"*) in ingresso, la seconda è stata invece sviluppata per permettere una classificazione a partire da una caratterizzazione basata sugli MFCC del segnale (*"MFCCNet"*).

## 3 | Risultati

I dati acquisiti durante la campagna di misura sono stati elaborati in modo tale da permettere una caratterizzazione preliminare dei segnali, evidenziandone le proprietà utilizzabili ai fini della classificazione. In particolare, sono state valutate 7 feature spettrali, due tipologie di rappresentazione in tempo

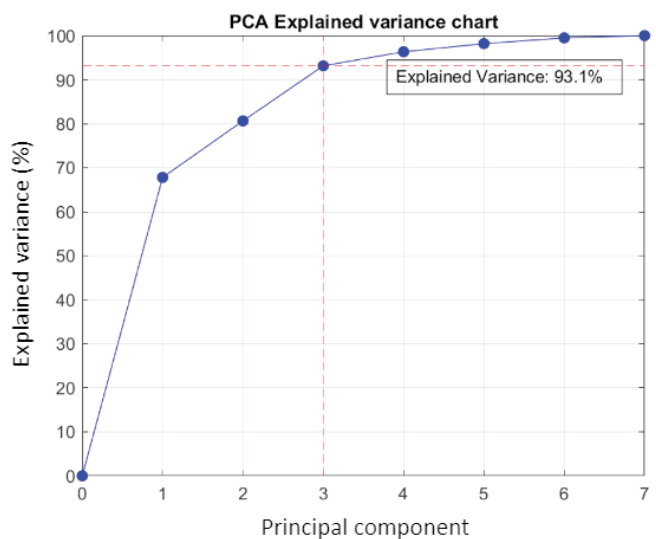
frequenza del segnale (spettrogrammi e spettrogrammi Mel) e l'andamento temporale dei primi 13 coefficienti del *Cepstrum* in scala Mel (MFCC).

### 3.1 | Risultati per l'approccio LSTM

I segnali sono stati descritti tramite delle specifiche caratteristiche relative alla loro rappresentazione nel dominio delle frequenze (feature spettrali). Sono state considerate le seguenti feature [16] nel processo di caratterizzazione del segnale:

- I. i centroidi spettrali;
- II. la deviazione spettrale;
- III. l'acutezza spettrale;
- IV. la curtosi spettrale;
- V. la pendenza spettrale [17];
- VI. il punto di roll-off dello spettro [18];
- VII. l'energia sonora.

Il numero delle feature è stato ulteriormente ridotto mediante l'applicazione della PCA (*Principal Component Analysis*) [19, 20], attraverso la quale sono state definite 3 nuove componenti che sono risultate sufficienti a spiegare più del 90% (il 93.1%) della varianza del data set (Figura 2).



**Fig. 2 – Varianza cumulativa descritta dalle componenti principali**  
**Description of the cumulative variance for the principal components**

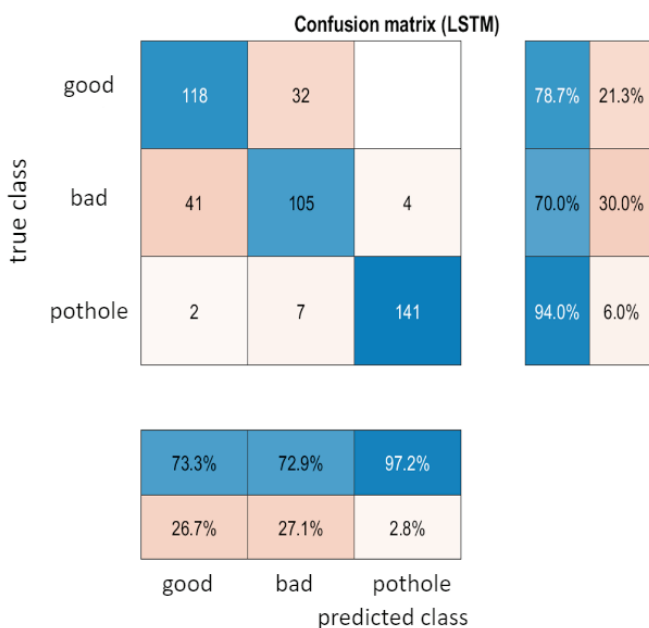
Le feature spettrali possono essere definite su intervalli costituiti da un numero arbitrario di campioni: è quindi possibile ricavare un valore medio della feature in esame sul segnale nella sua interezza (valutato cioè su 16.000 campioni, si ricorda che i segnali esaminati hanno durata pari a 1s e sono stati acquisiti con una frequenza di campionamento di 16kHz). I valori medi sono stati utilizzati per condurre l'analisi preliminare e per ricavare le direzioni di massima varianza tramite PCA; tuttavia, è possibile costruire sequenze temporali relative ai descrittori spettrali riducendo l'intervallo su cui essi vengono valutati. Proiettando questi dati lungo le direzioni di massima varianza definite dalla PCA, è possibile ottenere

tre sequenze temporali che possono essere utilizzate come input per una rete LSTM. La lunghezza dell'intervallo su cui viene valutato il valore delle feature è stato posto uguale a 1024 campioni, con un overlap del 50% (512 campioni) tra un intervallo e il successivo. Su ciascun campione è stata effettuata una finestra di tipo Hamming [21].

In conclusione, il dato di input per il classificatore basato su un'architettura LSTM era costituito da 3 sequenze temporali composte da 30 campioni ciascuna, relative all'andamento temporale delle tre feature ottenute tramite PCA a partire dall'andamento temporale di diversi descrittori spettrali.

La rete LSTM utilizzata è stata addestrata sul data set di allenamento con un learning rate pari a  $10^{-4}$ , su un numero di epoch pari a 100 e un batch size pari a 64, tramite l'algoritmo di ottimizzazione "adam" (Adaptive moment estimator) [22, 23]. In questo modo, è stato possibile ottenere un'accuratezza sul data set di validazione pari al 92.2%. Risultati simili sono stati ottenuti con un numero di epochs pari a 30, un batch size pari a 64 e un learning rate pari a  $10^{-3}$  (accuratezza sul data set di validazione: 90.7%).

I risultati complessivi della rete sono stati infine valutati sul data set di test. L'accuratezza complessiva della rete LSTM sul data set di test è risultata pari a 80.9% (Figura 3). La performance complessiva della rete è stata valutata calcolando i parametri di recall, precisione e F-1 score per ciascuna classe (Tabella 1).



**Fig. 3 – Risultati per una rete LSTM su dati appartenenti al set di test**  
Results of a LSTM network on the test datasets

**Tab. 1 – Indici di qualità per la rete LSTM**  
Quality indices for the LSTM network

|                   | Integra | Dissestata | "Pothole" |
|-------------------|---------|------------|-----------|
| <b>Precisione</b> | 73.3%   | 72.9%      | 97.2%     |
| <b>Recall</b>     | 78.7%   | 70.0%      | 94.0%     |
| <b>F1-Score</b>   | 75.9%   | 71.4%      | 95.6%     |

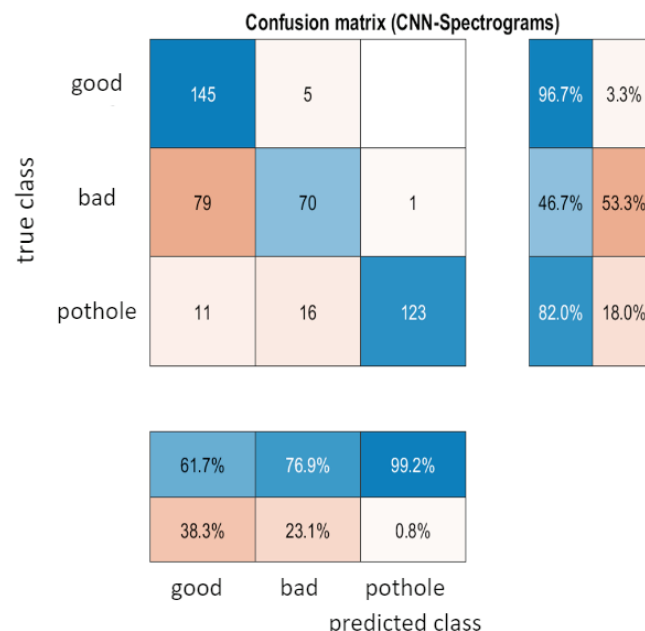
La precisione di una rete neurale è definita come la frazione degli elementi effettivamente appartenenti ad una determinata classe sul totale degli elementi classificati dalla rete come appartenenti a tale classe; il parametro di recall indica invece la frazione degli elementi appartenenti ad una determinata classe che sono stati correttamente classificati dalla rete neurale. Il parametro F-1 score rappresenta la media armonica tra i parametri di precisione e di recall.

### 3.2 | Risultati per un approccio CNN

#### 3.2.1 | Risultati per SpectNet

Una prima CNN è stata proposta per consentire una classificazione della pavimentazione a partire dagli spettrogrammi in frequenze Mel del segnale. Sono state definite 32 bande in frequenza Mel nell'intervallo compreso tra i 100 e i 1000 Hz. I dati audio sono stati rappresentati in tempo-frequenza tramite una matrice numerica di 230 dimensioni  $32 \times 59$ .

Questi dati sono stati utilizzati come input per SpectNet: la rete è stata addestrata su 100 epochs, con un learning rate di 0.01 e un batch size di 64. In questo caso, è stato utilizzato un algoritmo di ottimizzazione di tipo "sgdm" ed è stato possibile ottenere una accuratezza massima sul set di validazione pari al 71.56% (Figura 4). A causa di questa accuratezza significativamente più bassa di quella riportata per la rete LSTM, è stato ricercato un approccio alternativo alla classificazione tramite reti CNN.



**Fig. 4 – Risultati di spectNet sul data set di validazione**  
Results of SpecNET on the validation dataset

In Tabella 2 vengono riportati gli indici di qualità per la rete SpectNet.

**Tab. 2 – Indici di qualità per la rete SpectNet (valutati su data set di validazione)**  
**Quality indices for the SpecNet network (evaluated on the validation dataset)**

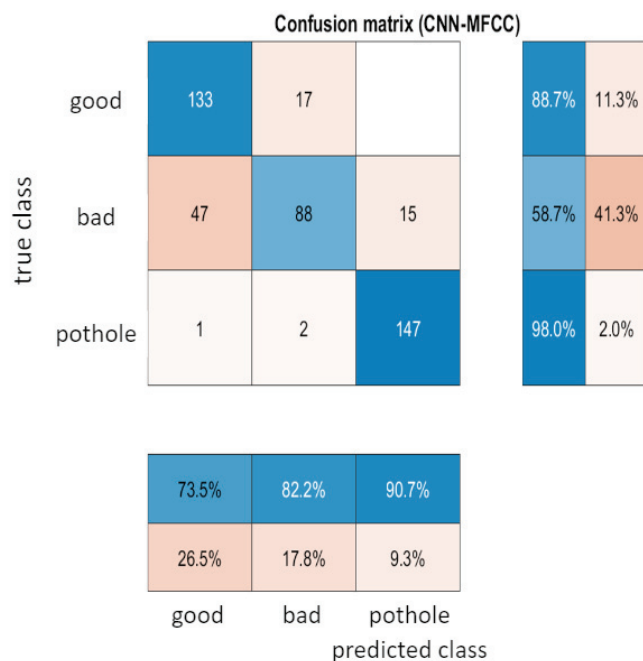
|                   | Integra | Dissestata | “Pothole” |
|-------------------|---------|------------|-----------|
| <b>Precisione</b> | 61.7%   | 76.9%      | 99.2%     |
| <b>Recall</b>     | 96.7%   | 46.7%      | 82.0%     |
| <b>F1-Score</b>   | 75.1%   | 58.1%      | 89.8%     |

### 3.2.2 | Risultati per MFCCNet

Una seconda architettura di tipo CNN è stata proposta. I segnali sono stati caratterizzati attraverso l'andamento temporale dei loro primi 13 MFCC (è stato aggiunto anche l'andamento temporale dell'energia del segnale). Ai fini della classificazione, sono stati utilizzati dati di input in formato matriciale con dimensioni 14×59.

La rete neurale è stata addestrata su un totale di 30 epochs con algoritmo di ottimizzazione di tipo “sgdm”, un batch size di 64 ed un learning rate pari a  $10^{-3}$ . In questo modo è stato possibile ottenere un'accuratezza del 94% sul validation set.

L'accuratezza di MFCCNet sul data set di test è invece risultata essere pari a 81.8% (Figura 5). Anche in questo caso, la performance complessiva del classificatore è stata valutata attraverso i parametri di precisione, recall e F1-score per ciascuna classe (Tabella 3).



**Fig. 5 – Risultati di MFCCNet sul data set di test**  
**Results of MFCCNet on the test dataset**

I risultati ottenuti utilizzando MFCCNet risultano simili a quelli ottenuti con il classificatore di tipo LSTM. Si noti, in particolare, l'elevata performance nel riconoscimento di segnali associati a pavimentazioni che presentano un ammaloramento di tipo “pothole”.

**Tab. 3 – Indici di qualità per la rete MFCCNet**  
**Quality indices for the MFCCNet**

|                   | Integra | Dissestata | “Pothole” |
|-------------------|---------|------------|-----------|
| <b>Precisione</b> | 73.5%   | 82.2%      | 90.7%     |
| <b>Recall</b>     | 88.7%   | 58.7%      | 98.0%     |
| <b>F1-Score</b>   | 80.4%   | 68.5%      | 94.2%     |

## 4 | Conclusioni

Due dei tre classificatori proposti, la rete LSTM e MFCCNet, hanno fornito risultati promettenti su un data set di test (rispettivamente l'80.9% e l'81.8% di accuratezza). In particolare, è stata raggiunta un'ottima precisione nel riconoscimento dei potholes. Al momento, non sono state ancora raggiunte elevate accuratezze per le pavimentazioni in cattivo stato: è importante sottolineare che la classe relativa alle pavimentazioni in cattivo stato comprende segnali relativi a pavimentazioni che presentano diverse tipologie di ammaloramento. Si può ipotizzare che una classe così eterogenea non possa essere descritta adeguatamente mediante i processi di caratterizzazione proposti. Inoltre, è possibile che migliori performance possano essere ottenute aumentando il numero di classi, ovvero dividendo i dati in un numero maggiore di classi caratterizzate da una maggiore omogeneità (data set più specifici), e, dunque, facilmente caratterizzabili. Test su strada potrebbero essere condotti per testare l'effettiva capacità del sistema di classificare il manto stradale in tempo reale.

L'implementazione di sistemi di classificazione basati sui segnali TCN potrebbe portare in futuro alla realizzazione di protocolli efficienti ed economici per il monitoraggio e la manutenzione delle infrastrutture stradali. Inoltre, attraverso la georeferenziazione delle misure, potrebbe essere possibile sviluppare piani d'azione circoscritti a determinate aree di interesse, permettendo interventi tempestivi e riducendo inoltre i costi associati alle operazioni di bonifica stradale.

## Conclusions

Two of the three classifiers proposed in this paper, the LSTM network and MFCCNet provided promising results over a test data set (80.9% and 81.8% accuracy, respectively). In particular, a very high accuracy has been reached in pothole recognition tasks. At the moment, high precision classification performances for degraded pavements have yet to be achieved: it is important to underline that the class associated to degraded road pavements includes signals that are linked to different kinds of road asperities. It is possible to speculate that such a differentiated class could not be adequately described through the proposed methodologies. Moreover, it might be possible to achieve better performances by increasing the number of classes, dividing the data in a greater number of classes, characterized by an increased homogeneity (more specific data sets), and, therefore, more easily describable. Road tests might be conducted in order to assess the effective classification capability of the system in a real time road condition classification task.

The implementation of such TCN-based systems could lead to the development of efficient and cost-effective protocols for the monitoring and maintenance of road infrastructures. Moreover, georeferencing the results might allow for the development of localized action plans, that could lead to timely interventions, all while decreasing the overall associated costs.

## Ringraziamenti

L'autore desidera ringraziare le seguenti persone: i dottori Francesco Bianco, Stefano Carpita, Simon Kanka per il loro puntuale e preciso lavoro di revisione e i professori Gaetano Licitra e Francesco Fidecaro per la loro attenta supervisione. L'autore desidera inoltre ringraziare Ipool srl. per il supporto fornito durante le attività di ricerca e di elaborazione dei dati.

## Glossario

MPD: Mean profile depth.

STM: Long short-term memory network.

CNN: Convolutional neural network.

PCA: Principal component analysis.

Adam: Adaptive moment estimator.

SGDM: Stochastic gradient descent with momentum.

MFCC: Mel frequency cepstral coefficients.

MFCCNet: Rete neurale convoluzionale che permette di classificare suoni sulla base di una rappresentazione bidimensionale dell'andamento degli MFCC.

SpectNet: Rete neurale convoluzionale che permette di classificare suoni mediante i loro spettrogrammi.

## Bibliografia

- [1] G. Bitelli, A. Simone, F. Girardi, C. Lantieri, Laser scanning on road pavements: A new approach for characterizing surface texture, *Sensors* 12 (2012) 9110-9128. <https://doi.org/10.3390/s120709110>.
- [2] M.A. Pallas, M. Bérengier, R. Chatagnon, M. Czuka, M. Conter, M. Muirhead, Towards a model for electric vehicle noise emission in the European prediction method CNOSSOS-EU, *Appl. Acoust.* 113 (2016) 89-101. <https://doi.org/10.1016/j.apacoust.2016.06.012>.
- [3] ISO 11819-2:2017 Acoustics - Measurement of the influence of road surfaces on traffic noise - Part 2: The close-proximity method, International Organization for Standardization, Geneva, Switzerland, 2017.
- [4] J. Masino, B. Daubner, M. Frey, F. Gauterin, Development of a tire cavity sound measurement system for the application of field operational tests, in: 10<sup>th</sup> Annual International Systems Conference, SysCon 2016 - Proceedings, Institute of Electrical and Electronics Engineers Inc., Orlando, FL, 2016: 7490624. <https://doi.org/10.1109/SYSCON.2016.7490624>.
- [5] L.G. Del Pizzo, F. Bianco, A. Moro, G. Schiaffino, G. Licitra, Relationship between tyre cavity noise and road surface characteristics on low-noise pavements, *Transport. Res. D-Tr. E.* 98 (2021) 102971. <https://doi.org/10.1016/j.trd.2021.102971>.
- [6] ISO 13473-3:2002 Acoustics - Characterization of pavement texture by use of surface profiles, International Organization for Standardization, Geneva, Switzerland, 2002.
- [7] P. Klein, J.F. Hamet, Road texture and rolling noise: an envelopment procedure for tire-road contact, 2004, 17p. hal-00546120.
- [8] A. Del Pizzo, Analysis of Tyre Rolling Noise on Low Noise Pavements, PhD Thesis, University of Pisa, Italy, 2021.
- [9] J. Pinay, H. J. Unrau, F. Gauterin, Prediction of close-proximity tire-road noise from tire cavity noise measurements using a statistical approach, *Appl. Acoust.* 141 (2018) 293-300. <https://doi.org/10.1016/j.apacoust.2018.07.023>.
- [10] G. Schiaffino, L. G. Del Pizzo, S. Silvestri, F. Bianco, G. Licitra, F.G. Pratico, Machine learning techniques applied to road health status recognition through tyre cavity noise analysis, *J. Phys. Conf. Ser.* 2162 (2022) 012011. <https://doi.org/10.1088/1742-6596/2162/1/012011>.
- [11] Bollettino ufficiale della regione Lombardia - 1° supplemento straordinario. Allegato B, D.g.r. 25 gennaio 2006 - n. 8/1790 (in Italian).
- [12] S. Hochreiter, J. Schmidhuber, Long short-term memory, *Neural Comp.* 9 (1997) 1735-1780. <https://doi.org/10.1162/neco.1997.9.8.1735>.
- [13] Z. Li, F. Liu, W. Yang, S. Peng, J. Zhou, A survey of convolutional neural networks: analysis, applications, and prospects, *IEEE T. Neur. Net. Lear.* 33 (2021) 6999-7019. <https://doi.org/10.1109/TNNLS.2021.3084827>.
- [14] K. Fukushima, S. Miyake, Neocognitron: A self-organizing neural network model for a mechanism of visual pattern recognition, in: Amari, Si., Arbib, M.A. (eds) *Competition and Cooperation in Neural Nets. Lecture Notes in Biomathematics*, vol 45. Springer, Berlin, Heidelberg: pp. 267-285. [https://doi.org/10.1007/978-3-642-46466-9\\_18](https://doi.org/10.1007/978-3-642-46466-9_18).
- [15] S. Davis, P. Mermelstein, Comparison of parametric representations for monosyllabic word recognition in continuously spoken sentences, *IEEE T. Acoust. Speech.* 28 (1980) 357-366. <https://doi.org/10.1109/TASSP.1980.1163420>.
- [16] G. Peeters, A large set of audio features for sound description (similarity and classification) in the CUIDADO project, CUIDADO Project Report, 2004.
- [17] A. Lerch, An introduction to audio content analysis: Applications in signal processing and music informatics, Wiley-IEEE Press, Hoboken, NJ, 2012.
- [18] E. Scheirer, M. Slaney, Construction and evaluation of a robust multifeature speech/music discriminator, in: *Proceedings of the 1997 IEEE International Conference on Acoustics, Speech, and Signal Processing, ICASSP. Part 1 (of 5)*, Institute of Electrical and Electronics Engineers, 1997: pp. 1331-1334.
- [19] D.S. Wilks, *Statistical methods in the atmospheric sciences*, 3<sup>rd</sup> ed., Academic Press, Oxford, UK; Amsterdam, The Netherlands; Waltham, MA; San Diego, CA, 2011.
- [20] S. Raschka, *Python machine learning*, 2<sup>nd</sup> ed., Packt Publishing Ltd, Birmingham, UK, 2015.
- [21] Y. Wang, S. Ji, H. Xu, Non-stationary signals processing based on STFT, in: *2007 8<sup>th</sup> International Conference on Electronic Measurement and Instruments, ICEMI*, Xi'an, China, 2007: pp. 3301-3304. <https://doi.org/10.1109/ICEMI.2007.4350914>.
- [22] J. Pomerat, A. Segev, R. Datta, On neural network activation functions and optimizers in relation to polynomial regression,



in: Proceedings - 2019 IEEE International Conference on Big Data, Big Data 2019, Institute of Electrical and Electronics Engineers Inc., Los Angeles, CA, 2019: pp. 6183-6185. <https://doi.org/10.1109/BigData47090.2019.9005674>.

[23] Z. Zhang, Improved Adam optimizer for deep neural networks, in: 2018 IEEE/ACM 26<sup>th</sup> International Symposium on Quality of Service, IWQoS 2018, Institute of Electrical and Electronics Engineers Inc., Banff, Canada, 2018: pp. 1-2. <https://doi.org/10.1109/IWQoS.2018.8624183>.



# 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/m<sup>2</sup>, 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  $\theta$ , 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  $\alpha$ , 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 ( $\approx 343$  m/s)

$\alpha$  = Costante geometrica del reticolo

$\theta$  = Angolo dell'onda incidente

La legge di Bragg esprime in sostanza la condizione affinché l'interferenza tra le onde diffrante 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

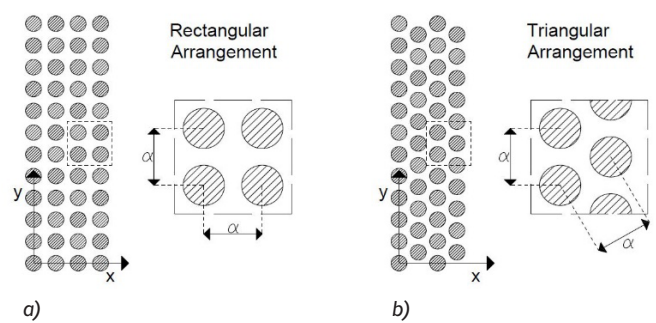
L'attenuazione sonora fornita dalla barriera acustica, calcolata in dB, è valutata quindi come differenza tra i livelli di pressione sonora medi misurati con e senza la barriera a cristalli sonici. L'*IL* avviene ogni volta che si inserisce un elemento di disturbo all'interno di una linea di trasmissione. 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  $\alpha$  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

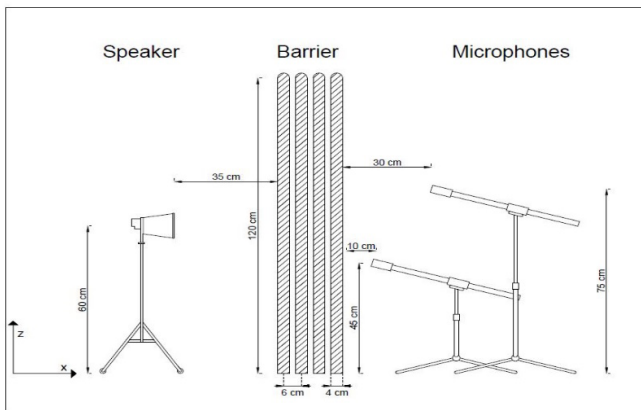
Le barriere composte da cristalli sonici che sono state testate in laboratorio presentano due tipi di configurazioni geometriche in pianta, barriere con distribuzione degli scatterers in pianta geometrica rettangolare e triangolare. In entrambi i tipi di disposizioni, gli scatterers, che sono costituiti 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  $\alpha$  in entrambe le geometrie pari a 5,5 cm.



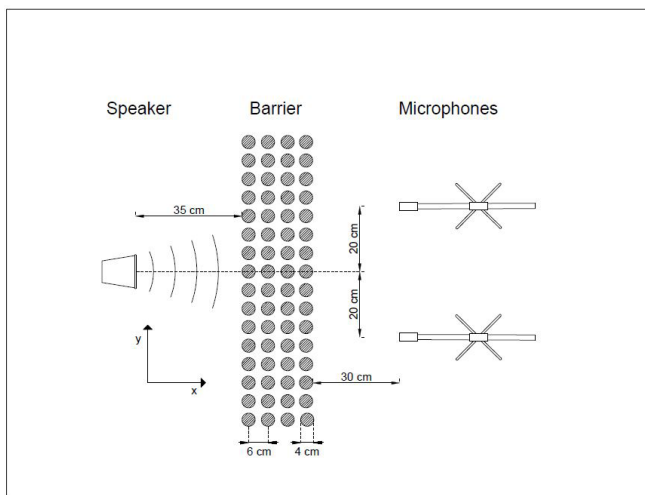
**Fig. 1 – Differenti disposizioni geometriche in pianta: disposizione rettangolare a) e triangolare b)**  
**Different geometric arrangements in plan: rectangular arrangement a) and triangular b)**

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*

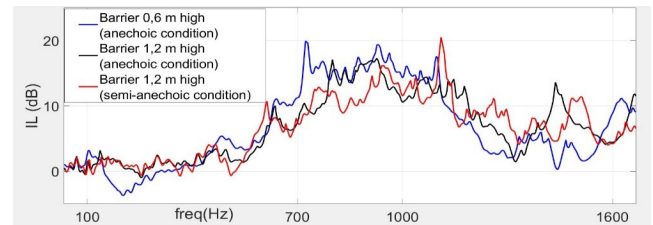


**Fig. 3 – Disposizione in pianta dei test in laboratorio**  
*Layout of laboratory tests*

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.

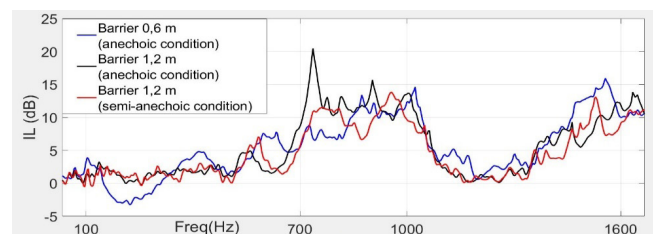
### 3.2 | Risultati della prova in laboratorio

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.

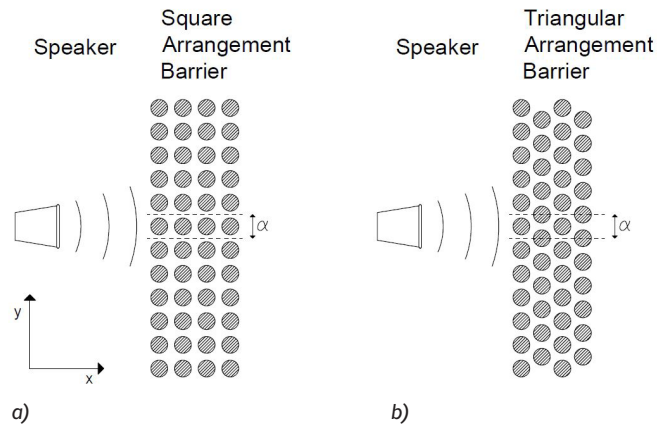
#### 4 | Metodo numerico

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.

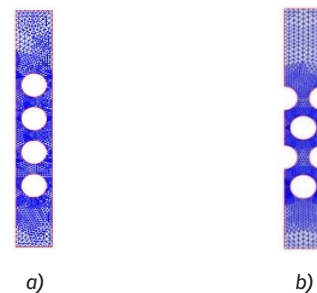
La porzione di spazio così delimitata è un rettangolo largo quanto la costante reticolare  $\alpha$  e lungo quanto la distanza tra lo speaker e i microfoni (Fig. 6). In questo modo è stato possibile considerare l'onda incidente come un'onda piana, come effettivamente si verifica nel caso reale. Le misure 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)**

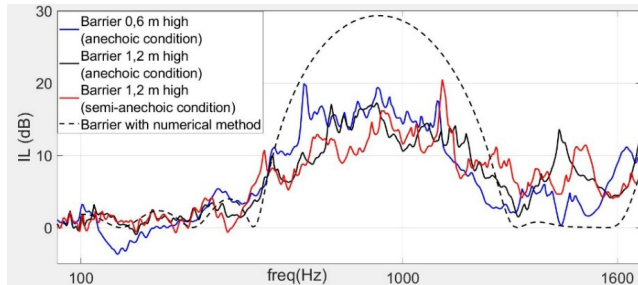
Nei lati corti dell'area rettangolare così creata sono state disposte le configurazioni al contorno di air impedance, che rappresenta l'opposizione che esercita l'aria alla propagazione del flusso sonoro, mentre nei lati paralleli alla direzione del flusso sonoro, cioè i lati più lunghi del rettangolo, 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)**

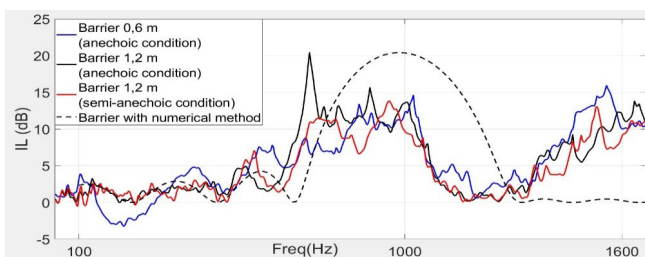
## 5 | Confronto del metodo sperimentale e del metodo numerico

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  $\alpha$  e la frazione di riempimento *ff*.

**Tab. 1 – Valori di Insertion Loss, del band gap, dei diametri, della costante reticolare  $\alpha$  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  $\alpha$  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] | $\alpha$ [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] | $\alpha$ [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



# Indagine sull'ambiente sonoro in alcune aree alpine della Valle d'Aosta

Giovanni Brambilla<sup>a\*</sup> | Christian Tibone<sup>b</sup> | Filippo Berlier<sup>b</sup> | Christian Tartin<sup>b</sup> |  
Daniele Crea<sup>b</sup> | Marco Cappio Borlino<sup>b</sup>

<sup>a</sup> CNR-STEMS, sede di Ferrara,  
Via Canal Bianco, 28, 44124 Ferrara

<sup>b</sup> Agenzia Regionale per la Protezione  
dell'Ambiente della Valle d'Aosta,  
loc. La Maladière, 48,  
11020 Saint-Christophe (AO)

\* Autore di riferimento:  
giovanni.brambilla@stems.cnr.it

**Ricevuto:** 6/3/2023

**Accettato:** 16/6/2023

**DOI:** 10.3280/ria2-2023oa15535

**ISSN:** 2385-2615

Con l'emanazione a maggio 2022 del Decreto del Ministero della Transizione Ecologica (MITE) sulla "Definizione delle modalità per l'individuazione e la gestione delle zone silenziose di un agglomerato e delle zone silenziose in aperta campagna" anche in Italia si vuole dare un impulso alla promozione delle aree quiete e alla conservazione della qualità acustica dell'ambiente laddove questa sia buona.

In Valle d'Aosta, regione alpina caratterizzata e apprezzata per i suoi alti valori di naturalità ambientale, con vaste aree disabitate e lontane da sorgenti sonore non naturali, si osserva una grande varietà di livelli di rumore ambientale sia per effetto delle sorgenti sonore naturali che di quelle legate alle attività umane, prevalentemente a connotazione turistico-sportiva.

Il presente lavoro analizza i risultati dei rilievi fonometrici eseguiti in aree rurali in aperta campagna nel comune di Chamois in tre differenti stagioni dell'anno: estate, autunno e inverno. In tali periodi il paesaggio sonoro caratterizzato prevalentemente dai suoni naturali può cambiare per effetto del rumore antropico prodotto dalle attività sportive (mountain bike e trail in estate, sci in inverno), turistiche (escursionismo), agricole (generatori elettrici, motoseghe, trattori, ...) che emerge in maniera più o meno evidente dal rumore di fondo di origine naturale.

In particolare, nei contesti a basso rumore di fondo, assai frequenti nelle aree esaminate, l'impatto di singoli eventi sonori è particolarmente rilevante ed è stato valutato mediante i descrittori acustici "Intermittency Ratio (IR)" e "Harmonica (HRM)". In merito a quest'ultimo indice, si è osservato che la sua applicazione ad aree molto quiete può presentare delle criticità.

Si è proceduto anche ad una classificazione statistica dei rilievi acustici su base oraria a supporto della gestione del territorio.

**Parole chiave:** aree alpine, ambiente sonoro, descrittori acustici

## Survey on the sonic environment in some alpine areas of Aosta Valley

In May 2022 the Decree of the Ministry of Ecological Transition (MITE) on "Definition of the modalities for the identification and management of quiet areas inside agglomerations and in the countryside" would give a boost to the promotion of quiet areas and the preservation of the environment acoustic quality where it is already good.

In Aosta Valley, an alpine region characterized and appreciated for its high values of natural environment, with large uninhabited areas and far from non natural sound sources, a wide variety of ambient noise levels are observed, both as a result of natural sound sources and those related to human activities, mainly with a sporting-tourist feature.

This paper analyses the results of previous sound surveys carried out in rural areas in the countryside of the Chamois Municipality in three different seasons, namely summer, autumn and winter. In such periods the acoustic environment, characterized mainly by the natural sounds, can change due to the noise produced by man-made sports (mountain biking and trail in summer, skiing in winter), tourism (hiking), agricultural activities (electric generators, chainsaws, tractors, ...) which emerges more or less clearly from the background natural noise.

In particular, in low background noise contexts, very frequent in the areas examined, the impact of individual sound events is particularly important and has been evaluated using the acoustic descriptors "Intermittency Ratio (IR)" and "Harmonica (HRM)". With regard to the latter index, it has been observed that its application to very quiet areas may present critical issues. A statistical classification of the hourly acoustic data was also performed to support the land management.

**Keywords:** alpine areas, sonic environment, acoustic descriptors

## 1 | Introduzione

Tra le varie finalità della direttiva europea 49/2002/CE (END) [1] è da sottolineare l'importanza di avere introdotto la tutela delle aree quiete sia negli agglomerati che nelle aree extraurbane. L'attenzione nei confronti delle aree quiete è in aumento, essendo queste minacciate dal crescente inquinamento acustico e dalla sua pervasività [2]. Lo dimostrano i vari rapporti della Agenzia Europea dell'Ambiente (EEA) [3,4] che ha messo a punto anche specifiche metodologie per quantificare il descrittore "Quietness Suitability Index (QSI)" [2], con valori compresi tra 0 e 1, ottenuto come combinazione dei valori limite di rumore (mappe isolivello richieste dalla END), l'utilizzo del suolo e gli elementi di copertura del suolo percepiti come positivi e di solito legati alla costruzione culturale umana della naturalezza.

In ottemperanza alla direttiva, a maggio 2022 è stato pubblicato il Decreto del Ministero della Transizione Ecologica (MITE) sulla "Definizione delle modalità per l'individuazione e la gestione delle zone silenziose di un agglomerato e delle zone silenziose in aperta campagna, in ottemperanza al comma 10-bis, articolo 4 del decreto legislativo 19 agosto 2005, n. 194" [5] con il quale si intende dare un impulso alla promozione delle aree quiete e alla conservazione della qualità acustica dell'ambiente laddove questa sia buona.

È opportuno sottolineare che con il termine "quiete" si indica una condizione di tranquillità ambientale che potenzialmente contribuisce e promuove il riposo del corpo, o che dà serenità allo spirito e, non necessariamente, corrispondente al silenzio. In questa ottica il termine "zone silenziose", ripreso nella normativa italiana, sembra essere fuorviante, o comunque poco appropriato. Al conseguimento della condizione di quiete, o "calma", può concorrere, infatti, la presenza di suoni desiderati, quali quelli naturali dovuti alla biofonia (suoni creati dagli organismi viventi quali insetti, uccelli, ecc.) e alla geofonia (suoni dell'ambiente come per esempio il vento, l'acqua, ecc.). Questi suoni, infatti, risultano molto più accettabili di quelli tecnologici e antropici.

L'importanza delle aree quiete e la necessità di una loro efficace tutela e promozione è ampiamente riconosciuta, non solo a livello legislativo. Queste aree, che a prima vista possono sembrare un vincolo allo sviluppo del territorio, in realtà costituiscono una occasione imperdibile per valorizzare il territorio, tutelandone la biodiversità e incentivando modalità di turismo ecosostenibili. Un contributo al riguardo può essere già rappresentato dalle aree inserite nella rete "Natura 2000" [6], lo strumento della politica dell'Unione Europea per la conservazione della biodiversità, istituito ai sensi della Direttiva 92/43/CEE "Habitat" e s.m.i. [7], per garantire il mantenimento a lungo termine degli habitat naturali e delle specie di flora e fauna minacciati o rari a livello comunitario. La rete "Natura 2000" è costituita dai Siti di Interesse Comunitario (SIC), identificati dagli Stati Membri e successivamente designati quali Zone Speciali di Conservazione (ZSC), comprendendo anche le Zone di Protezione Speciale (ZPS). Le aree individuate non sono riserve rigidamente protette dove le attività umane sono escluse, bensì si intende garantire la protezione

della natura e il mantenimento di un equilibrio tra questa e le attività antropiche. Secondo l'analisi dell'Agenzia Europea dell'Ambiente (EEA) [4], circa il 27% dei siti protetti di Natura 2000 in Europa presenta ampie zone di tranquillità, mentre il 20% è potenzialmente esposto all'inquinamento da rumore. In Italia, i SIC, le ZSC e le ZPS coprono complessivamente circa il 19% del territorio terrestre nazionale e quasi il 4% di quello marino.

Tra i requisiti non acustici introdotti dal Decreto del MITE per l'individuazione delle zone silenziose in aperta campagna, siano esse esistenti o pianificate, è indispensabile la loro accessibilità e pubblica fruizione. Per svolgere l'essenziale finalità di ristoro, almeno temporaneo, dagli effetti nocivi dell'esposizione al rumore sulla salute umana è necessario che all'interno di tali aree, caratterizzate da un'accentuata naturalità, siano impediti aumenti del rumore ambientale al fine di perseguire e conservare la loro buona qualità acustica.

In questo contesto si inserisce il presente lavoro che ha preso spunto da un'indagine sull'ambiente sonoro in alcune località alpine della Valle d'Aosta ad accentuata connotazione turistica e sportiva [8]. In particolare, l'analisi dei dati acustici disponibili è stata orientata alle seguenti finalità:

- valutare la variabilità stagionale dell'ambiente sonoro in relazione anche alle diverse attività antropiche svolte;
- individuare e caratterizzare gli eventi sonori mediante l'indicatore "Intermittency Ratio (IR)" e confrontarlo con la componente degli eventi sonori EVT dell'indice Harmonica (HRM) in contesti a basso rumore di fondo, assai frequenti in aree naturali a bassa o nulla antropizzazione;
- valutare la criticità dell'applicazione dell'indice Harmonica (HRM) nei contesti suddetti, parzialmente risolvibile con una riformulazione dell'indice stesso;
- classificare su base statistica dei dati acustici orari a supporto della eventuale scelta di interventi di gestione delle attività sul territorio finalizzati a ridurre l'impatto acustico.

L'approccio metodologico utilizzato per le questioni affrontate è di qualche interesse per una sua possibile estensione ad altre aree quiete naturali extraurbane.

## 2 | L'area di indagine

L'indagine acustica ha riguardato tre aree ubicate nel territorio del Comune di Chamois in Valle d'Aosta, noto per l'attenzione verso un turismo a mobilità dolce e inserito tra i Comuni "Perle delle Alpi". Chamois è, infatti, l'unico Comune italiano sulla terraferma ove non circolano automobili e, pertanto, raggiungibile solo a piedi, in bicicletta o attraverso la funivia che parte dal fondovalle.

In particolare, sono stati esaminati i dati acustici rilevati nel centro abitato di Chamois e nel territorio a nord, ossia la parte intermedia (lago di Lod) e quella alta (Teppa), vocato agli sport invernali, ma anche sede di altre attività, agricole di alpeggio (transumanza estiva) e turistiche (trekking, escursioni in bicicletta...) nelle altre stagioni.

Il monitoraggio acustico, eseguito sia su periodi prolungati che su periodi più brevi, è stato condotto in tre diverse stagioni (estate, autunno e inverno) e ha permesso di raccogliere un consistente insieme di dati: 455 ore di rilevamento continuo non presidiato e 75 rilievi presidiati da 10 minuti ciascuno.

## 2.1 | Metodologia dei rilievi fonometrici

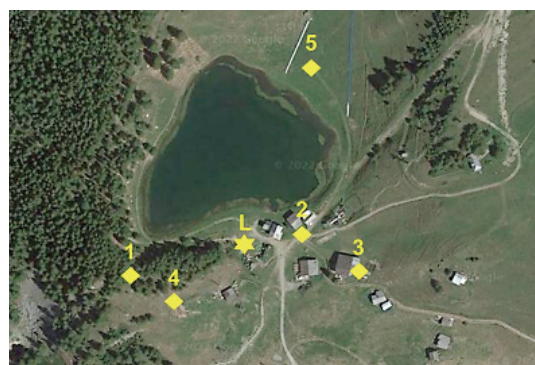
Nella Tabella 1 sono riportati i dati principali riguardanti i siti di misura prescelti nelle tre aree del Comune e il numero di ore di monitoraggio acustico continuo non presidiato di lungo periodo (L), eseguito nelle tre stagioni di estate (E), autunno (A) e inverno (I), indicati nella Figura 1. Il microfono è stato posizionato ad altezze dal suolo variabili da 2 a 4 m in funzione del sito, ma mantenuto alla stessa altezza nelle tre differenti stagioni.

**Tab. 1 – Località per il monitoraggio acustico non presidiato di lungo periodo L**  
**Locations of unattended long-term (L) environmental noise monitoring**

| Località | Descrizione                                     | Stagione | Durata del monitoraggio [ore] |
|----------|---|----------|-------------------------------|
| Chamois  | Municipio, piazza principale del centro abitato | E        | 45                            |
|          |   | A        | 46                            |
|          |   | I        | 24                            |
| Lod      | Stazione di arrivo della seggiovia da Chamois   | E        | 43                            |
|          |   | A        | 22                            |
|          |   | I        | 95                            |
| Teppa    | Stazione intermedia della seggiovia             | E        | 41                            |
|          |   | A        | 44                            |
|          |   | I        | 95                            |



(a)



(b)



(c)

**Fig. 1 – Punti di misura prescelti: (a) centro abitato di Chamois (1819 m s.l.m.), (b) lago di Lod (2029 m s.l.m.), (c) Teppa (2248 m s.l.m.). Rilevamento prolungato (L), simbolo stella; rilevamenti presidiati (codice numerico), simbolo rombo. Immagini aeree da geonavigatore cartografico SCT della Regione Valle d'Aosta**  
**Selected measurement points: (a) Chamois built-up area (1819 m above sea level), (b) Lod lake (2029 m above sea level), (c) Teppa (2248 m above sea level). Long-term monitoring (L), star symbol; attended short-term monitoring (numbers), diamond symbol. Aerial views from cartographic geonavigator of Aosta Valley Region**

Durante i monitoraggi acustici non presidiati di lungo periodo (L) si è proceduto anche a rilievi presidiati di breve periodo (10 minuti) nei siti maggiormente antropizzati e indicati con codice numerico nella Figura 1, con esclusione della località Teppa in cui, essendo un'area più remota, i livelli rilevati nella postazione fissa sono stati considerati significativi di tutta l'area circostante. I rilievi brevi, ripetuti per tutte le tre stagioni (Tab. 2), sono stati eseguiti in 4 diverse fasce orarie per tracciare, per quanto possibile, la variabilità dei livelli sonori nell'arco della giornata.

**Tab. 2 – Località e punti di misura presidiati di breve periodo (10 minuti)**  
**Locations and attended short-term measurement points (10 minutes)**

| Località | Punto di misura | Descrizione del sito                    | N. intervalli di monitoraggio da 10 minuti |   |   |
|----------|-----------------|---|--|---|---|
|          |                 |   | Stagione                                   |   |   |
|          |                 |   | E  | A | I |
| Chamois  | 1               | Centro dell'abitato, strada verso Lod   | 4  | 4 | 4 |
|          | 2               | Strada rurale verso La Magdeleine       | 4  | 4 | 4 |
|          | 3               | Terrazza panoramica, funivia            | 4  | 4 | 4 |
|          | 4               | Ingresso cimitero, funivia              | 4  | 4 | 4 |
| Lod      | 1               | Area picnic prossima al lago            | 2  | 2 | 2 |
|          | 2               | Area centrale tra le baite              | 2  | 2 | 2 |
|          | 3               | Terrazza panoramica su Chamois          | 2  | 2 | 2 |
|          | 4               | Cortile di una baita vicino a seggiovia | 2  | 2 | 2 |
|          | 5               | Sentiero vicino al lago                 | 1  | 1 | 1 |

I rilievi di breve periodo sono stati eseguiti con cielo prevalentemente sereno e con assenza di precipitazioni atmosferiche e di vento sostenuto. Nel periodo invernale in tutti i siti di misura il suolo era abbondantemente ricoperto di neve.

In tutti i rilievi il microfono è stato posizionato a circa 1,5 m dal suolo in accordo con l'ipotetica posizione di una persona. La Figura 2 illustra due esempi di siti di misura scelti in località Lod, mentre la Tabella 3 riassume il numero e la durata di tutti i monitoraggi acustici effettuati.



(a)



(b)

**Fig. 2 – Esempi di punti di misura scelti in località Lod:**  
**(a) monitoraggio non presidiato di lungo periodo (L),**  
**(b) monitoraggio presidiato di breve periodo**

**Examples of measurement points selected at Lod location:**  
**(a) unattended long-term monitoring (L),**  
**(b) attended short-term monitoring**

**Tab. 3 – Località e numero di ore complessive di monitoraggio acustico**

**Locations and overall hours of environmental noise monitoring**

| Località   | N. rilievi prolungati non presidiati | N. ore monitoraggio prolungato | N. rilievi brevi (10') presidiati | N. ore monitoraggio breve |
|--|--------------------------------------|--------------------------------|-----------------------------------|---------------------------|
| Centro abitato (1819 m s.l.m.)                       | 3                                    | 115                            | 48                                | 8                         |
| Lod (lago) area sciistica intermedia (2029 m s.l.m.) | 3                                    | 160                            | 27                                | 4,5                       |
| Teppa area sciistica alta (2248 m s.l.m.)            | 3                                    | 180                            | /                                 | /                         |

Per completezza la Tab. 4 riporta le distanze dal punto di misura delle sorgenti sonore presenti nelle aree di monitoraggio e nell'ultima colonna a destra la classe della zonizzazione acustica assegnata e quella attribuita a livello stagionale. Tale opportunità è prevista dalla normativa regionale della Valle d'Aosta per la classificazione acustica di aree interessate dalla frequentazione turistica in particolari momenti dell'anno e, a questo fine, appositamente dotate di specifiche infrastrutture.

**Tab. 4 – Distanza [m] dalle principali sorgenti sonore presenti nell'area di monitoraggio**

**Distance [m] from main sound sources present in the monitoring area**

| Località          | Punto di misura | Luoghi di aggregazione               | Impianti di risalita segg./ funivia | Strade (SR=Strada Regionale) | Alpelli  | Torrenti/laghi               | Classe zonizzazione (classe stagionale) |
|-------------------|-----------------|--------------------------------------|-------------------------------------|------------------------------|--|------------------------------|---|
| Chamois (abitato) | L               | 20-30                                | 60-120                              | 1350 da SR                   | Presenza di aziende agricole fisse nel villaggio | 150 da torrente              | IV (IV)                                 |
|                   | 1               | 70                                   | 115-185                             | 1430 da SR                   |  | 195 da torrente              | IV (IV)                                 |
|                   | 2               | 40                                   | 180-240                             | 1490 da SR                   |  | 140 da torrente              | IV (IV)                                 |
|                   | 3               | 20                                   | 85-25                               | 1250 da SR                   |  | 155 da torrente              | IV (IV)                                 |
|                   | 4               | 100                                  | 80-140                              | 1190 da SR                   |  | 230 da torrente              | III (III)                               |
| Lod (lago)        | L               | 65                                   | 30 da arrivo seggiovia              | 1400 da SR                   | 700 (Alpe Charavel-lessaz)                       | 800 da torrente e 50 da lago | IV (IV)                                 |
|                   | 1               | dentro area picnic 155 da ristoranti | 120 da arrivo seggiovia             | 1310 da SR                   | 790 (Alpe Charavel-lessaz)                       | 800 da torrente e 40 da lago | IV (IV)                                 |
|                   | 2               | 10                                   | 35 da arrivo seggiovia              | 1480 da SR                   | 630 (Alpe Charavel-lessaz)                       | 800 da torrente e 30 da lago | IV (IV)                                 |
|                   | 3               | 30                                   | 90 da arrivo seggiovia              | 1530 da SR                   | 600 (Alpe Charavel-lessaz)                       | 800 da torrente e 90 da lago | III (III)                               |
|                   | 4               | 40 da picnic 100 ristoranti          | 90 da arrivo seggiovia              | 1350 da SR                   | 770 (Alpe Charavel-lessaz)                       | 770 da torrente e 75 da lago | IV (IV)                                 |
| Teppa             | L               | 30 piste sci                         | 30-100 da seggiovie                 | 2300 da SR                   | 325 (Alpe Glavin)                                | 870 da lago                  | III (IV)                                |
|                   |                 |                                      | 130 (inverno inroulant mezzo)       |                              |  |                              |   |

L'insieme dei dati raccolti nei 12 siti è stato analizzato utilizzando uno script sviluppato nella piattaforma software "R" [9] che, oltre alla importazione dei dati, procede al calcolo dei parametri acustici elencati in Tab. 5 a partire dall'andamento nel tempo dei valori di short  $L_{Aeq}$  con risoluzione temporale di 1 s.



**Tab. 5 – Descrittori acustici calcolati dallo script sviluppato nella piattaforma software “R”**  
**Acoustic parameters computed by the script developed in “R” software platform**

|  |
|--|
| Livello continuo equivalente $L_{Aeq}$ [dB(A)]   |
| Deviazione standard degli short $L_{Aeq,1s}$ [dB(A)]   |
| Livelli percentili $L_{A10}$ , $L_{A90}$ e $L_{A95}$ [dB(A)]                                       |
| Clima di rumore $L_{A10} - L_{A90}$ [dB(A)]  |
| Intermittency Ratio IR [%]   |
| Livello continuo equivalente del percentile LA95 LA95eq [dB(A)] e differenza LA95eq – LA95 [dB(A)] |
| Componente “background noise” BGN in HRM   |
| Componente “event noise” EVT in HRM  |
| Harmonica index HRM  |
| Harmonica modificato HRMc  |

Oltre ai comuni parametri acustici  $L_{Aeq}$  e livelli percentili, l'Intermittency Ratio (IR) è tra i numerosi indici introdotti per descrivere la variabilità nel tempo dei livelli sonori, in particolare quella dovuta agli eventi associati al transito di mezzi di trasporto. È noto, infatti, che il disturbo da rumore dipende non solo dall'entità dell'energia sonora, descrivibile con il livello  $L_{Aeq}$ , ma anche dalle fluttuazioni nel tempo di tale energia, risultando potenzialmente più disturbante, a parità di energia, per i rumori fluttuanti rispetto a quelli stazionari. La formulazione originaria dell'indice IR è [10]:

$$(1) \quad IR = \frac{10^{0.1L_{Aeq,T,events}}}{10^{0.1L_{Aeq,T}}} \cdot 100[\%] \quad [%]$$

ove:  $L_{Aeq,T,events}$  è il livello equivalente complessivo dei soli eventi sonori individuati al di sopra della soglia K e rapportato al tempo totale T [dB(A)] e  $L_{Aeq,T}$  è il livello equivalente complessivo rapportato sempre al tempo totale T [dB(A)]. La soglia K per l'individuazione degli eventi è definita come:

$$(2) \quad K = L_{Aeq,T} + C \quad [dB]$$

ove C = 3 dB per il rumore stradale. Per definizione il valore di IR è compreso tra 0 e 100; valori elevati (> 50%) evidenziano la presenza di eventi chiaramente distinguibili e molto pronunciati rispetto al livello  $L_{Aeq,T}$ . Nella presente indagine il valore di C per la definizione di K è stato assunto pari a 3, pur non trattandosi quasi mai di eventi associati al transito di autoveicoli, ma per lo più di trattori agricoli e fuoristrada.

Sono stati considerati anche altri descrittori delle fluttuazioni nel tempo del livello sonoro, come lo scarto s [dB(A)] dei valori di short  $L_{Aeq,1s}$  e il clima di rumore calcolato come indicato in Tabella 5.

Un ulteriore descrittore considerato nel presente studio, e ritenuto interessante per descrivere le aree montane ad accentuata naturalità e interessate anche da attività antropiche a carattere stagionale, è stato l'indice Harmonica (HRM), proposto con l'intento di una più agevole comprensione da parte della popolazione e, quindi, più adeguato per la comunicazione al pubblico [11]. L'indice HRM, formulato per avere valori

compresi tra 0 e 10, è ottenuto dalla somma aritmetica del descrittore “background noise” (BGN) e di quello degli eventi sonori (EVT), ossia:

$$(3) \quad HRM = BGN + EVT$$

ove EVT è calcolato con la relazione:

$$(4) \quad EVT = 0,25[L_{AeqT} - [(L_{A95})_w]_{eq}]$$

con  $[(L_{A95})_w]_{eq}$  pari al livello equivalente dei livelli percentili  $(L_{A95})_{[i,i+w]}$  determinati su una finestra temporale mobile di ampiezza  $w = T/6$  [s] e passo  $i = 1$  [s]:

$$(5) \quad [(L_{A95})_w]_{eq} = 10 \cdot \lg \left[ \frac{1}{T-w} \sum_{i=0}^{T-w} 10^{[(L_{A95})_{[i,i+w]}/10]} \right] \quad [dB(A)]$$

e BGN pari a:

$$(6) \quad BGN = 0,20[[(L_{A95})_w]_{eq} - 30] \quad [dB(A)]$$

Poiché il parametro  $[(L_{A95})_w]_{eq}$  non è ottenibile direttamente dalla strumentazione si è voluto valutare quanto esso si discosti dal livello percentile  $L_{A95}$ , fornito invece dalla strumentazione, e calcolare il valore di  $HRM_{95}$  ottenuto sostituendo nelle equazioni (4) e (6) il valore di  $L_{A95}$  a quello di  $[(L_{A95})_w]_{eq}$ .

### 3 | Risultati e discussione

Il consistente insieme di dati acustici acquisiti (Tab. 6) e di risultati ottenuti per i vari descrittori acustici è analizzabile secondo molteplici aspetti.

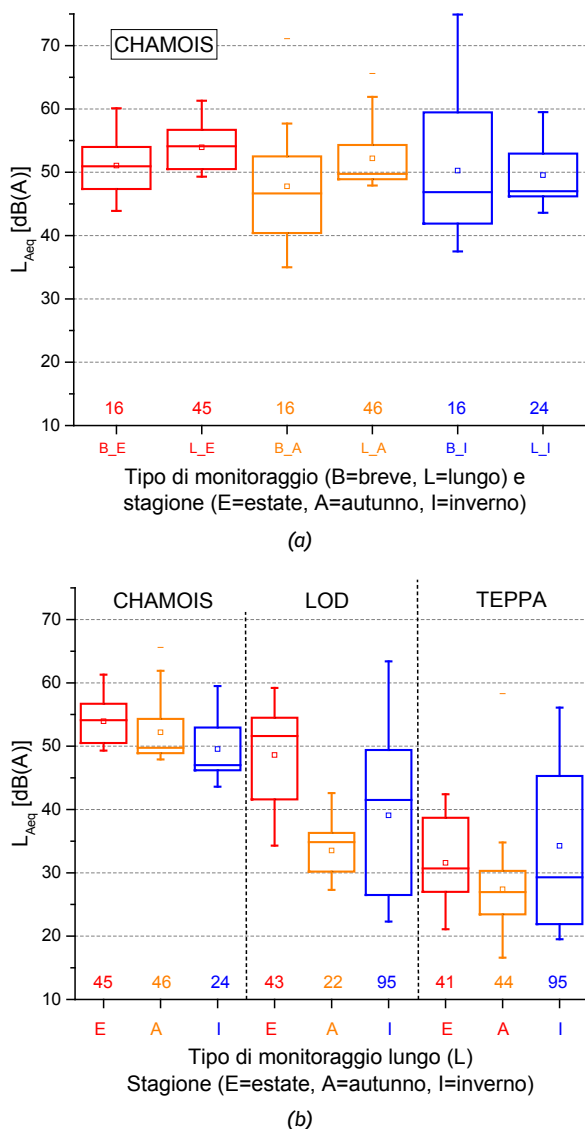
**Tab. 6 – Distribuzione dei rilevamenti orari e di breve periodo (10 minuti) tra le località e le stagioni**  
**Distribution of hourly and short-tem (10 minutes) monitoring over locations and seasons**

| Località/Stagione | Estate | Autunno | Inverno | Totale |
|-------------------|--------|---------|---------|--------|
| Chamois           | 61     | 62      | 40      | 163    |
| Lod               | 52     | 31      | 104     | 187    |
| Teppa             | 41     | 44      | 95      | 180    |
| Totale            | 154    | 137     | 239     | 530    |

#### 3.1 | Variabilità temporale dei livelli sonori

A titolo descrittivo, si riportano i box plot, diversificati per le tre stagioni, dei livelli  $L_{Aeq}$  per i rilevamenti di breve (B) e lungo (L) periodo, quest'ultimi su base oraria, nell'abitato di Chamois in Fig. 3(a) e il confronto per i rilevamenti di lungo periodo, sempre su base oraria, eseguiti nelle tre località in Fig. 3(b). I numeri sugli assi delle ascisse indicano la dimensione campionaria dei rilevamenti, su base 10 minuti per quelli di breve periodo e oraria per quelli di lungo periodo.

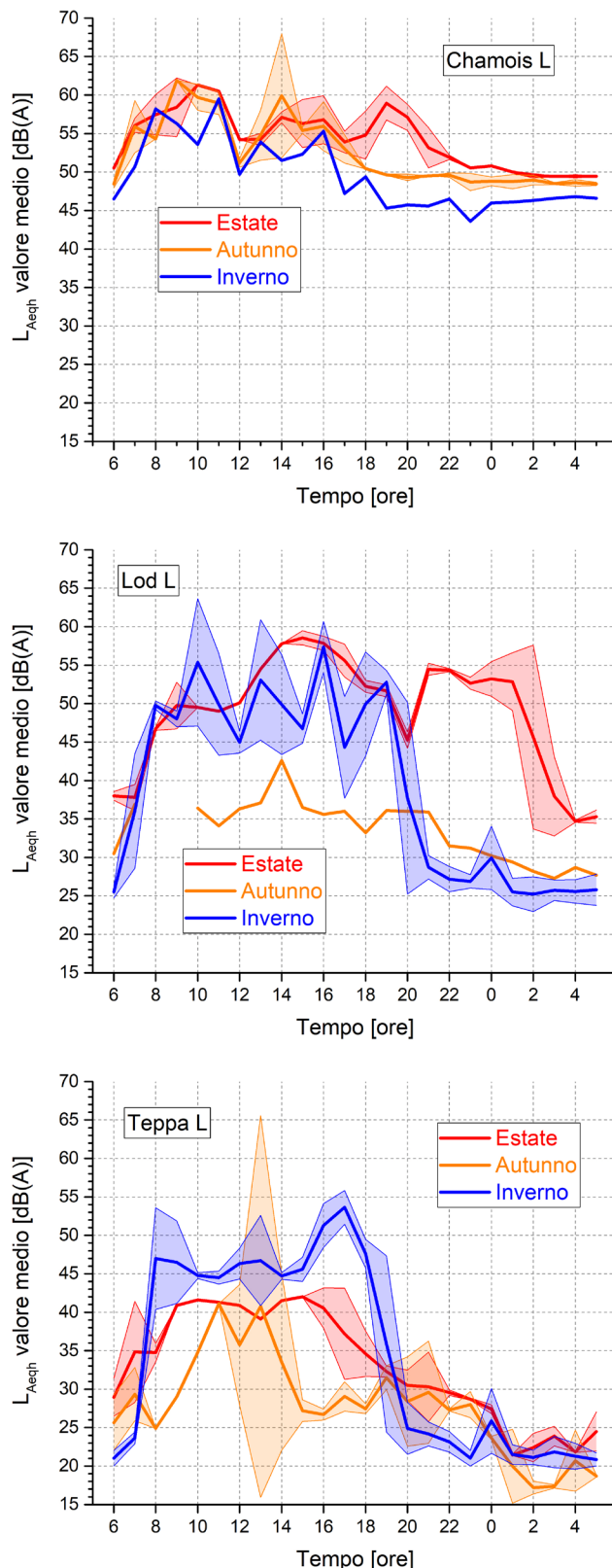
Si osserva una maggiore variabilità dei livelli  $L_{Aeq}$  per i rilevamenti di breve periodo e, per la stagione invernale, anche per quelli di lungo periodo nelle due località, Lod e Teppa, ricomprese all'interno dell'area sciistica con le attività ad essa connesse (bar e ristoranti, innevamento e battitura delle piste, aree di aggregazione di persone).



**Fig. 3 – Box plot, diversificati per le tre stagioni, dei livelli  $L_{Aeq}$  (a) per i rilevamenti di breve (B) e lungo (L) periodo nell'abitato di Chamois e (b) confronto per i rilevamenti di lungo periodo eseguiti nelle tre località**

**Box plot, for the three seasons, of  $L_{Aeq}$  levels (a) for short-term (B) and long-term (L) monitoring in the Chamois built-up area and (b) comparison of long-term monitoring for the three locations**

Relativamente ai livelli  $L_{Aeq}$  per i tempi di riferimento diurno (ore 6-22) e notturno (ore 22-6), si è dapprima determinato l'andamento medio nelle 24 ore del livello  $L_{Aeqh}$  orario sulla base dei rilevamenti a lungo periodo L eseguiti nelle tre località e nelle tre stagioni (Fig. 4). Nel centro abitato di Chamois si osservano livelli  $L_{Aeqh}$  maggiori rispetto alle altre due località che si trovano più lontane dal centro abitato, ma nelle quali è evidente l'impatto che, in inverno, è prodotto dalle attività sciistiche dalle ore 8 alle 17.



**Fig. 4 – Andamento medio nelle 24 ore del livello  $L_{Aeqh}$  orario sulla base dei rilevamenti a lungo periodo L eseguiti nelle tre località e nelle tre stagioni**  
**24-hour average hourly  $L_{Aeqh}$  pattern from long-term monitoring (L) performed in the three locations and seasons**

In base a questi andamenti temporali medi di  $L_{Aeqh}$ , è possibile estrapolare i valori dei livelli  $L_{Aeqh}$  da quelli ottenuti nell'intervallo di 10 minuti nei vari siti selezionati per i rileva-

menti a breve periodo. Questa estrapolazione si basa su una duplice ipotesi:

- che il valore del livello  $L_{Aeqh}$  estrapolato coincida con il livello  $L_{Aeq,10min}$  rilevato;
- che l'andamento medio nel tempo dei livelli  $L_{Aeqh}$  ottenuto dal monitoraggio a lungo periodo rimanga inalterato nei punti di monitoraggio a breve periodo ma, ovviamente, con valori assoluti diversi per singolo intervallo orario.

Tale andamento, pertanto, è traslato sull'asse dei valori di  $L_{Aeqh}$  con il metodo dei minimi quadrati, tenendo conto dei livelli  $L_{Aeq,10min}$  rilevati. Un esempio di tale estrapolazione è riportato nella Figura 5 per il sito 1 nell'abitato di Chamois per le tre stagioni. Con la linea tratteggiata è riportato l'andamento medio dei livelli  $L$  nel tempo di riferimento diurno determinati dai corrispondenti rilevamenti a lungo periodo  $L$ .

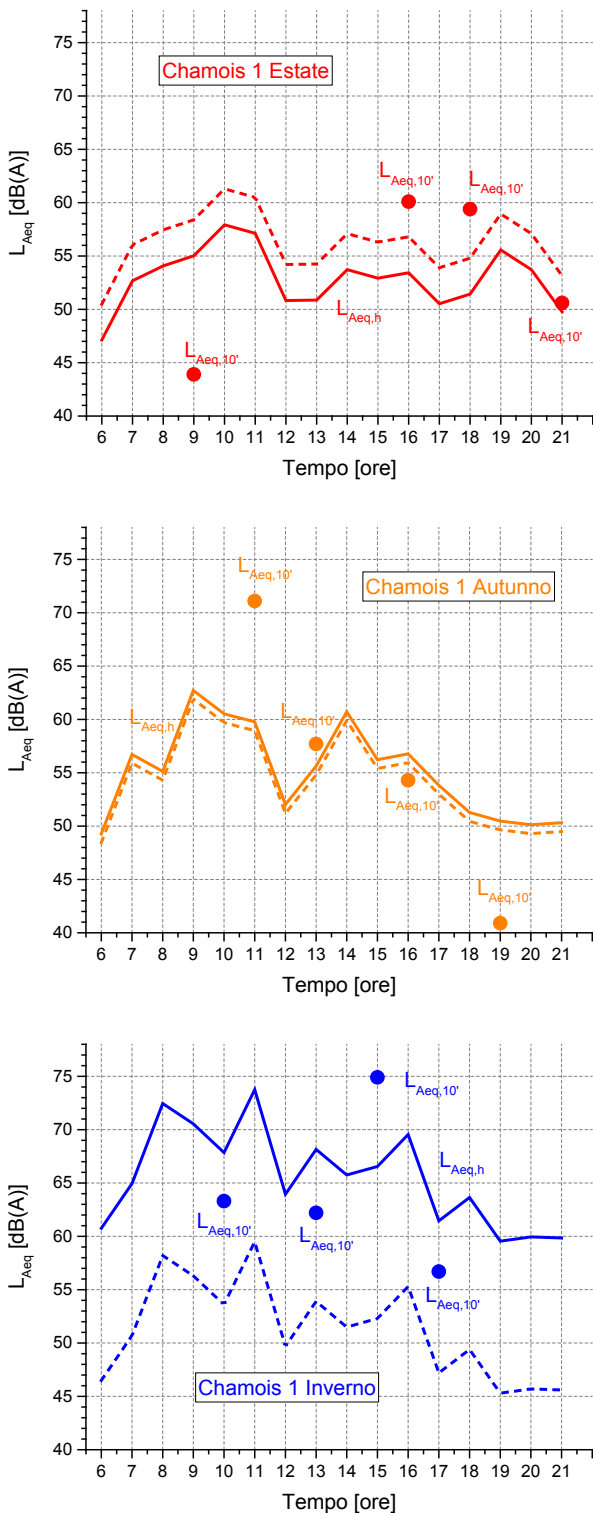
La Tabella 7 riporta i valori di  $L_{AeqTR}$  relativi agli andamenti medi nelle 24 ore del livello  $L_{Aeqh}$  orario ottenuti dai rilevamenti a lungo periodo  $L$  e quelli determinati per i rilevamenti di breve periodo mediante l'estrapolazione del valore orario sopra descritta. Per la determinazione di  $L_{AeqTR}$  notturno per i rilevamenti brevi, non essendo stati eseguiti rilevamenti in tale periodo, si è fatto riferimento alla differenza media  $L_{Aeqd} - L_{Aeqn}$  ottenuta per il rilevamento orario notturno di lungo periodo  $L$ .

I valori ottenuti danno una chiara indicazione della variabilità nel tempo dei livelli sonori tra località, siti e stagioni. In riferimento ai limiti corrispondenti alle classi attribuite ai vari siti dalla zonizzazione acustica (vedi Tab. 4), si osservano rari superamenti evidenziati in rosso nella Tabella 7.

**Tab. 7 – Livelli  $L_{AeqTR}$  per i tempi di riferimento diurno e notturno per le varie località, punti di misura e stagioni. Il valore in rosso indica il superamento del valore limite**

*$L_{AeqTR}$  levels referred to the day- and night-time for the three locations, measurement points and seasons. The number in red indicates the exceedance of the noise limit*

| Località | Punti di misura | Estate   |          | Autunno  |          | Inverno     |          |
|----------|-----------------|----------|----------|----------|----------|-------------|----------|
|          |                 | ore 6-22 | ore 22-6 | ore 6-22 | ore 22-6 | ore 6-22    | ore 22-6 |
| Chamois  | L               | 57,0     | 50,0     | 56,0     | 49,0     | 53,5        | 46,0     |
|          | 1               | 53,5     | 46,5     | 57,0     | 49,5     | <b>68,0</b> | 60,5     |
|          | 2               | 52,5     | 45,5     | 50,0     | 42,5     | 55,0        | 47,5     |
|          | 3               | 50,0     | 43,0     | 47,0     | 39,5     | 45,0        | 37,5     |
|          | 4               | 53,0     | 46,0     | 45,0     | 37,5     | 47,5        | 40,0     |
| Lod      | L               | 53,5     | 50,5     | 37,0     | 29,5     | 50,5        | 27,0     |
|          | 1               | 51,0     | 48,0     | 32,0     | 25,0     | 45,0        | 21,0     |
|          | 2               | 58,0     | 55,0     | 37,0     | 30,0     | 65,0        | 41,5     |
|          | 3               | 51,5     | 48,5     | 33,0     | 26,0     | 49,5        | 25,5     |
|          | 4               | 50,0     | 47,0     | 34,5     | 28,0     | 49,0        | 25,0     |
| Teppa    | L               | 39,0     | 26,0     | 34,0     | 23,5     | 46,5        | 22,5     |



**Fig. 5 – Estrapolazione del livello  $L_{Aeqh}$  orario sulla base dei rilevamenti a breve periodo eseguiti nel sito 1 dell'abitato di Chamois (Fig. 1a) nelle tre stagioni. Con la linea tratteggiata è riportato l'andamento medio dei livelli  $L_{Aeqh}$  nel tempo di riferimento diurno determinati dai corrispondenti rilevamenti a lungo periodo  $L$**   
*Estimate in the day-time (6-22 h) of the hourly  $L_{Aeq,h}$  levels from short-term monitoring at measurement point 1 in the Chamois built-up area (Fig. 1a) in the three seasons. Dashed lines refer to the average hourly  $L_{Aeqh}$  level in the day-time determined from corresponding long-term monitoring ( $L$ )*

### 3.2 | Sorgenti sonore dell'ambiente sonoro

In merito alle tipologie di sorgenti sonore presenti durante i rilevamenti di breve periodo nei vari siti e stagioni, la Tabella 8 ne riporta le occorrenze, ricavate dalle osservazioni trascritte dall'operatore, distinguendo le sorgenti nelle categorie di ge-

ofonia (vento, acqua, foglie, ecc.), biofonia (uccelli e altri animali), antropofonia (voci, passi, grida, ecc.) e tecnofonia (macchinari, traffico, musica, campane, ecc.).

**Tab. 8 – Occorrenza delle varie tipologie di sorgenti sonore individuate durante i rilevamenti a breve periodo nelle varie località, punti di misura e stagioni**

**Number of occurrences of the sound source types detected during the short-term monitoring in the locations, measurement points and seasons**

| Località | Punto di misura | Geofonia |   |   | Biofonia |   |   | Antropofonia |   |   | Tecnofonia |   |   |
|----------|-----------------|----------|---|---|----------|---|---|--------------|---|---|------------|---|---|
|          |                 | E        | A | I | E        | A | I | E            | A | I | E          | A | I |
| Chamois  | 1               | 2        | 1 | 1 | 1        |   |   | 1            | 1 |   |            | 1 | 1 |
|          | 2               | 2        | 1 | 2 | 1        | 1 |   | 1            | 1 |   |            |   |   |
|          | 3               | 2        |   | 1 | 1        |   |   | 1            | 1 |   | 1          | 2 | 3 |
|          | 4               | 1        |   | 1 | 1        |   |   | 1            | 1 | 1 | 1          | 2 | 2 |
| Lod      | 1               | 2        |   |   | 1        | 1 |   |              |   | 2 | 2          | 1 |   |
|          | 2               |          | 1 |   |          |   | 1 |              | 1 | 2 | 1          | 2 |   |
|          | 3               | 1        |   | 1 | 1        | 1 |   |              |   | 1 | 2          | 3 | 1 |
|          | 4               |          | 1 |   | 1        |   |   |              |   |   | 2          | 1 | 3 |
|          | 5               |          |   |   | 1        | 1 |   | 1            | 1 | 1 | 1          |   | 1 |

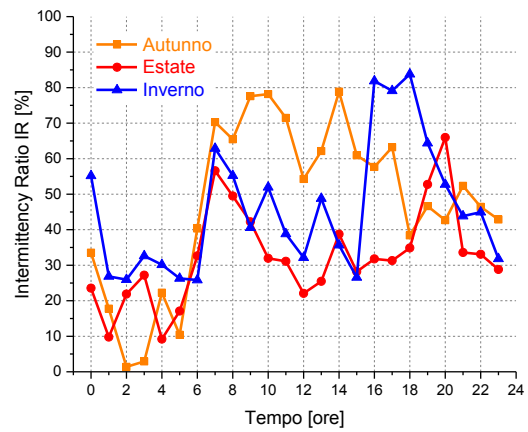
### 3.3 | Identificazione e caratterizzazione degli eventi sonori

La presenza di eventi sonori chiaramente distinguibili rispetto al rumore di fondo può essere in prima istanza valutata in base all'Intermittency Ratio. La Tabella 9 riporta la percentuale di rilevamenti con valori di IR  $\geq 50\%$ , ossia con eventi che contribuiscono oltre il 50% al valore di  $L_{Aeq}$ , diversificata per località e stagioni. Più del 50% degli eventi sonori osservati in Teppa hanno valori di IR  $> 50\%$ , mentre nelle altre due località la percentuale è nell'intervallo 31-40%. La stagione invernale è più ricca di eventi con IR  $> 50\%$  in Chamois e Lod, mentre in Teppa ciò si osserva in autunno.

**Tab. 9 – Percentuale di rilevamenti con valori di IR  $\geq 50\%$**   
**Percentage of measurements with IR  $\geq 50\%$**

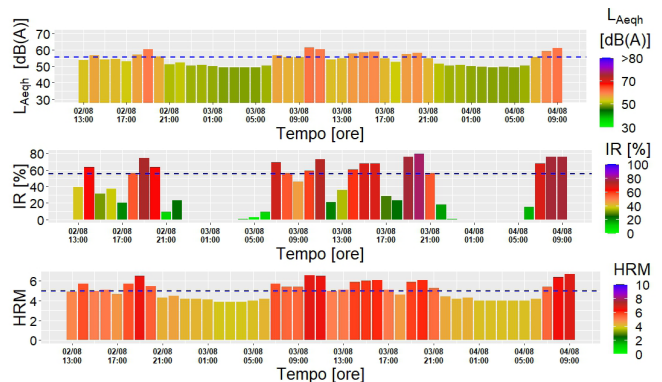
| Località | Estate | Autunno | Inverno | Totale |
|----------|--------|---------|---------|--------|
| Chamois  | 34,4   | 35,5    | 55,0    | 39,9   |
| Lod      | 11,5   | 35,5    | 40,4    | 31,6   |
| Teppa    | 46,3   | 75,0    | 45,3    | 52,8   |

La Figura 6, invece, riporta l'andamento nelle 24 ore dei valori medi orari di IR per i monitoraggi a lungo termine nelle tre località, diversificati per stagione. La rilevanza degli eventi sonori è maggiore nel periodo diurno (ore 6-22) e ciò, verosimilmente, è imputabile alle varie attività antropiche. Una maggiore incidenza degli eventi si osserva in autunno e in inverno.



**Fig. 6 – Andamento nelle 24 ore dei valori medi orari di IR per i monitoraggi a lungo termine nelle tre località, diversificati per stagione**  
**Hourly pattern of IR average values determined for long-term monitoring in the three sites for each season**

Un esempio di restituzione grafica dei valori orari determinati con lo script sviluppato in ambito "R" è riportato nella Figura 7 per i livelli  $L_{Aeq}$ , l'Intermittency Ratio IR e l'indice Harmonica HRM corrispondenti al monitoraggio continuo nel lungo periodo nel centro abitato di Chamois in estate. Si osserva che nei due tempi di riferimento notturno non sono presenti eventi significativi e, comunque, tali da determinare valori pressoché nulli per IR a fronte di un  $L_{Aeq}$  che si mantiene costantemente appena al di sotto di 50 dB(A) per effetto dell'influenza sul sito del rumore dello scroscio delle acque di un torrente che scorre nel fondovalle.

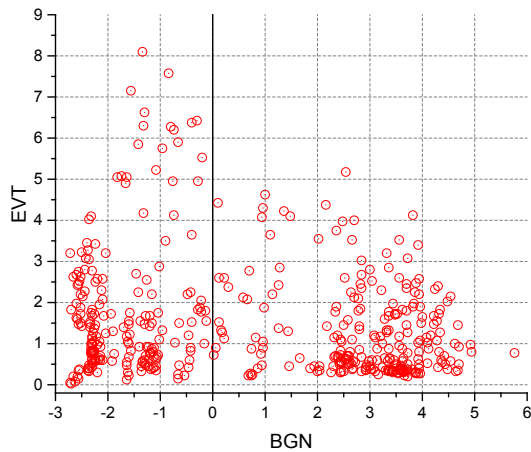


**Fig. 7 – Esempio di rappresentazione grafica dei livelli  $L_{Aeq}$  orari, dell'Intermittency Ratio IR e dell'indice Harmonica HRM determinati dal monitoraggio continuo nel lungo periodo nel centro abitato di Chamois in estate. La linea tratteggiata blu corrisponde alla media aritmetica dei valori orari di ciascun parametro**

**Example of plots of  $L_{Aeq}$ , IR and HRM hourly values computed from the long-term monitoring in the Chamois built-up area in summer. The blue dashed horizontal lines correspond to the arithmetic average of the hourly parameter values**

### 3.4 | Criticità dell'applicazione dell'indice HRM in contesti non urbani

Il calcolo delle due componenti BGN ed EVT dell'indice Harmonica HRM secondo le relazioni (6) e (4) ha fornito i valori orari riportati nella Figura 8.



**Fig. 8 – Valori orari delle due componenti BGN ed EVT dell'indice Harmonica HRM**  
**Hourly values of the two components BGN and EVT of the Harmonica index HRM**

Per una buona frazione dei dati orari (44,8%) si ottengono valori negativi per il rumore di fondo BGN in quanto il valore di  $[(L_{A95})_{w,eq}]$  è inferiore al valore soglia di 30 dB(A) impostato nella formulazione originaria (relazione 6). In aree particolarmente quiete, pertanto, il valore HRM tende a diminuire essendo BGN negativo (relazione 3) e può divenire esso stesso negativo (28,1% degli intervalli orari esaminati) qualora la componente degli eventi sonori EVT non sia molto pronunciata.

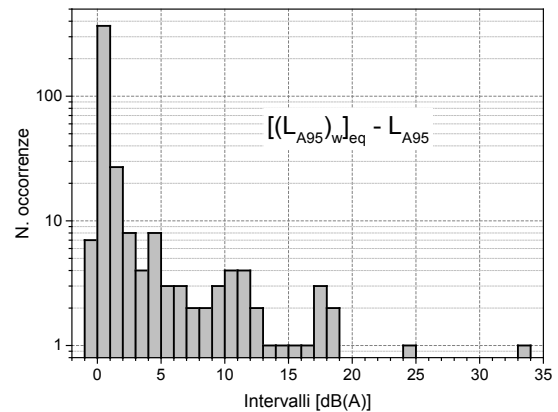
Per ovviare a questa criticità sono configurabili alcune opzioni, quali abbassare la soglia per  $[(L_{A95})_{w,eq}]$  fissandola, ad esempio, a 20 dB(A), oppure assumere BGN = 0 in presenza di valori negativi. In ogni caso la soglia non dovrà mai essere inferiore al rumore autogenerato dalla strumentazione impiegata per il rilevamento.

È evidente che ogni cambiamento rispetto alla formulazione originaria comporta l'impossibilità di confrontare i valori di HRM ottenuti con procedure di calcolo differenti.

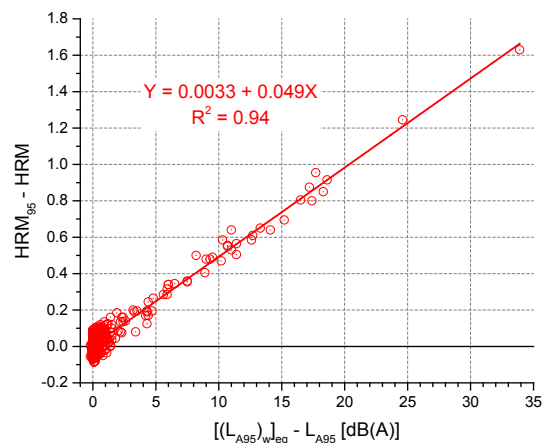
### 3.5 | Livello equivalente $[(L_{A95})_{w,eq}]$ e percentile $L_{A95}$

Il calcolo di HRM richiede un'elaborazione post-processing della serie temporale dei livelli short  $L_{Aeq,1s}$  per determinare il livello equivalente del percentile  $L_{A95}$ , non ottenibile direttamente dalla strumentazione corrente diversamente dal livello percentile  $L_{A95}$ . Nell'ottica di sostituire nella formulazione di HRM questo secondo parametro statistico, misurabile direttamente dallo strumento, al valore del livello  $[(L_{A95})_{w,eq}]$  è stata valutata l'entità della differenza tra questi due parametri, riportata nell'istogramma in Figura 9. Solo nell'1,5% degli intervalli orari si osservano valori negativi per detta differenza, con valore massimo di -0,2 dB(A), mentre nei casi rimanenti il livello  $[(L_{A95})_{w,eq}]$  è maggiore del percentile  $L_{A95}$  con una differenza non superiore a 2 dB(A) nell'86,8% dei casi. Ciò comporta che la sostituzione di  $[(L_{A95})_{w,eq}]$  con l'indice  $L_{A95}$  fornisce valori di  $HRM_{95}$  maggiori di quelli HRM della formulazione

originaria (Fig. 10), con il duplice vantaggio di un approccio cautelativo e di rendere implementabile il calcolo di  $HRM_{95}$  direttamente nella strumentazione agevolandone, così, la diffusione della sua applicazione.



**Fig. 9 – Istantogramma delle differenze  $[(L_{A95})_{w,eq}] - L_{A95}$**   
**Histogram of the  $[(L_{A95})_{w,eq}] - L_{A95}$  differences**



**Fig. 10 – Differenze  $HRM_{95} - HRM$  in funzione di  $[(L_{A95})_{w,eq}] - L_{A95}$**   
 **$HRM_{95} - HRM$  differences versus  $[(L_{A95})_{w,eq}] - L_{A95}$**

### 3.6 | Ripartizione statistica dei rilevamenti orari in base ai parametri acustici

Un'ulteriore analisi ha riguardato la correlazione tra tutti i principali descrittori acustici calcolati, riportata nella matrice di Pearson in Figura 11. Appaiono evidenti due gruppi di indicatori: quello nel rettangolo in basso a destra comprendente indicatori tra loro ben correlati (da  $L_{A95eq}$  a HRM) pertinenti con l'entità di energia sonora e quello in alto a sinistra (descrittori s, EVT e IR) comprendente indici connessi con le fluttuazioni nel tempo del livello sonoro, come quelle prodotte dalla presenza di eventi sonori chiaramente distinguibili dal rumore di fondo (descrittori EVT e IR). Questo risultato è in linea con quanto già esposto in letteratura [12,13] ed evidenzia la necessità di affiancare al livello continuo equivalente  $L_{Aeq}$ , rappresentativo dell'energia sonora complessiva in un determinato intervallo, almeno un altro parametro atto a descrivere la dinamica temporale dei livelli sonori causata da eventi prodotti da sorgenti specifici

che. Questi eventi, tra l'altro, sono identificabili con procedure automatiche [10] se si fa riferimento alla formulazione di IR, in particolare alla soglia K determinata con la relazione (2). Il parametro EVT, invece, è più orientato all'aspetto percettivo di detti eventi che, come noto, sono tanto più potenzialmente disturbanti quanto più distinguibili rispetto al rumore di fondo, come, ad esempio, si osserva spesso nel tempo di riferimento notturno ed in particolare in aree rurali lontane dalle principali città e infrastrutture dei trasporti.



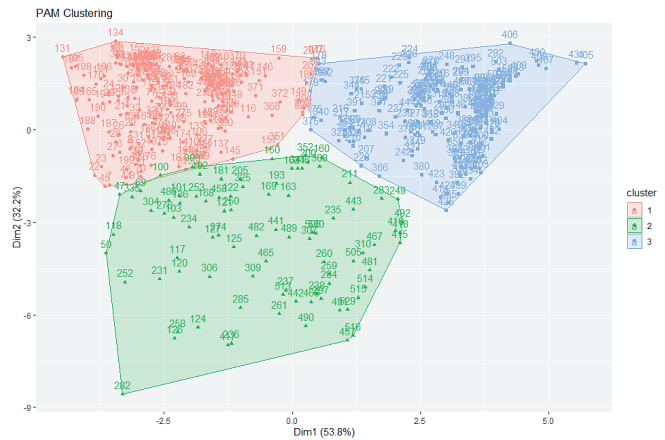
**Fig. 11 – Matrice di correlazione di Pearson tra i principali descrittori acustici**  
*Pearson's correlation matrix of the main acoustic parameters*

In considerazione dei risultati ottenuti in precedenti indagini [14,15], l'analisi successiva è stata finalizzata a individuare un possibile raggruppamento ("clustering") dei 530 rilevamenti eseguiti sulla base dei valori ottenuti per i descrittori acustici considerati. A tal fine, si è proceduto a una analisi cluster con validazione degli algoritmi di aggregazione eseguita mediante il package "clValid" [16] nella piattaforma software "R". Il processo di validazione individua gli algoritmi di aggregazione con prestazioni ottimali sulla base dei valori assunti dai seguenti sei parametri:

- percentuale media di non sovrapposizione (APN) tra i gruppi;
- distanza media tra i gruppi (AD);
- distanza media tra i valori medi dei gruppi (ADM);
- connessione tra i gruppi, ossia in quale misura gli elementi inclusi in un gruppo corrispondono a quelli che sono vicini nello spazio dei dati;
- "Silhouette width", indicatore della compattezza dei gruppi;
- "Dunn index" indicatore della separazione tra i gruppi.

Essendo i vari parametri acustici determinati su diverse scale di misura è stato necessario procedere a una loro scalatura, a media nulla e scarto unitario, prima di procedere al calcolo della distanza euclidea tra i 530 rilevamenti. Per le modalità di raggruppamento sono stati considerati i nove algoritmi disponibili nel package, comprendenti hierarchical, k-means, self-organizing maps (SOM) and model-based clustering. L'algoritmo corrispondente alla prestazione ottimale è risultato il "partition

around medoids" (pam) con distinzione in tre gruppi. La Fig. 12 illustra la distribuzione dei dati che non presenta sovrapposizioni tra i tre gruppi nelle prime due dimensioni dello spazio dei dati, che complessivamente spiegano l'86% della varianza.



**Fig. 12 – Distribuzione dell'insieme dei rilevamenti acustici nelle prime due dimensioni dello spazio di clustering con algoritmo "partition around medoids" (pam) e ripartizione in tre gruppi**  
*Distribution of the acoustic data in the first two dimensions of the clustering space according to the partition around medoid (pam) algorithm and three clusters*

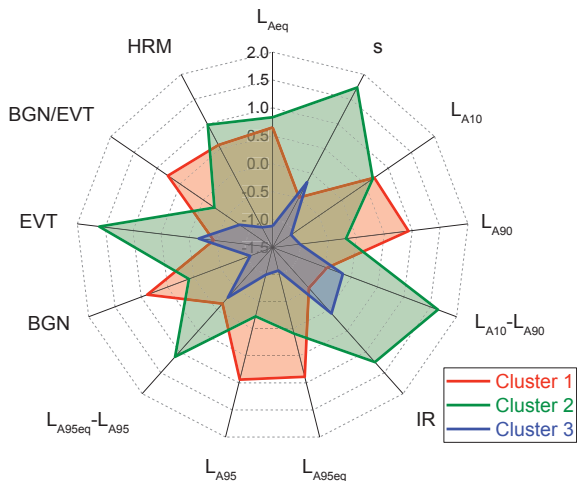
Nella Tab. 10 è riportata la percentuale di occorrenza dei rilevamenti nei tre cluster diversificata per località e stagione. Il cluster 1 raggruppa il maggior numero di rilevamenti (44,9%) per la maggior parte (59,7%) eseguiti nella località di Chamois, mentre la maggioranza dei rilevamenti eseguiti in Teppa (59,8%) è inclusa nel cluster 3 e il maggior numero di rilevamenti eseguiti a Lod (45,5%) è nel cluster 2. Relativamente alle stagioni, per il cluster 1 predominano i rilevamenti in estate in Chamois e Lod, rispettivamente 41,5% e 62,1%, e in inverno (73,3%) per Teppa. Nel cluster 2 sono i rilevamenti invernali a predominare in tutte le tre località, così come per il cluster 3 per Lod e Teppa. Questa analisi statistica fornisce una sorta di caratteristiche identitarie di tutto l'insieme dei parametri acustici considerati, in base al quale raggruppare per affinità i dati acquisiti per ciascuna località e stagione.

**Tab. 10 – Percentuale di occorrenza dei rilevamenti nei tre clusters**  
*Distribution of the acoustic data [% of occurrence] in the three clusters*

| Località    | Chamois |      |      |      | Lod  |      |      |      | Teppa |      |      |      |
|-------------|---------|------|------|------|------|------|------|------|-------|------|------|------|
|             | E       | A    | I    | Tot. | E    | A    | I    | Tot. | E     | A    | I    | Tot. |
| Cluster (%) |         |      |      |      |      |      |      |      |       |      |      |      |
| 1 (44,9%)   | 41,5    | 38,7 | 19,7 | 59,7 | 62,1 | 0,0  | 37,9 | 27,7 | 26,7  | 0,0  | 73,3 | 12,6 |
| 2 (16,6%)   | 10,0    | 30,0 | 60,0 | 22,7 | 20,0 | 2,5  | 77,5 | 45,5 | 3,6   | 14,3 | 82,1 | 31,8 |
| 3 (38,5%)   | 0,0     | 100  | 0,0  | 0,5  | 3,7  | 37,0 | 59,3 | 39,7 | 26,2  | 32,8 | 41,0 | 59,8 |

Nella Figura 13 è riportato il confronto dei tre cluster identificati dalle medie dei valori scalati per tutti i parametri acustici esaminati. Come già detto è più significativo utilizzare i valori

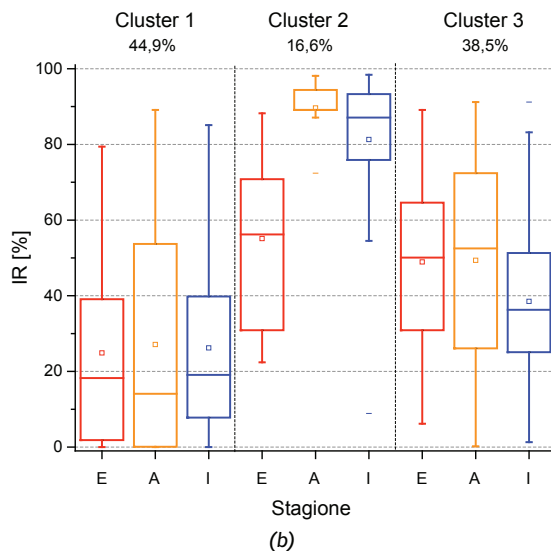
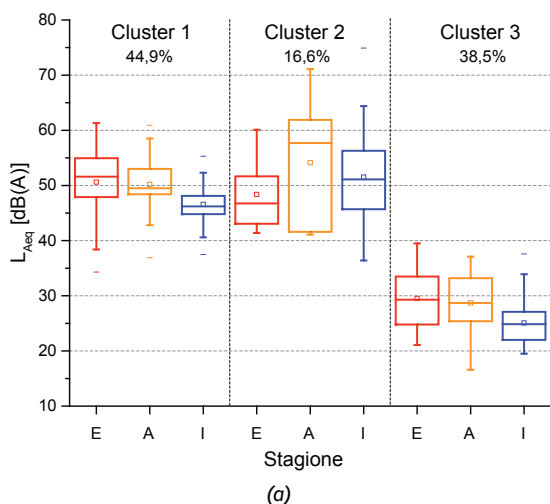
scalati essendo i vari parametri riferiti a scale dimensionali differenti. Si osserva che il cluster 2 raggruppa i rilevamenti con maggiore variabilità dei livelli sonori (alti valori di  $s$  e clima di rumore  $L_{A10}-L_{A90}$ ) e presenza di eventi (alti valori di EVT e IR). Al contrario, il cluster 1 presenta livelli sonori meno variabili (alti valori di BGN,  $L_{A90}$ ,  $L_{A95}$  e  $L_{A95eq}$ ), mentre il cluster 3 raggruppa i rilevamenti con minori livelli sonori (bassi valori di  $L_{Aeq}$ ) ma con eventi non marginali (valori intermedi di IR, EVT e  $L_{A10}-L_{A90}$ ).



**Fig. 13 – Valori medi dei descrittori acustici, scalati a media nulla e scarto unitario, per i tre cluster ottenuti dall’algoritmo “partition around medoids”**

**Mean values of the scaled acoustic data (mean = 0 and standard deviation = 1) for each of the three clusters obtained by the partition around medoids algorithm**

La composizione dei tre cluster è riportata nella Figura 14 mediante i boxplot diversificati per stagione rispetto al livello  $L_{Aeq}$ , rappresentativo dell’energia sonora, e al parametro IR, descrittore del contributo degli eventi sonori a tale energia. Quest’ultimo presenta una accentuata variabilità, minore nel cluster 2 per l’autunno e l’inverno ma con valori elevati di IR. Tale andamento trova riscontro nell’ampia variabilità del livello  $L_{Aeq}$ , specie per il cluster 2 in autunno. In altri termini ridotta variabilità e valori elevati di IR sono associati a valori  $L_{Aeq}$  ad accentuata variabilità nel tempo.

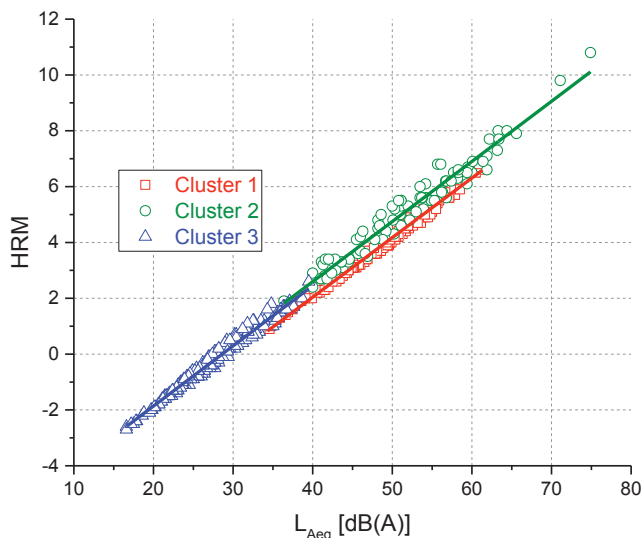


**Fig. 14 – Box plot dei valori di  $L_{Aeq}$  (a) e IR (b) diversificati per cluster e stagione**

**Box plot of: (a)  $L_{Aeq}$  and (b) IR for each cluster and season**

L’ottima correlazione osservata tra il livello  $L_{Aeq}$  e l’indice Harmonica HRM ( $r = 0,99$  in Fig. 11) è esplicitata anche nella Fig. 15 che riporta la regressione lineare tra i due descrittori, diversificata per i tre cluster. Rispetto a questi due parametri si osserva una parziale sovrapposizione tra i cluster e una sostanziale coincidenza tra le tre rette di regressione. Complessivamente si ottiene:

$$(7) \quad HRM = -5,987 + 0,207L_{Aeq}$$



**Fig. 15 – Regressione lineare tra livello  $L_{Aeq}$  e indice Harmonica HRM, diversificata per cluster**

**Linear regression between  $L_{Aeq}$  and Harmonica (HRM) index for each cluster**

È da osservare che il limite assoluto  $L_{Aeq} = 50$  dB(A) per il tempo di riferimento diurno e la classe acustica I (aree particolarmente protette) in base alla relazione 7 corrisponde a  $HRM = 4,4$  prossimo al valore  $HRM = 4$  al di sopra del quale

gli autori proponenti l'indice HRM classificano l'ambiente come "noisy" (25,3% dell'insieme dei rilevamenti della presente indagine).

## Conclusioni

Le aree alpine della Valle d'Aosta oggetto della presente indagine costituiscono un contesto ambientale interessante in quanto sono caratterizzate da una accentuata connotazione naturalistica e, nel contempo, presentano una rilevante variabilità stagionale dovuta a diversificate fruizioni del territorio (attività sportive invernali, turismo estivo, attività agricole...) e corrispondenti attività antropiche.

L'analisi del consistente insieme di dati acustici raccolti ha permesso diverse valutazioni dell'ambiente sonoro, tra le quali:

- ampio intervallo di valori per i vari parametri acustici esaminati, ad es. per il livello  $L_{Aeq}$  valori tra 16 e 75 dB(A) a conferma dell'ampia varietà dell'ambiente sonoro nelle tre località e nelle diverse stagioni;
- presenza di eventi sonori chiaramente distinguibili dal rumore di fondo, anche se prevalentemente non associati al transito o sorvolo di mezzi di trasporto; al riguardo il valore della soglia K per l'identificazione degli eventi con  $C = 3$  dB(A) per il rumore stradale (relazione 2) si è dimostrato valido anche per eventi di diversa natura;
- eventuale possibile riformulazione di HRM per le aree particolarmente quiete per evitare valori negativi del rumore di fondo BGN;
- sostituzione del livello  $[(L_{A95})_{w,eq}]$  con il percentile  $L_{A95}$  per implementare il calcolo di HRM direttamente nella strumentazione, agevolandone così la diffusione della sua applicazione; i valori leggermente superiori di  $HRM_{95}$  che si ottengono con tale sostituzione non pregiudicano la riformulazione dell'indice;
- ripartizione dei rilevamenti eseguiti in tre gruppi sufficientemente distinti e di comparabile dimensione campionaria, caratterizzabili in termini di energia sonora ( $L_{Aeq}$ ) e variabilità nel tempo dei livelli sonori con presenza di eventi (clima di rumore  $L_{A10}-L_{A90}$ , EVT, IR);
- ottima correlazione ( $r = 0,99$ ) tra livello  $L_{Aeq}$  e indice Harmonica.

L'approccio metodologico utilizzato per le questioni affrontate è di qualche interesse per una sua possibile estensione ad altre aree quiete naturali extraurbane.

## Conclusions

The Alpine areas of Aosta Valley analyzed in this survey are an interesting example of the environmental context, as they are characterized by an enhanced naturalistic feature and, at the same time, show a significant seasonal variability due to the different land uses (winter sports activities, summer tourism, agricultural activities...) and corresponding anthropogenic activities.

The analysis of the large acoustic dataset collected has allowed several evaluations of the acoustic environment, among which:

- wide range of values for the acoustic parameters examined (e.g.,  $L_{Aeq}$  between 16 and 75 dB(A)), confirming the wide variety of the acoustic environment in the three locations and in the different seasons;
- presence of sound events clearly exceeding the background noise, even though they are not predominantly associated with the pass-by or overflight of means of transport; in this respect the K threshold for noise event detection with  $C = 3$  dB(A) for road traffic noise (equation 2) has proved to be valid also for events of different nature;
- possible reformulation of HRM for particularly quiet areas to avoid negative BGN background noise values.
- replacement of the  $[(L_{A95})_{w,eq}]$  level with the  $L_{A95}$  percentile to implement the calculation of HRM directly in the instrumentation, thus facilitating the spread of its application; the slightly higher  $HRM_{95}$  values obtained by such substitution do not affect the reformulation of the index;
- distinction of the acoustic data into three groups of comparable sample size, which can be characterised in terms of sound energy ( $L_{Aeq}$ ) and time variability of sound events (noise climate  $L_{A10}-L_{A90}$ , EVT, IR);
- very good correlation (Pearson's  $r = 0.99$ ) between  $L_{Aeq}$  level and Harmonica (HRM) index;

The methodological approach used for the issues addressed is of potential interest for its application to other natural rural quiet areas.

## Bibliografia

- [1] Direttiva 2002/49/CE del Parlamento europeo e del Consiglio, del 25 giugno 2002, relativa alla determinazione e alla gestione del rumore ambientale. Gazzetta ufficiale delle Comunità europee, L189/12, 18/7/2002.
- [2] Votsi N.-E.P., Kallimanis A.S., Pantis J.D., "The distribution and importance of Quiet Areas in the EU". Applied Acoustics, 127, 207-214, 2017.
- [3] European Environment Agency, "Good practice guide on quiet areas". EEA Technical report N. 4/2014.
- [4] European Environment Agency, "Quiet areas in Europe. The environment unaffected by noise pollution". EEA Report n. 14/2016.
- [5] Decreto Ministero della Transizione Ecologica, "Definizione delle modalità per l'individuazione e la gestione delle zone silenziose di un agglomerato e delle zone silenziose in aperta campagna, in ottemperanza al comma 10-bis, articolo 4 del decreto legislativo 19 agosto 2005, n. 194". Gazzetta Ufficiale della Repubblica Italiana, Serie generale n. 119, 23/05/2022.
- [6] [www.mite.gov.it/pagina/rete-natura-2000](http://www.mite.gov.it/pagina/rete-natura-2000).
- [7] Direttiva 92/43/CEE del Consiglio 21/05/1992 relativa alla conservazione degli habitat naturali e seminaturali e della flora e della fauna selvatiche, Gazzetta ufficiale delle Comunità europee, L 206, 22/07/1992.
- [8] Tibone C., Masoero M., Berlier F., Tabozzi G., Crea D., Tartin C., Cappio Borlino M., Agnesod G., "Seasonal Variability of the Acoustic Climate of Ski Resorts in the Aosta Valley Territory". Environments 2020, 7, 18.
- [9] R Core Team (2020), R: A language and environment for statistical computing. R Foundation for Statistical Computing, Vienna, Austria.



- [10] Wunderli J.M. et al., "Intermittency ratio: A metric reflecting short-term temporal variations of transportation noise exposure". *Journal of Exposure Science and Environmental Epidemiology*, 1-11, 2015.
- [11] Vincent B., Gissinger V., Vallet J., Mietlicky F., Champelovier P., Carra S., "How to characterize environmental noise closer to people's expectations". *Proceedings InterNoise 2013*, Innsbruck, 15-18 September 2013.
- [12] Can A., Aumond P., Michel S., de Coensel B., Ribeiros C., Botteldooren D., Lavandier C., "Comparison of noise indicators in an urban context". *Proceedings InterNoise 2016*, Hamburg, Germany, 21-24 August 2016.
- [13] Brambilla G., Benocci R., Angelini F., Zambon G., "Parametri descrittori della dinamica nel tempo del rumore stradale urbano". *Atti AIA 2022*, Matera, 25-27 maggio 2022.
- [14] Tibone C., Crea D., Tartin C., Berlier F., Agnesod G., Cappio Borlino M., Tabozzi G., Delponte L., "Approccio alla caratterizzazione delle aree naturali di montagna: 1996-2018". *Atti AIA Workshop "Sostenibilità delle attività di svago: animazione o quiete?"*, Aosta, 20 giugno 2018.
- [15] Tibone C., Brambilla G., Callegari A., Berlier F., Tartin C., Crea D., Cappio Borlino M., "Applicazione di descrittori di eventi sonori nelle aree di quiete". *Atti Convegno AIA 2022*, Matera, 25-27 maggio 2022.
- [16] Brock G., Pihur V., Datta S., Datta S., "clValid: An R Package for Cluster Validation". *Journal of Statistical Software*, 25(4), 1-22, doi: 10.18637/jss.v025.i04.



# Galleria Commerciale dell'Aeroporto di Fiumicino: analisi acustica di un ambiente di grandi dimensioni

Paola Pulella<sup>a\*</sup> | Lucia Busa<sup>a</sup> | Sergio Luzzi<sup>a</sup> | Aurora Berna Berionni<sup>b</sup> | Alessandro Ferreri<sup>b</sup>

<sup>a</sup> Vie en.ro.se. Ingegneria Srl,  
Viale Belfiore, 36, Firenze

<sup>b</sup> ADR Ingegneria SpA,  
Viale Lago di Traiano, Fiumicino (RM)

\* Autore di riferimento:  
paola.pulella@vienrose.it

**Ricevuto:** 11/4/2023

**Accettato:** 13/7/2023

**DOI:** 10.3280/ria2-2023oa15727

**ISSN:** 2385-2615

Le gallerie commerciali sono ambienti di grandi dimensioni, la cui forma sproporzionata, insieme alla distribuzione degli arredi, non consente l'instaurarsi di un campo diffuso all'interno dello spazio e pertanto non rende possibile determinare una curva di propagazione sonora univoca. Il presente lavoro è volto ad analizzare l'efficacia acustica derivante dall'installazione di pannelli metallici pendinati a soffitto nella galleria commerciale del Terminal 1 dell'Aeroporto Leonardo Da Vinci di Fiumicino. L'analisi acustica dello stato attuale è stata condotta mediante misure fonometriche dell'indice di attenuazione spaziale dei livelli di pressione sonora al raddoppio della distanza. Tali indagini hanno permesso di confrontare lo stato attuale con i valori di riferimento delle norme tecniche, oltre che di effettuare la taratura di un modello acustico tridimensionale semplificato. L'inserimento dei pannelli di progetto all'interno del modello acustico ha consentito di determinare il beneficio acustico previsto, in termini di incremento dell'indice  $DL_2$ , e, in particolare, il raggiungimento di 3 dB nel campo intermedio.

**Parole chiave:** comfort acustico, galleria commerciale, decadimento sonoro nello spazio, ambiente di grandi dimensioni

## Shopping Mall at Fiumicino Airport: acoustic analysis of large-scale room

Shopping malls are large environments, whose disproportionate shape, together with the distribution of the furnishings, does not allow the establishment of a diffuse field within the space and therefore does not make it possible to determine a univocal sound propagation curve. The present work aims at analyzing the acoustic effectiveness resulting from the installation of metal panels hanging from the ceiling in the commercial gallery of Terminal 1 at Leonardo Da Vinci Airport in Fiumicino. The acoustic analysis of the current state was carried out by acoustic measurements of reverberation time and spatial decay of sound pressure levels per distance doubling. These investigations made it possible to compare the current state with normative reference values, as well as to carry out the calibration of a simplified three-dimensional acoustic model. The inclusion of the design panels within the acoustic model made it possible to determine the expected acoustic benefit, in terms of increase in  $DL_2$  index, and the achievement of 3 dB in the intermediate range.

**Keywords:** acoustic comfort, shopping mall, spatial sound distribution, large-scale room

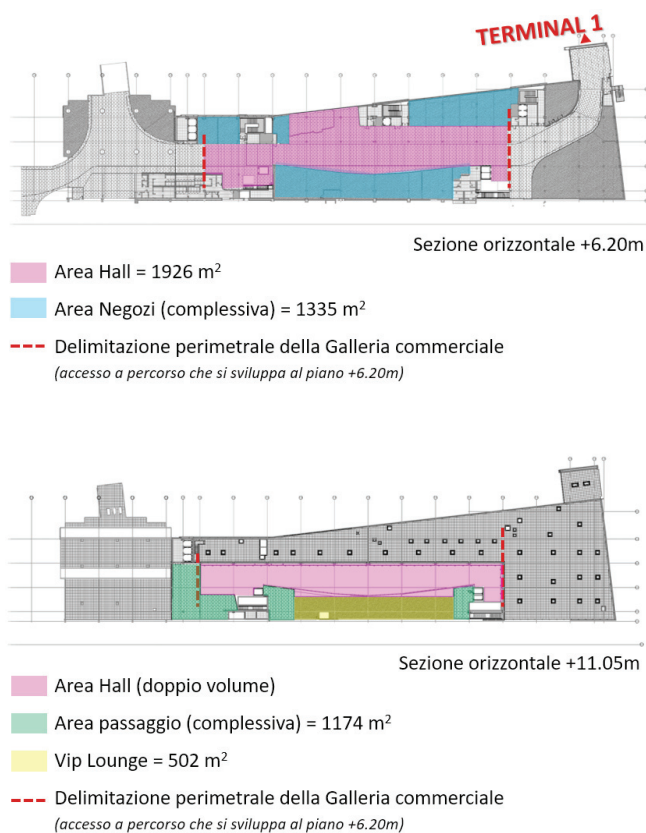
## 1 | Descrizione dell'incarico, analisi della letteratura scientifica e dei riferimenti normativi

Numerosi studi evidenziano come il benessere percepito all'interno degli ambienti dedicati alle attività commerciali incida sulla permanenza dei clienti e conseguentemente sulle vendite e sui ricavi [1]-[3]. Il presente articolo riporta le analisi condotte presso la galleria commerciale dell'avancorpo del Molo A dell'Aeroporto di Fiumicino (vedi Fig. 1). Tale ambiente si estende, nel suo doppio volume di altezza pari a circa 12 m, per una lunghezza di quasi 115 m e su di essa affacciano quattordici esercizi commerciali, prevalentemente sprovvisti di vetrina. Le gallerie commerciali sono ambienti di grandi dimensioni, la cui forma sproporzionata, insieme alla distribuzione degli arredi, non consente l'instaurarsi di

un campo diffuso all'interno dello spazio e pertanto non rende possibile determinare una curva di propagazione sonora univoca. Esse sono caratterizzate da uno sviluppo spaziale in cui la dimensione predominante è la lunghezza e le principali riflessioni sono generate dalle superfici del pavimento e del soffitto, insieme alle pareti laterali più estese [4]. La complessità degli ambienti di grandi dimensioni impedisce l'applicazione di metodi per la previsione del campo sonoro basati sull'acustica statistica e sull'acustica geometrica [5]. Pertanto, per gli ambienti non sabiniani, si rende necessaria la simulazione mediante modelli empirici o mediante software di calcolo. Tra i modelli empirici semplificati che sono stati analizzati, si è fatto riferimento al Modello Friberg, Modello Zetterling e Modello Schultz [5]-[7]. Tali modelli non sono largamente convalidati e permettono di determinare l'anda-

mento dell'attenuazione sonora in funzione della distanza con una significativa approssimazione [5].

Gli ambienti commerciali non sono oggetto di specifiche indicazioni prestazionali riportate all'interno di normative di riferimento. Ai fini del presente studio, è stata presa a riferimento la normativa tecnica definita per gli ambienti industriali [8], [9]. Tale assimilazione è stata ritenuta opportuna tenendo conto delle similitudini tra queste categorie di ambienti, in termini di sviluppo spaziale e variabilità di distribuzione degli arredi. Il confronto tra le due categorie in esame è stato eseguito nonostante le tipologie di sorgenti sonore presenti – macchinari all'interno degli ambienti industriali, rispetto al parlato all'interno della galleria commerciale – e l'utilizzo degli spazi – attività lavorativa negli ambienti industriali e conversazione nella galleria commerciale – differiscano significativamente. Non essendo presenti postazioni di permanenza definite, non si è ritenuto pertinente analizzare altri parametri. Le caratteristiche acustiche consigliate indicano che, per un ambiente con volume maggiore di 1000 m<sup>3</sup>, il tasso di decadimento spaziale della pressione sonora al raddoppio della distanza (DL<sub>2</sub>) sia maggiore di 3-4, al fine di rendere trascurabili le riflessioni generate dall'ambiente, rispetto all'energia diretta proveniente da una determinata sorgente. Questa condizione può ritenersi rispettata, in genere, se l'area equivalente di assorbimento è maggiore di 0.6-0.9 volte la superficie del pavimento [8].



**Fig. 1 – Sezioni orizzontali della galleria commerciale**  
*Horizontal sections of the shopping mall*

## 2 | Metodologia di indagine

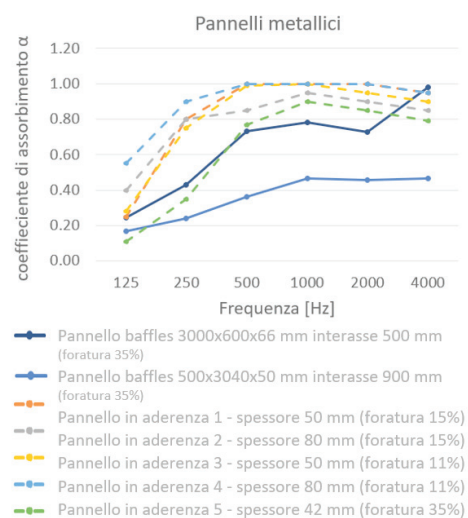
A partire dalla soluzione di progetto prevista, consistente nell'installazione di pannelli metallici sospesi a soffitto, sono state definite le caratteristiche acustiche del pannello tipo. È stata condotta l'analisi acustica dello stato attuale mediante misure fonometriche dell'indice di attenuazione spaziale dei livelli di pressione sonora al raddoppio della distanza (DL<sub>2</sub> [dB]), nella galleria, e del tempo di riverberazione (T<sub>30</sub> [s]), nei negozi. L'elaborazione delle misure ha permesso la taratura di un modello acustico tridimensionale semplificato. Tale modello è stato implementato con l'inserimento dei pannelli di progetto ed è stato determinato il beneficio acustico corrispondente, rispetto alla configurazione attuale, in termini di incremento del parametro DL<sub>2</sub> [dB].

## 3 | Descrizione dell'intervento di progetto

L'intervento di progetto prevede l'installazione di 168 pannelli metallici, di dimensioni 240 cm × 120 cm, posati alternativamente in verticale e in orizzontale, nello spessore della struttura reticolare presente sul soffitto della galleria commerciale (vedi Fig. 2). L'attribuzione delle prestazioni acustiche al pannello a soffitto è stata effettuata sulla base dell'analisi e del confronto di soluzioni similari presenti in commercio (Fig. 3).



**Fig. 2 – Render di progetto con i pannelli a soffitto**  
*Project rendering with ceiling panels*

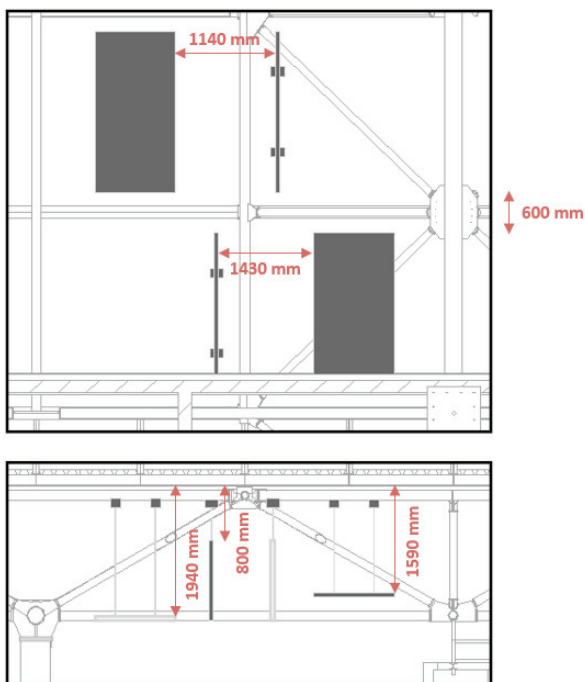


**Fig. 3 – Coefficienti di assorbimento acustico riportati nelle schede tecniche dei pannelli fonoassorbenti metallici analizzati**  
*Sound absorption coefficients reported in the data sheets of the metal absorber panels analysed*

Il ridotto numero di rapporti di prova di laboratorio, disponibili per materiali metallici testati in configurazione diversa da quella in aderenza, ha determinato una maggiore difficoltà nella stima dell'area equivalente di assorbimento acustico per elemento ( $A$  [ $m^2$ ]). I pannelli di progetto verranno prodotti ad hoc per l'intervento in esame, in quanto, tenuto conto delle dimensioni e della giacitura richiesta dal committente, non vi sono prodotti analoghi già disponibili in commercio. Per l'analisi acustica preliminare, sono stati analizzati vari rapporti di prova di diverse aziende produttrici di pannelli metallici fonoassorbenti. I coefficienti di assorbimento analizzati risultano molto variabili: in particolare, non sono presenti rapporti di prova di laboratorio relativi a pannelli installati con un interasse e una giacitura similari a quelle di progetto. Nella Tabella 1 e in Figura 4, sono riportate, rispettivamente, le prestazioni acustiche attribuite al pannello di progetto (A) e la giacitura di una campata tipo.

**Tab. 1 – Area equivalente di assorbimento acustico stimata per elemento**  
*Estimated equivalent sound absorption area per element*

| Tipo di pannello   | S (mq) | Area equivalente di assorbimento acustico per elemento (mq) |     |     |      |      |      |
|--|--------|---|-----|-----|------|------|------|
|  |        | Frequenza (Hz)  |     |     |      |      |      |
|  |        | 125   | 250 | 500 | 1000 | 2000 | 4000 |
| Pannello fonoassorbente in lamiera metallica microforata riempita mediante lana minerale di dimensioni 1200x2400x60 mm | 5.76   | 0.9   | 1.7 | 2.9 | 3.5  | 3.5  | 4.0  |

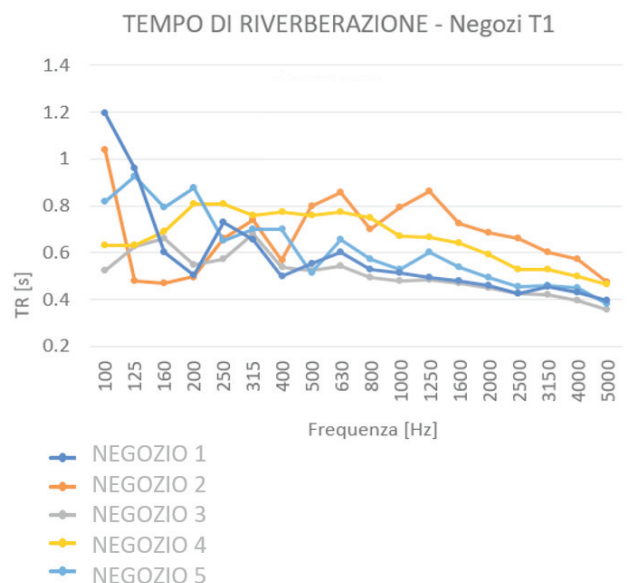


**Fig. 4 – Dettaglio della giacitura di un modulo della galleria commerciale, composto da quattro pannelli (schema in pianta e sezione)**

*Detail of the layout of a shopping gallery module, consisting of four panels (plan and cross-section diagram)*

#### 4 | Analisi acustica dello stato attuale: misure fonometriche di tempo di riverberazione e decadimento sonoro al raddoppio della distanza

L'analisi acustica dello stato attuale ha previsto la caratterizzazione dello scenario di indagine attraverso misure fonometriche del decremento del rumore al raddoppio della distanza sorgente-ricevitore ( $DL_2$ , secondo [10]) in alcune direttrici principali, al fine di valutare la propagazione del rumore all'interno della galleria commerciale, e di tempo di riverberazione ( $T_{30}$ , secondo [11]), all'interno di alcuni negozi. Per tali misure, è stato utilizzato un fonometro e una sorgente omnidirezionale provvista di amplificatore. Per l'elaborazione delle misure è stato implementato un foglio di calcolo su Excel. Le informazioni reperite per i negozi (rilievo materico e tempi di riverberazione) sono state utilizzate come punto di partenza per la caratterizzazione acustica dei materiali che compongono le superfici interne di tutte le attività commerciali sopra descritte. I tempi di riverberazione dei negozi (Fig. 5) sono stati misurati, ma non è stato possibile confinare completamente tali locali, in quanto le chiusure sono costituite da elementi permeabili al suono (Fig. 6). La presenza di numerosi oggetti e arredi all'interno dei negozi determina condizioni di assorbimento acustico localizzato completamente differenti da quelle che caratterizzano la galleria commerciale.



**Fig. 5 – Schema planimetrico con indicazione dei negozi in cui sono state effettuate le misure di tempo di riverberazione e risultati del tempo di riverberazione**

*Layout showing shops where reverberation time measurements were carried out and reverberation time results*

## NEGOZIO 5

Tipo di controsoffitto: grigliato metallico.

Presenza di vetrina: nessuna.

Presenza di elementi fonoassorbenti di arredo: elevata.

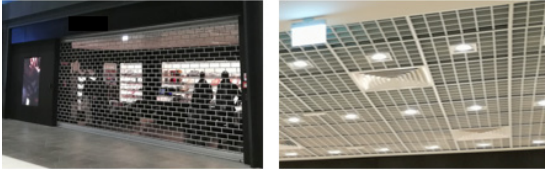
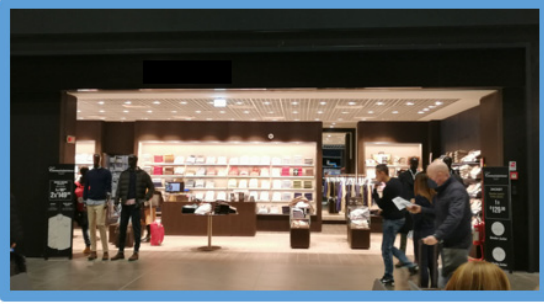


Fig. 6 – Scheda esemplificativa di rilievo materico di un negozio  
Example sheet of material survey of a shop

La misura del decremento del rumore al raddoppio della distanza è stata eseguita mediante la procedura per la valutazione del parametro  $DL_2$  [dB] [10]. Tenendo conto dello sviluppo planimetrico e volumetrico della galleria commerciale, sono state determinate quattro aree funzionali all'interno della galleria e per ciascuna di esse è stato misurato il relativo parametro  $DL_2$ , come riportato in Figura 7.

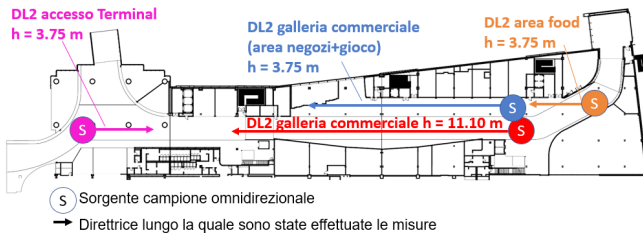


Fig. 7 – Schema planimetrico con indicazione delle postazioni individuate per la sorgente campione e le direttrici lungo le quali sono state effettuate le misure fonometriche  
Layout showing the positions of the sample sources and the directions along which the SPL measurements were carried out

## 5 | Il modello acustico tridimensionale della galleria

Per la verifica dell'efficacia acustica dei pannelli di progetto, è stato costruito il modello geometrico tridimensionale semplificato dell'ambiente (Fig. 8). Il software acustico utilizzato per la simulazione è Ramsete vers. 2.7, opportunamente tarato sulla base dei risultati delle misure fonometriche di  $DL_2$  (Tab. 2). La taratura è stata eseguita modificando, in primo luogo, i coefficienti di assorbimento acustico degli elementi caratterizzati da un comportamento acustico più incerto, quali arredi e impianti a soffitto.

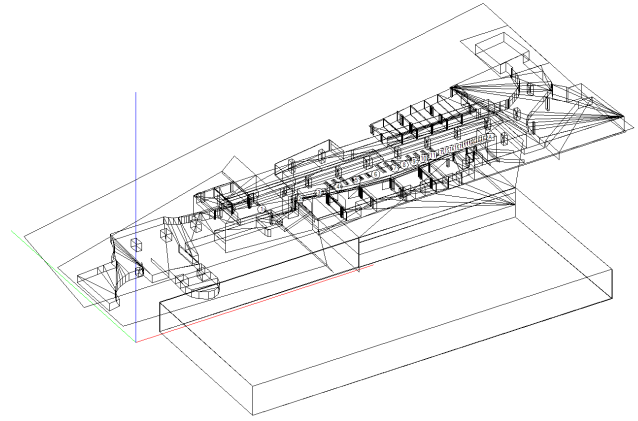


Fig. 8 – Modello acustico per la previsione della propagazione sonora nella galleria commerciale  
Acoustic model for predicting sound propagation in the shopping mall

Tab. 2 – Confronto del parametro  $DL_2$  nei quattro campi analizzati per la direttrice principale (riportata in rosso in Figura 7) della galleria commerciale

Comparison of  $DL_2$  parameter in the four fields analysed for the main direction (shown in red in Figure 7) of the shopping mall

| $DL_2$ [dB] galleria commerciale | CAMPO  |            |           |           |
|----------------------------------|--------|------------|-----------|-----------|
|                                  | VICINO | INTERMEDIO | LONTANO 1 | LONTANO 2 |
| MISURATO                         | 4.0    | 2.6        | 4.0       | 5.3       |
| SIMULATO                         | 4.3    | 3.0        | 4.1       | 5.2       |
| Differenza                       | +0.3   | +0.4       | +0.1      | -0.1      |

## 6 | Risultati

In Figura 9, sono riportati i risultati del modello acustico nella condizione attuale e nella condizione di progetto. I risultati si riferiscono al campo intermedio, tra 5 e 16 m, e sono riportati

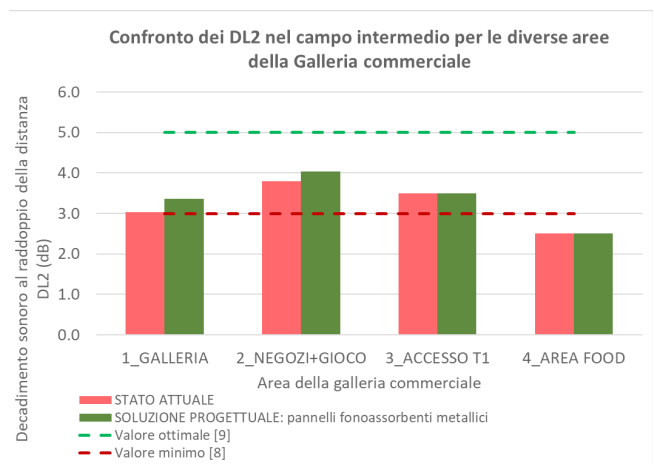


Fig. 9 – Grafico di confronto del parametro  $DL_2$  nel campo intermedio per le diverse aree della galleria commerciale  
Comparison of  $DL_2$  parameter in the intermediate range for different areas of the shopping mall

nelle quattro aree, poste a diverse quote, in cui è stato misurato il parametro  $DL_2$  (descritte in Fig. 7). Inoltre, si riporta il confronto con i valori di riferimento [8], [9].

## Conclusioni

Dai risultati delle misure fonometriche il parametro  $DL_2$  risulta al di sopra del valore minimo indicato dalla normativa tecnica di riferimento, ad eccezione del campo intermedio dell'area della galleria commerciale e dell'area food, in cui il valore misurato del  $DL_2$  è inferiore a 3 dB. L'ipotesi progettuale risulta sufficiente al raggiungimento di un  $DL_2$  maggiore o uguale al valore minimo, in tutti i campi nella direttrice principale della galleria commerciale (rappresentata in rosso in Fig. 7).

## Conclusions

From the results of acoustics measurements, the  $DL_2$  parameter is above the minimum value indicated by the technical reference standard, with the exception of the intermediate field of the shopping gallery area and the food area, where the measured value of  $DL_2$  is less than 3 dB. The design solution is sufficient to achieve a  $DL_2$  greater than or equal to the minimum value, in all the fields in the main shopping gallery area (shown in red in Fig. 7).

## Ringraziamenti

Si ringrazia la società ADR Ingegneria per la collaborazione durante tutte le fasi di svolgimento del lavoro.

## Bibliografia

- [1] N. Kanev, 'Study and Improvement of Acoustic Conditions in Public Spaces of Shopping Malls', *Acoustics*, vol. 3, no. 1, pp. 137-155, Feb. 2021, doi: 10.3390/acoustics3010011.
- [2] J. Treasure, *Sound business*. Management Books 2000 Limited Oxford, 2011.
- [3] S. Biggar and D. McAdams, 'Time is money: Shoppers buy more when they stay longer', 2016.
- [4] N. Prodi, 'La propagazione del rumore negli ambienti industriali', Seminario AIA - GAA: Riduzione del rumore negli ambienti industriali, Jun. 2005.
- [5] R. Spagnolo, *Manuale di acustica applicata*. Torino: UTET libreria, 2001.
- [6] M. Hodgson, 'Review and critique of existing simplified models for predicting factory noise levels', *Canadian Acoustics*, vol. 19, no. 1, pp. 15-23, 1991.
- [7] M. Hodgson, 'Experimental Evaluation of Simplified Methods for Predicting Noise Levels in Industrial Workrooms', *Proceedings of the Acoustics Week in Canada*, vol. 24, no. 3, 1996.
- [8] UNI EN ISO 11690-1:2021 *Acustica - Raccomandazioni pratiche per la progettazione di ambienti di lavoro a basso livello di rumore contenenti macchine - Parte 1: Strategie per il controllo del rumore*.
- [9] UNI EN ISO 11690-2:1999 *Acustica - Raccomandazioni pratiche per la progettazione di ambienti di lavoro a basso livello di rumore contenenti macchine - Parte 1: Provvedimenti per il controllo del rumore*.
- [10] UNI EN ISO 14257:2004 *Acustica - Misurazione e descrizione parametrica delle curve di decadimento del suono nello spazio degli ambienti di lavoro per la valutazione delle loro prestazioni acustiche*.
- [11] UNI EN ISO 3382-2:2008 *Acoustics - Measurement of room acoustic parameters - Part 2: Reverberation time in ordinary rooms*. 2008.





# Riflessioni sul rumore intrusivo da sorgente specifica

Giovanni Brambilla

CNR-STEMS, Sede di Ferrara  
Via Canal Bianco, 28, 44124 Ferrara  
giovanni.brambilla@stems.cnr.it

**Ricevuto:** 31/8/2023

**Accettato:** 11/10/2023

**DOI:** 10.3280/ria2-2023oa16408

**ISSN:** 2385-2615

La specifica tecnica UNI/TS 11844:2022, pubblicata a marzo 2022, propone una metodologia di determinazione dell'intrusività di una immissione sonora da sorgente identificata che si basa sui principi della "Signal Detection Theory" (SDT). L'entità dell'intrusività è quantificata mediante il parametro "Detectability Level" D'L, calcolato comparando gli spettri, a 1/3 di ottava o in Bark per tenere conto del mascheramento uditivo, della stimata immissione sonora della sorgente specifica, ovvero il "segnale", e della immissione sonora residua misurata a sorgente inattiva, ovvero il "rumore".

Con la presente nota si intende contribuire al dibattito in corso durante la sperimentazione triennale della specifica tecnica, proponendo alcune riflessioni riguardanti la stima dello spettro della sorgente specifica oggetto di accertamento e la determinazione del parametro "detectability" d' per ciascuna banda di frequenza, nonché un approccio probabilistico sulla variabilità di D'L conseguente alla scelta dei parametri impiegati per determinare gli spettri del segnale e del rumore da comparare.

**Parole chiave:** rumore intrusivo, valutazione dell'intrusività, sorgente specifica

## Remarks on intrusive noise from specific source

The technical specification UNI/TS 11844:2022, published on March 2022, provides a method to determine the intrusiveness of a sound immission from an identified source, based on the "Signal Detection Theory" (SDT). The amount of intrusiveness is quantified by the "Detectability Level" D'L, a parameter obtained by comparing the spectra, at 1/3 octave band or in Bark to account for the hearing masking, of the sound immission by the specific source, namely the "signal", with that of the residual sound, namely the "noise", measured when the intrusive sound is absent.

The present communication offers some remarks to the ongoing discussion during the three-year test phase of the technical specification, dealing with the estimate of the spectrum of the specific source and the determination of the detectability parameter d' in each frequency band, as well as a probabilistic approach on the D'L variability due to the chosen type of parameters used to compare the signal and the noise spectra.

**Keywords:** intrusive noise, intrusivity evaluation, specific source

## 1 | Introduzione

Il rumore intrusivo è oggetto di attenzione da molti anni e numerosi sono gli studi e le ricerche reperibili in letteratura, si veda ad es. [1-3], anche per le sue ripercussioni nella legislazione [4] e nei contenziosi ove è richiesto di accertare invocati effetti di disturbo da parte della persona esposta.

A marzo 2022 è stata pubblicata la specifica tecnica UNI/TS 11844:2022 "Procedure per la misurazione e l'analisi del rumore intrusivo" [5], che propone una metodologia di determinazione dell'intrusività di una immissione sonora basata sulla "Signal Detection Theory" (SDT), teoria psicofisica che analizza la risposta di un osservatore alla esposizione a un segnale in presenza di rumore, ovvero la sua capacità (sensibilità) di distinguere il segnale rispetto al rumore interferente [6].

La metodologia è stata proposta come specifica tecnica piuttosto che come norma onde permettere un triennio di sperimentazione applicativa e di approfondimenti ritenuti ne-

cessari al momento della sua pubblicazione. Come esplicitamente indicato nel testo, infatti, la procedura considera solo gli aspetti fisici del rumore intrusivo, limitandosi a comparare gli spettri della stimata immissione sonora della sorgente specifica oggetto di accertamento e della immissione sonora residua misurata a sorgente inattiva, e non considera i complessi meccanismi, non solo acustici, che concorrono a determinare la percezione dell'intrusività e del disturbo indotto. Ciò nonostante, la procedura può costituire un ulteriore strumento per l'accertamento tecnico in sede di procedimento contenzioso al fine di determinare l'intrusività, nel contesto acustico in esame, della immissione sonora prodotta dalla sorgente specifica.

A distanza di più di un anno dalla sua pubblicazione, sono state pubblicate alcune esperienze sull'applicazione della UNI/TS 11844:2022 [7-9] che hanno evidenziato l'utilità della specifica tecnica in contesti molteplici e diversi [7], un sufficiente accordo tra percezione sonora del contesto acu-

stico da parte degli operatori ed entità della intrusività ottenuta [9], ma anche una accentuata variabilità dei valori di quest'ultima (D'L) conseguente alle impostazioni di misura e ai parametri caratterizzanti gli spettri da comparare (spettri medi e/o livelli percentili di banda) scelti dall'operatore [8]. A questo riguardo, pur nella consapevolezza dell'impossibilità di gestire compiutamente l'infinita casistica riscontrabile nella realtà, si auspica l'emanazione di linee guida più dettagliate per orientare l'operatore nelle scelte da eseguire [8].

In considerazione di quanto sopra esposto, con la presente nota si intende contribuire alle esperienze in corso con alcune riflessioni e approfondimenti in merito ai seguenti aspetti:

- a) procedura per la stima dello spettro della sorgente oggetto di accertamento;
- b) approccio probabilistico all'intrusività (D'L), ottenibile solo con l'acquisizione dei multispettri del suono residuo e di quello ambientale al fine di determinare l'intervallo di variabilità di D'L.

I due sopra elencati aspetti sono discussi e illustrati anche con l'ausilio di due casi studio di misurazioni reali.

## 2 | Materiali e metodi

### 2.1 | Stima dello spettro della sorgente specifica

La UNI/TS 11844:2022 propone una procedura per la stima dello spettro della sorgente specifica oggetto di accertamento che si riferisce ai metodi descritti nella norma UNI 10855:1999 per la misura e la valutazione del contributo acustico di singole sorgenti [10]. Poiché i rilevamenti del suono ambientale e di quello residuo si riferiscono necessariamente a intervalli temporali diversi, eventualmente anche con tempi di misura differenti, ne consegue che non è possibile comparare istante per istante gli spettri misurati del suono ambientale e di quello residuo per stimare lo spettro della immissione sonora della sorgente specifica. È necessario, pertanto, determinare spettri raggruppati su base temporale descritti con parametri concisi, ritenuti rappresentativi delle due immissioni sonore. Nel caso che entrambi i suoni ambientale e residuo siano costanti nel tempo, situazione presa in esame nell'appendice A della UNI/TS 11844:2022 ma difficilmente riscontrabile nella realtà, è sufficiente considerare gli spettri medi ( $L_{Aeq}$ ). Per suoni variabili nel tempo, i più frequenti, dai multispettri acquisiti con cadenza temporale breve (ad es. 100 o 125 ms) si possono considerare gli spettri dei livelli minimi o massimi, oppure i livelli percentili di banda. Ad esempio, gli spettri dei livelli minimi di banda sia del suono ambientale che di quello residuo, essendo presenti durante l'intera durata dei rispettivi tempi di misura, sono rappresentativi della componente stazionaria di entrambi i suoni.

È opportuno evidenziare che la stima della immissione sonora della sorgente specifica si basa sull'ipotesi che il suono residuo sia rappresentativo del rumore di fondo, costituito dall'insieme delle immissioni sonore diverse da quella oggetto

di accertamento e contemporaneamente presenti a quest'ultima. Al riguardo, la UNI/TS 11844:2022 specifica di verificare che il contesto acustico oggetto di indagine rimanga il più possibile inalterato nelle due condizioni, rispettivamente, di inattività e attività della sorgente specifica, ad esclusione ovviamente del contributo di quest'ultima. A tale scopo i rilevamenti acustici nelle due suddette condizioni, necessariamente relativi a tempi diversi, dovrebbero essere eseguiti in prossimità o analogia temporale tra loro. In linea generale, stante la casistica praticamente infinita dei contesti acustici riscontrabili nella realtà, non è possibile dare indicazioni ulteriori rispetto a quelle specificate nella UNI/TS 11844:2022 in merito alla rappresentatività del suono residuo relativamente al rumore di fondo, che dovrà essere accertata di volta in volta con le metodiche ritenute più idonee dall'operatore.

La stima dello spettro della immissione sonora della sorgente specifica, a bande di 1/3 di ottava tra 25 e 10000 Hz o in Bark per tenere conto del mascheramento uditivo, è ottenuta dagli spettri misurati del suono ambientale e di quello residuo facendo riferimento al "Metodo C" di cui al punto 5.3 della UNI 10855:1999, articolato per ciascuna banda  $f$  come segue:

- c) per le bande di frequenza  $f$  ove la differenza algebrica  $\Delta_f$  tra livello del suono ambientale ( $L_{fa}$ ) e quello del suono residuo ( $L_{fr}$ ) risulti:

$$(1) \quad \Delta_f = L_{fa} - L_{fr} \geq 3 \quad [\text{dB}]$$

il livello stimato della sorgente specifica ( $L_{fs}$ ) è determinato mediante la relazione:

$$(2) \quad \Delta_f = L_{fa} - L_{fr} \geq 3 \quad [\text{dB}]$$

in ciascuna delle restanti bande di frequenza  $f$ , per la stima del livello  $L_{fs}$  si assume:

$$(3) \quad L_{fs} = 10 \lg [10^{(L_{fa}/10)} - 10^{(L_{fr}/10)}] \quad [\text{dB}]$$

ovvero si ipotizza che il livello sonoro della sorgente specifica abbia lo stesso valore del rumore di fondo.

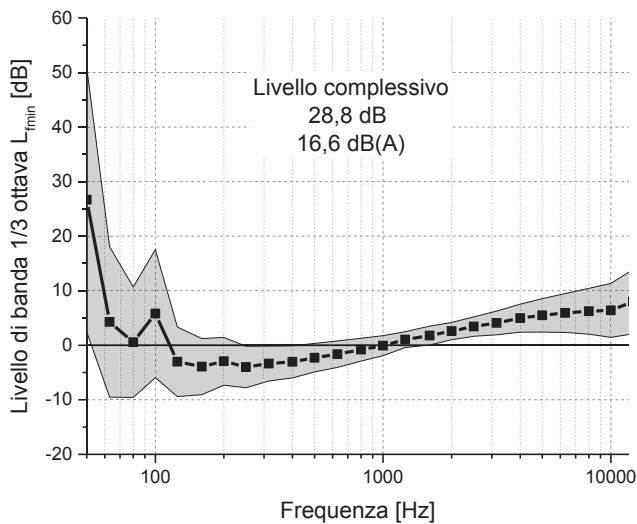
Il testo pubblicato della UNI/TS 11844:2022 non contempla il caso, non impossibile, in cui in una o più bande di frequenza  $f$  si verifichi:

$$(4) \quad \Delta_f = L_{fa} - L_{fr} \leq 0 \quad [\text{dB}]$$

In tali circostanze non è possibile stimare il livello della sorgente specifica  $L_{fs}$  che, pertanto, risulta indeterminato. Conseguentemente, in dette bande di frequenza  $f$  il valore del parametro "detectability" è da considerare nullo e, pertanto, non contribuisce all'entità del valore complessivo della "detectability" che tiene conto dei contributi di tutte le bande di frequenza  $f$ .

Nelle misurazioni a bassi livelli sonori, abbastanza frequenti in presenza di suono intrusivo, onde evitare che i risultati siano inficiati da artefatti metrologici introdotti dal

rumore autogenerato dalla strumentazione, è necessario verificare che in ogni banda di frequenza  $f$  i livelli misurati sia per il suono ambientale che per quello residuo siano superiori di almeno 10 dB rispetto al rumore autogenerato dalla strumentazione. Al riguardo può essere utile quanto emerso da uno studio sperimentale condotto su sei fonometri, di differenti marche e modelli tra i più diffusi, per determinarne il rumore autogenerato [11]. Nella Fig. 1 è riportato lo spettro medio dei livelli sonori minimi e  $\pm$  lo scarto tipo (area in grigio) rilevati in camera anecoica. Un approccio cautelativo potrebbe configurarsi nel considerare come rumore autogenerato dalla strumentazione il valore medio dei livelli sonori minimi maggiorato dello scarto tipo (linea superiore dell'area in grigio in Fig. 1). Le bande di frequenza  $f$  ove non vi è conformità con il suddetto criterio dell'eccedenza di 10 dB del livello sonoro rilevato rispetto al rumore autogenerato dalla strumentazione dovrebbero essere escluse dalla stima del livello della sorgente specifica  $L_{rs}$  e il corrispondente valore del parametro "detectability" dovrebbe essere nullo.



**Fig. 1 – Spettro medio, sui sei fonometri, dei livelli minimi del rumore ambientale rilevato in camera anecoica (area grigia pari a  $\pm$  lo scarto tipo)**  
*Average spectrum, across the six sound level meters, of the minimum SPL measured in the anechoic chamber (grey area corresponding to  $\pm$  standard deviation)*

## 2.2 | Approccio probabilistico per il "Detectability Level" D'L

Il valore del parametro "Detectability Level" D'L in dB utilizzato per quantificare l'intrusività dipende da vari fattori, tra i quali molto importanti sono i tempi di misura prescelti per il suono ambientale e quello residuo, nonché la differenza algebrica  $\Delta L = L_a - L_r$  tra i livelli dei due suoni. A questi fattori si aggiunge anche la variabilità di D'L conseguente alla non stazionarietà dei suoni ambientale e residuo che richiede la scelta dei parametri da utilizzare per determinare gli spettri da comparare (ad es. spettri medi e/o percentili di banda). Qualora si disponga solo degli spettri medi ( $L_{Aeq}$ ) per entrambi

i suoni ambientale e residuo si ottiene, ovviamente, un unico valore di D'L calcolato mediante:

$$(5) \quad D'L = 10 \lg(d'_c) \quad [\text{dB}]$$

ove è il valore complessivo della "detectability" che tiene conto dei contributi di tutte le  $N$  bande di frequenza  $f$ , calcolato con:

$$(6) \quad d'_c = \sqrt{d'_{f1}{}^2 + d'_{f2}{}^2 + \dots + d'_{fN}{}^2}$$

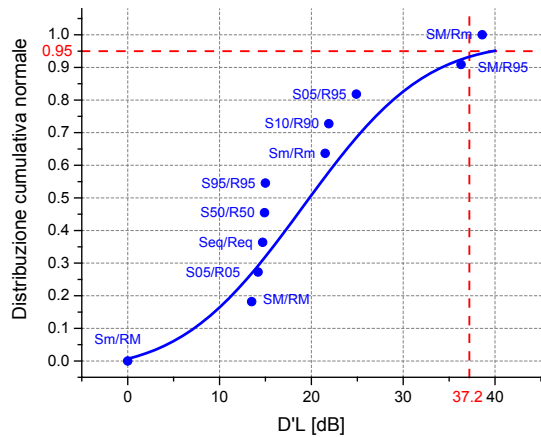
Altrettanto utile è determinare la banda di frequenza  $f$  ove si registra il valore massimo di  $d'$  ( $d'_{max}$ ), essendo questa banda a richiedere la maggiore attenzione in un'ottica di risanamento acustico.

Una valutazione più dettagliata è, invece, possibile qualora si acquisisca la serie temporale degli spettri del suono ambientale e del suono residuo con l'intervallo di memorizzazione prescelto (ad es. 100 o 125 ms). L'acquisizione di tali multispettri, infatti, consente non solo di determinare lo spettro dei livelli di banda minimi o massimi, ma anche dei percentili di banda, fornendo così informazioni utili sulla variabilità di D'L conseguente alla variabilità nel tempo dei suoni ambientale e residuo e ai parametri scelti dall'operatore per caratterizzare gli spettri da comparare.

Questo approccio consente di determinare il valore massimo e quello minimo di D'L, rispettivamente corrispondenti alle due seguenti configurazioni:

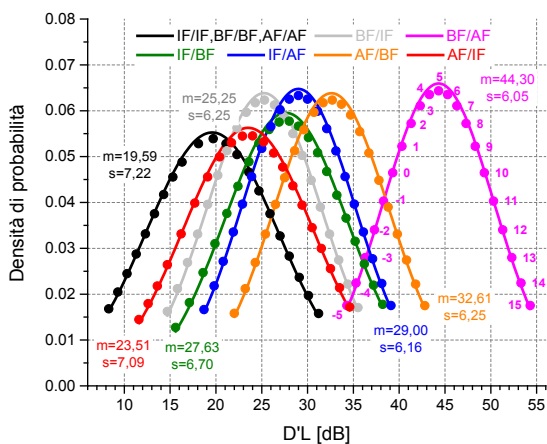
- spettro stimato dei livelli massimi della sorgente specifica (SM) comparato con lo spettro misurato dei livelli minimi del suono residuo (Rm) in corrispondenza dei quali si ottiene il valore massimo  $D'L_{max}$ ;
- spettro stimato dei livelli minimi della sorgente specifica (Sm) comparato con lo spettro misurato dei livelli massimi del suono residuo (RM) in corrispondenza dei quali si ottiene il valore minimo  $D'L_{min}$ .

All'interno di questo intervallo, la cui ampiezza già fornisce una chiara indicazione della variabilità di D'L, si collocano gli altri valori di D'L ottenibili considerando per entrambi i suoni i percentili di banda, oppure confrontando gli spettri medi o quelli dei livelli minimi o massimi. Si ottiene così una distribuzione empirica di valori di D'L, confrontabile anche con quella teorica che meglio interpola i dati empirici, mediante la quale determinare la probabilità che uno specifico valore di D'L sia superato, ovvero il valore di D'L che non sia superato per un prefissato valore di probabilità. La Fig. 2 illustra una distribuzione cumulativa empirica ottenuta dai valori di D'L determinati per confronto tra coppie di spettri della sorgente specifica  $S$  (stimato) e del suono residuo  $R$  (misurato ed equiparato al rumore di fondo) secondo alcuni indicatori (ad es.  $M$  = spettro dei massimi,  $m$  = spettro dei minimi, valori numerici corrispondenti a specifici percentili). Ad esempio, un approccio cautelativo potrebbe configurarsi nel determinare il valore di D'L che sia superato solo nel 5% del proprio intervallo di variabilità ( $D'L_{05}$ , linee tratteggiate in Fig. 2).



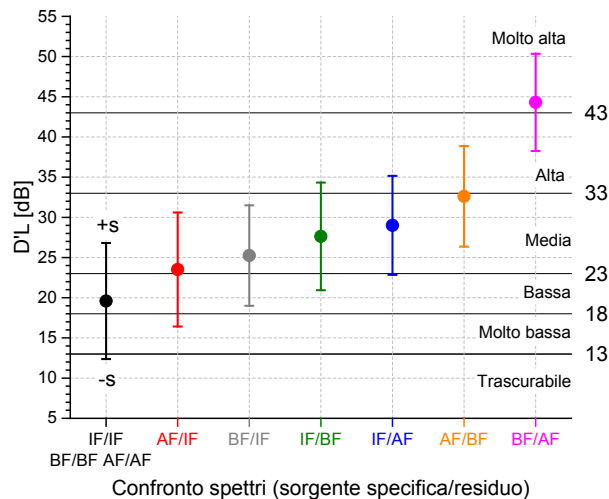
**Fig. 2 – Distribuzione empirica e sua interpolazione con funzione di distribuzione cumulativa normale (linea blu) dei valori D'L ottenuti per alcune coppie di spettri della sorgente S e del suono residuo R. La linea tratteggiata rossa indica il valore di D'L che non è superato per il 95% del suo intervallo di variabilità in funzione dei parametri usati per il calcolo degli spettri**  
*Empirical distribution and its fitting with normal cumulative distribution function (blue line) of D'L values determined for some couples of spectra of source S and residual sound R. The dash line shows the D'L value not exceeded by 95% of its variability range determined by the parameters used for spectra calculation*

Per i suoni costanti nel tempo, come quelli considerati nella appendice A della UNI/TS 11844:2022, si osserva che i valori di D'L ottenuti per le varie combinazioni di tipologie degli spettri sono ben interpolabili con curve gaussiane, come illustrato nella Fig. 3 ove i numeri accanto ai dati di D'L ottenuti per il confronto degli spettri BF/AF indicano il valore della differenza algebrica  $\Delta L = L_a - L_r$ .



**Fig. 3 – Distribuzione empirica (simboli cerchio) e sua interpolazione con funzione di distribuzione normale (linea continua) dei valori D'L ottenuti per diversi valori DL = L<sub>a</sub> - L<sub>r</sub> per i suoni costanti di cui nell'appendice A della UNI/TS 11844:2022. IF = spettro con livello di banda costante in frequenza; BF = spettro con livello di banda decrescente di -1 dB per 1/3 ottava all'aumentare della frequenza; AF = spettro con livello di banda crescente di +1 dB per 1/3 ottava all'aumentare della frequenza**  
*Empirical distribution (dot symbols) and its fitting with normal distribution function (solid line) of D'L values determined for some values of DL = L<sub>a</sub> - L<sub>r</sub> for the constant sounds considered in the appendix A of UNI/TS 11844:2022. IF = spectrum with constant band level; BF = spectrum with band level decreasing -1 dB for 1/3 octave with frequency increasing; AF = spectrum with band level increasing +1 dB per 1/3 octave with frequency increasing*

I parametri sintetici delle 7 curve normali, ossia media  $m$  e scarto tipo  $s$ , sono riportati sempre nella Fig. 3, mentre nella Fig. 4 per ciascuna di esse è mostrato il valore medio e l'intervallo di ampiezza  $\pm 1$  volta lo scarto  $s$ , entrambi comparati con la scala orientativa proposta nella UNI/TS 11844:2022 (Prospetto 3) per stimare l'entità dell'intrusività in base ai valori di D'L, escludendo quindi gli aspetti connessi con la percezione. È evidente che al crescere della intrusività diminuisce lo scarto  $s$  della distribuzione dei valori di D'L che, pertanto, interessa un minore numero di intervalli della scala di intrusività sopra citata, come evidenziato nella Fig. 4 per ciascuna delle 7 distribuzioni normali.



**Fig. 4 – Parametri sintetici (media e  $\pm 1$  scarto tipo) delle distribuzioni normali dei valori D'L per i suoni costanti di cui nell'appendice A della UNI/TS 11844:2022 e confronto con la scala orientativa proposta per la stima dell'entità dell'intrusività**  
*Synthetic parameters (mean and  $\pm 1$  standard deviation) of normal distributions of D'L values determined for the constant sounds considered in the appendix A of UNI/TS 11844:2022 and their comparison with the tentative scale proposed for the estimate of intrusivity*

Si ricordi, inoltre, che i parametri sintetici caratterizzanti la distribuzione normale (valore medio  $m$  e scarto tipo  $s$ ) sono stimabili a partire dai valori minimo  $D'L_{min}$  e massimo  $D'L_{max}$  corrispondenti rispettivamente alle configurazioni sopra citate a) e b). In particolare, valgono le relazioni seguenti per il valore medio  $m$  e lo scarto tipo  $s$ :

$$(7) \quad m = \frac{D'L_{max} + D'L_{min}}{2} \quad [\text{dB}]$$

$$(8) \quad s = \frac{D'L_{max} - D'L_{min}}{4} \quad [\text{dB}]$$

ove  $s$  è stimato considerando un'ampiezza di variabilità di D'L pari a 4 volte lo scarto tipo per comprendere approssimativamente il 95% dei valori.

Applicando le regole decisionali per il giudizio di conformità esposte nella UNI/TS 11326-2:2015 [12] è quindi possibile una stima probabilistica dell'entità dell'intrusività, almeno relativamente al fenomeno acustico.

Nella realtà frequentemente si è in presenza di suoni con livelli variabili nel tempo per cui il valore di D'L dipende anche dai parametri scelti per determinare gli spettri da comparare. Per illustrare questo aspetto vengono descritti due casi studio di misurazioni reali.

### 2.3 | Casi studio esemplificativi

I due casi studio di misurazioni reali considerati si riferiscono a:

- a) una sorgente sonora specifica costituita da impianti HVAC in funzionamento continuo nel periodo diurno, alloggiati in due vani tecnici al piano terra di un palazzo e ambienti residenziali prevalentemente interessati da tali immissioni situati al primo piano;
- b) il rintocco di una campana in un contesto acustico non rumoroso.

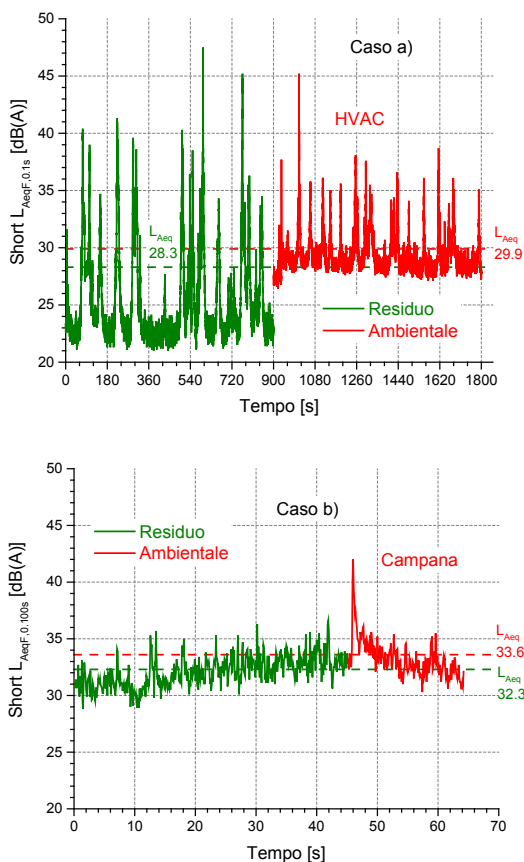
Nel caso a) la misurazione è in ambiente confinato mentre nel caso b) è all'aperto, in assenza di superfici riflettenti ad esclusione del suolo.

In entrambi i casi sono stati acquisiti i multispettri a bande di 1/3 di ottava sia del suono ambientale che di quello residuo con intervallo di memorizzazione di 0,1 s (livelli di banda in short  $L_{Aeq}$  dB Fast) e i valori complessivi dei livelli in dB e dB(A). I rilevamenti del suono ambientale e di quello

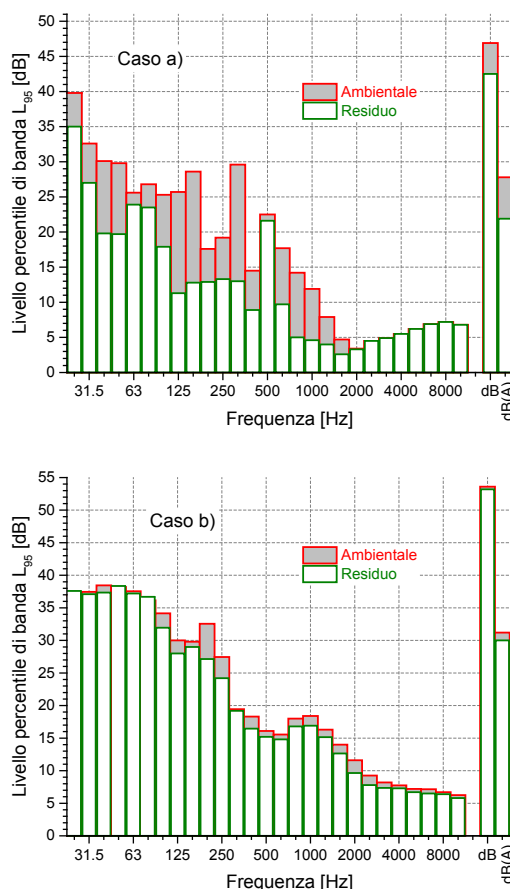
residuo sono stati eseguiti in prossimità temporale tra loro per ritenere verosimile che l'alterazione del contesto acustico dipendesse prevalentemente dal rumore intrusivo e, quindi, che il rumore di fondo, non misurabile, potesse essere plausibilmente rappresentato dal rumore residuo.

Dall'andamento nel tempo del livello complessivo in dB(A), riportato in Fig. 5, si osserva che in entrambi i casi il suono residuo presenta fluttuazioni ( $L_{A05} - L_{A95}$ ) più accentuate (12,1 dB(A)) per il caso a) che per il caso b) (4,4 dB(A)) e l'immissione sonora della sorgente specifica oggetto di accertamento altera il contesto acustico preesistente. In entrambi i casi tale alterazione è abbastanza contenuta in termini di livello  $L_{Aeq}$  ( $DL_{Aeq} = +1,6$  dB(A) nel caso a) e  $DL_{Aeq} = +1,3$  dB(A) nel caso b). Da notare che in entrambi i casi il valore di  $DL_{Aeq}$  è inferiore a 3 dB(A) per cui, secondo il criterio della accettabilità prescritto nella legislazione [13], "ogni effetto del rumore è da ritenersi trascurabile".

Una indicazione sulle caratteristiche più ricorrenti nel tempo dei suoni ambientale e residuo è ricavabile dagli spettri dei percentili di banda corrispondenti a livelli superati per alte percentuali del tempo di misura (ad es.  $L_{95}$ ). Per entrambi i casi studio, nella Fig. 6 sono riportati gli spettri dei livelli percentili di banda  $L_{95}$  del suono ambientale e di quello residuo. Nel caso a) si osserva la presenza di due componenti tonali, una nella banda centrata a 315 Hz per il suono ambientale e un'altra nella banda centrata a 500 Hz per il suono residuo.



**Fig. 5 – Andamento nel tempo del livello complessivo in dB(A) per i casi studio**  
*Time history of the overall sound pressure level in dB(A) for the case studies*



**Fig. 6 – Spettri dei livelli percentili di banda  $L_{95}$  del suono ambientale e di quello residuo per entrambi i casi studio**  
 *$L_{95}$  percentile band level spectra for the case studies*

Per le frequenze superiori a 2000 Hz, inoltre, l'andamento dello spettro è sintomatico della presenza di rumore auto-generato dalla strumentazione (si confronti con la Fig. 1) e quindi queste bande non dovrebbero essere considerate nella stima dello spettro della sorgente specifica oggetto di accertamento. Nel caso b), invece, si osserva che nelle bande centrate a 25, 50 e 80 Hz il suono residuo è maggiore del suono ambientale e, pertanto, queste bande non sono da considerare nella stima dello spettro della sorgente specifica e nel calcolo della "detectability" d'.

In merito alla variabilità dei valori di D'L, per gli spettri da comparare sono stati considerate le 11 coppie di parametri elencate nella Tab. 1, ove con S è indicato lo spettro stimato della sorgente specifica e con R quello del suono residuo.

**Tab. 1 – Coppie di parametri utilizzati per la determinazione degli spettri da comparare (S=sorgente specifica, R=suono residuo, m=spettro dei minimi, M=spettro dei massimi, eq=spettro media logaritmica)**

**Pairs of parameters used to determine the spectra to be compared (S=specific source, R=residual sound, m= spectrum of minima band levels, M=spectrum of maxima band levels, eq=equivalent band level spectrum)**

| Coppie di parametri |                 |
|---------------------|-----------------|
| $S_m/R_M$           | $S_{05}/R_{05}$ |
| $S_m/R_m$           | $S_{05}/R_{95}$ |
| $S_{95}/R_{95}$     | $S_M/R_M$       |
| $S_{eq}/R_{eq}$     | $S_M/R_{95}$    |
| $S_{50}/R_{50}$     | $S_M/R_m$       |
| $S_{10}/R_{90}$     |                 |

È stata determinata anche la distribuzione teorica corrispondente alla migliore interpolazione dei valori di D'L così ottenuti utilizzando il package "fitdistrplus" [14] in ambiente "R" [15]. Considerata la ridotta dimensione campionaria dei dati sperimentali (11 valori di D'L) per la stima dei parametri statistici delle distribuzioni dei valori di D'L si è proceduto al ricampionamento con il metodo bootstrap [16], generando 10000 sottocampioni. Per la scelta della distribuzione teorica con il migliore "fitting" dei dati sperimentali è stato utilizzato lo "Aikake Information Criterion, AIC" [17].

### 3 | Risultati e discussione

Nella Tab. 2 sono riportati i valori di D'L e della differenza algebrica  $\Delta L = L_a - L_r$  ottenuti per le varie coppie di parametri prescelti per la definizione degli spettri del suono della sorgente specifica (spettro stimato) e del suono residuo (spettro misurato) per il calcolo della "detectability" d' in ciascuna banda di frequenza f.

**Tab. 2 – Valori di D'L e di  $\Delta L = L_a - L_r$  in dB ottenuti per le varie coppie di parametri usati per la comparazione degli spettri nei due casi studio**

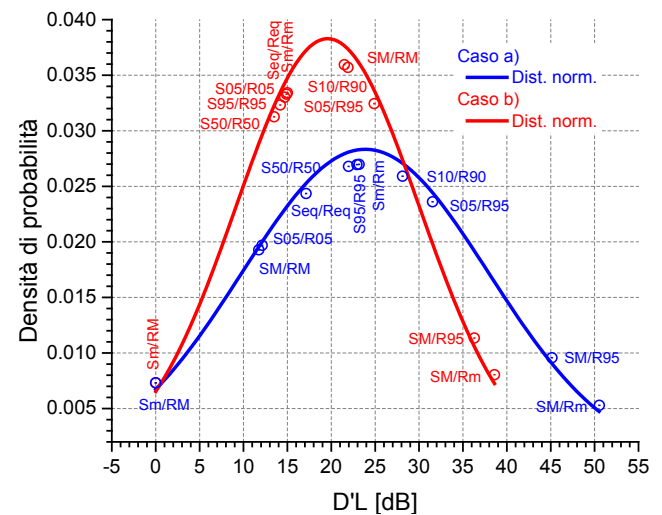
**D'L and  $\Delta L = L_a - L_r$  values in dB obtained for the pairs of parameters used for spectra comparison in the two case studies**

| Coppie di parametri | Casi |            |      |            |
|---------------------|------|------------|------|------------|
|                     | a)*  |            | b)   |            |
|                     | D'L  | $\Delta L$ | D'L  | $\Delta L$ |
| $S_m/R_M$           | 0,0  | -38,7      | 0,0  | -20,9      |
| $S_m/R_m$           | 23,2 | 5,5        | 15,0 | 2,0        |
| $S_{95}/R_{95}$     | 22,9 | 5,6        | 14,2 | 0,4        |
| $S_{eq}/R_{eq}$     | 17,0 | -2,0       | 14,9 | 0,0        |
| $S_{50}/R_{50}$     | 22,0 | 2,6        | 13,5 | 0,4        |
| $S_{10}/R_{90}$     | 28,1 | 19,0       | 21,9 | 9,2        |
| $S_{05}/R_{05}$     | 11,5 | -3,0       | 14,7 | -0,4       |
| $S_{05}/R_{95}$     | 31,5 | 23,6       | 24,9 | 11,7       |
| $S_M/R_M$           | 10,8 | -2,3       | 21,5 | -2,1       |
| $S_M/R_{95}$        | 45,1 | 35,9       | 36,3 | 14,6       |
| $S_M/R_m$           | 50,5 | 41,8       | 38,6 | 20,8       |

\* intervallo 25-2000 Hz per la presenza di rumore autogenerato dalla strumentazione a frequenze superiori

\* 25-2000 Hz frequency range to exclude self-generated instrumentation noise observed at higher frequencies

Per entrambi i casi la migliore distribuzione teorica interpolante i dati empirici di D'L è risultata quella normale, come illustrato nella Fig. 7 e con i principali parametri statistici delle distribuzioni riportati in Tab. 3.



**Fig. 7 – Distribuzione empirica (simboli cerchio) e sua interpolazione con funzione di distribuzione normale (linea continua) dei valori D'L ottenuti per le coppie di parametri in Tab. 2 per entrambi i casi studio**

**Empirical distribution (dot symbols) and its fitting with normal distribution function (solid line) of D'L values obtained for the parameter pairs in Tab. 2 for both the case studies**

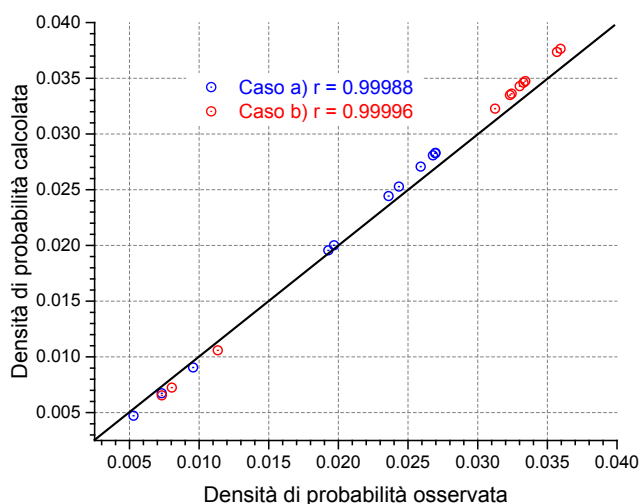
**Tab. 3 – Principali parametri statistici della distribuzione dei valori di D'L per entrambi i casi studio**  
**Main statistical parameters of D'L value distribution for the two case studies**

| Parametri statistici   | Casi  |       |
|--|-------|-------|
|  | a)    | b)    |
| Media  | 23,87 | 19,59 |
| Scarto tipo  | 14,77 | 10,93 |
| Mediana  | 22,90 | 15,00 |
| Skewness   | 0,41  | 0,33  |
| Kurtosis   | 3,03  | 3,46  |
| Scarto tipo stimato da distribuzione normale con ricampionamento bootstrap | 14,08 | 10,42 |
| Scarto tipo stimato da relazione (8)                                       | 12,62 | 9,65  |

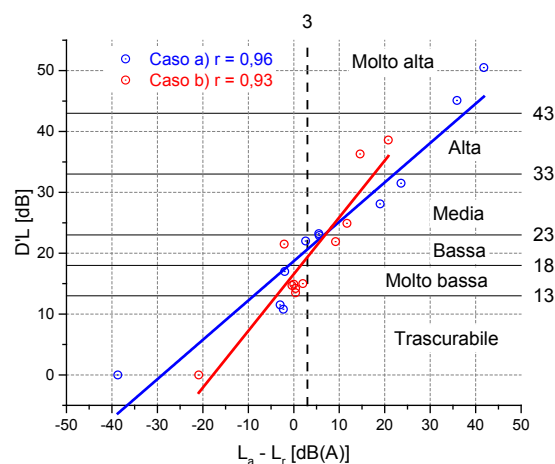
Si può notare l'ottimo accordo tra distribuzione empirica e distribuzione reale in entrambi i casi studio dalla Fig. 8 che riporta la densità di probabilità empirica confrontata con quella prevista dalla distribuzione normale e il corrispondente coefficiente di correlazione di Pearson r.

La Tab. 2 evidenzia che il valore della differenza  $\Delta L = L_a - L_r$  dipende dalla coppia dei parametri scelti per la determinazione degli spettri da comparare. Questo comporta il diverso posizionamento dei dati sperimentali di D'L per i singoli casi studio rispetto alla corrispondente distribuzione normale di interpolazione (Fig. 7), prevalentemente per i valori intermedi dell'intervallo di variabilità di D'L.

La Fig. 9 mostra per entrambi i casi studio i dati sperimentali di D'L in funzione della differenza  $DL = L_a - L_r$  e la loro interpolazione con regressione lineare. I coefficienti di correlazione di Pearson r sono buoni e la diversa pendenza delle rette di regressione dipende dalla differenza dei parametri statistici delle due distribuzioni.



**Fig. 8 – Densità di probabilità empirica dei valori D'L confrontata con quella calcolata dalla distribuzione normale per entrambi i casi studio**  
**Probability density of D'L values compared with that computed by normal distribution function for both the case studies**



**Fig. 9 – Dati sperimentali di D'L in funzione della differenza  $\Delta L = L_a - L_r$ , loro interpolazione con regressione lineare e confronto con la scala orientativa dell'entità dell'intrusività**  
**Experimental data of D'L as function of the difference  $\Delta L = L_a - L_r$ , their linear regression fitting and comparison with the tentative scale proposed for the estimate of intrusivity**

Nel grafico sono riportati anche i valori di  $\Delta L = 3$  dB (linea verticale tratteggiata) utilizzato per la verifica di conformità della accettabilità nel periodo notturno e quelli della scala di intrusività proposta a titolo orientativo nei prospetti A1 e 3 della UNI/TS 11844:2022 che individuano sei intervalli per l'entità della intrusività espressa in termini di D'L la cui ampiezza è stata determinata sulla base di considerazioni statistiche descritte nell'appendice A della specifica tecnica.

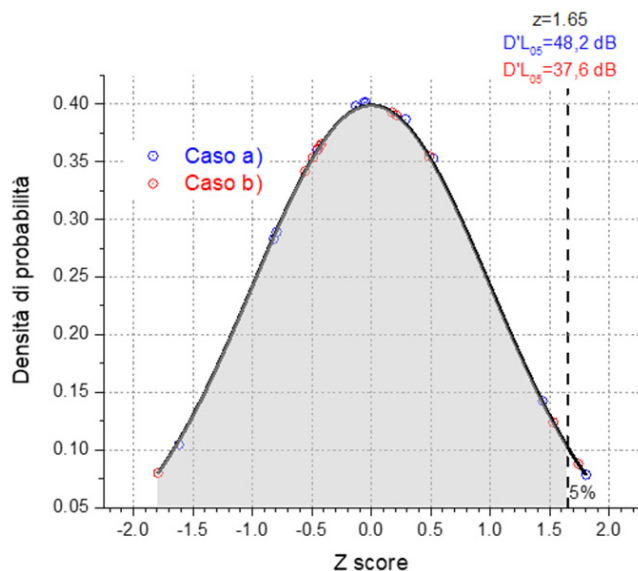
La distribuzione normale standard dello z score, ottenuto con la relazione:

$$(9) \quad z = \frac{(x-\mu)}{\sigma}$$

e illustrata nella Fig. 10, permette di stimare con intervallo unilaterale di confidenza di ampiezza pari a una prefissata probabilità  $(1-\alpha)$  il corrispondente valore di D'L che risulta superato. Ad esempio, nella Fig. 10 l'area grigia corrisponde a z score pari a 1,65 per intervallo unilaterale di confidenza  $\alpha = 95\%$  e sono riportati i corrispondenti valori di  $D'L_{05}$  ottenuti per entrambi i casi studio.

In presenza di suoni ambientale e residuo variabili nel tempo, una possibile indicazione generale è quella di determinare l'intrusività D'L in corrispondenza almeno a condizioni molto ricorrenti (quasi permanenti) nell'intervallo di misura sia per lo spettro della sorgente specifica, stimato da quello del suono ambientale, che per quello misurato del suono residuo. Ad esempio, si possono confrontare gli spettri dei livelli minimi della sorgente specifica con quelli del suono residuo, ovvero i livelli percentili di banda superati per il 95% dei rispettivi tempi di misura del suono ambientale e di quello residuo.

Questo tipo di approccio probabilistico aggiunge ulteriori informazioni, più o meno cautelative in base al valore di a prescelto, che possono contribuire ad una valutazione più dettagliata della intrusività, anche se sempre limitatamente alle sole caratteristiche fisiche dei suoni con esclusione degli aspetti percettivi, altrettanto, se non addirittura, più rilevanti.



**Fig. 10 – Distribuzione normale standard dello z score per entrambi i casi studio**

**Standard normal distribution of z score for both the case studies**

#### 4 | Conclusioni

A distanza di più di un anno dalla pubblicazione della UNI/TS 11844:2022, la presente nota propone alcune riflessioni e approfondimenti, derivanti anche dalla sperimentazione triennale in corso. In particolare è stata rielaborata la procedura per la stima dello spettro della sorgente specifica, introducendo l'omissione dal calcolo della "detectability"  $d'$  delle bande di frequenza  $f$  nelle quali il livello del suono residuo è maggiore di quello del suono ambientale e di quelle affette dal rumore autogenerato dalla strumentazione. Viene proposto, inoltre, un approccio probabilistico all'intrusività  $D'L$ , derivante dalla variabilità di questo parametro dipendente dalla scelta dei tempi di misura, dalla differenza algebrica  $\Delta L = L_a - L_r$ , dall'andamento nel tempo dei suoni ambientale e residuo e dalla coppia di parametri prescelti per la definizione dei loro spettri.

In presenza di suoni ambientale e residuo variabili nel tempo, una possibile indicazione generale cautelativa è quella di determinare l'intrusività  $D'L$  utilizzando percentili di banda bassi (ad es.  $L_{95}$ ) per lo spettro misurato del suono residuo e percentili alti (ad es.  $L_5$ ) per quello della sorgente specifica, stimato dal suono ambientale.

I due casi studio esaminati illustrano gli aspetti sopra elencati insieme alle proposte metodologiche descritte in questa nota.

#### Conclusions

More than a year after the publication of the UNI/TS 11844:2022, this note describes some remarks and insights, also derived from the ongoing three-year trial phase. In particular, the procedure for estimating the spectrum of the specific source has been modified, omitting from the calculation of the "detectability"  $d'$  those frequency bands  $f$  where the residual sound level is higher than that of the ambient sound, and those affected by the self-generated noise from the instrumentation. Moreover, a probabilistic approach to in-

trusiveness ( $D'L$ ), due to the variability of this parameter depending on the choice of the measurement times, the algebraic difference  $\Delta L = L_a - L_r$ , the time pattern of the ambient and residual sounds and from the pair of parameters chosen for determining their spectra.

When the environmental and residual sounds vary over time, a possible cautionary guideline would be to determine the intrusiveness ( $D'L$ ) using low frequency band percentiles (i.e.,  $L_{95}$ ) for the measured spectrum of the residual sound, and high frequency band percentiles (i.e.,  $L_5$ ) for the spectrum of the specific source spectrum, estimated by that of the ambient sound.

The two case studies illustrate the aspects listed above, together with the methodological proposals described in this note.

#### Bibliografia

- [1] Preis A., "Intrusive sounds". Applied Acoustics, 20(2), 101-127, 1987, doi: 10.1016/0003-682X(87)90057-0.
- [2] Fidell S., Pearsons K.S., Bennett R., "Prediction of Aural Detectability of Noise Signals". Human Factors, 16(4), 373-383, 1974.
- [3] Fidell S., Teffeteller S., "Scaling the annoyance of intrusive sounds". J. Sound Vib. 78(2), 291-298, 1981.
- [4] Dutilleul G., Gjestland T., Licitra G., "Challenges of the Use of Sound Emergence for Setting Legal Noise Limits". Int. J. Environ. Res. Public Health, 16(22), 4517, 2019, doi: 10.3390/ijerph16224517.
- [5] UNI/TS 11844:2022 "Procedura per la misurazione e l'analisi del rumore intrusivo".
- [6] Macmillan N.A., Creelman C.D., "Detection Theory. A User's Guide". 2<sup>nd</sup> edition, Lawrence Erlbaum Associates Inc., Mahwah, New Jersey, USA, 2005.
- [7] Luzzi S., Colucci G., Pulella P., "Valutazione del rumore intrusivo a un anno dalla pubblicazione della UNI/TS 11844:2022". Atti 49° Convegno Nazionale AIA, Ferrara, 7-9 giugno 2023.
- [8] Serpilli F., Lori V., Di Loreto S., Montelpare S., "Applicazione della nuova norma UNI/TS 11844: analisi della metodologia, potenzialità e criticità". Atti 49° Convegno Nazionale AIA, Ferrara, 7-9 giugno 2023.
- [9] Tombolato A., Bonomini F., Casarotti Todeschini S., "Applicazione della UNI TS 11844:2022 a immissioni di livello basso e tono puro". Atti 49° Convegno Nazionale AIA, Ferrara, 7-9 giugno 2023.
- [10] UNI 10855:1999 "Misura e valutazione del contributo acustico di singole sorgenti".
- [11] Cerniglia A., Brambilla G., "Indagine sperimentale sul rumore intrinseco della strumentazione per misurazioni fonometriche". Atti 49° Convegno Nazionale AIA, Ferrara, 7-9 giugno 2023.
- [12] UNI/TS 11326-2:2015 "Valutazione dell'incertezza nelle misurazioni e nei calcoli di acustica – Parte 2: Confronto con valori limite di specifica".
- [13] DPCM 14 novembre 1997 "Determinazione dei valori limite delle sorgenti sonore". G.U.R.I. serie generale n. 280, 1 dicembre 1997.
- [14] Delignette-Muller M.L., Dutang C. "fitdistrplus: An R Package for Fitting Distributions". Journal of Statistical Software, 64(4), 1-34. doi:10.18637/jss.v064.i04.
- [15] R Core Team, "R: A language and environment for statistical computing." R Foundation for Statistical Computing, Vienna, Austria.
- [16] Efron B., "Bootstrap methods: Another look at the jackknife". The Annals of Statistics, 7, 1-26, 1979. doi:10.1214/aos/1176344552.
- [17] Akaike, H., "A new look at the statistical model identification". IEEE Transactions on Automatic Control, 19 (6), 716-723, 1974. doi:10.1109/TAC.1974.1100705.



# Colour Enhanced Time/Pressure Envelope (CETPE), a novel on-screen rendering of digital sound

Cesare Brizio

World Biodiversity Association,  
Museo Civico di Storia Naturale di Verona,  
Lungadige Porta Vittoria, 9, 37129 Verona  
briziocesare@gmail.com

**Ricevuto:** 27/8/2023

**Accettato:** 2/11/2023

**DOI:** 10.3280/ria2-2023oa16390

**ISSN:** 2385-2615

The most widespread forms of digital sound rendering in audio-management software applications include Time/Pressure Envelopes (TPEs aka “oscillograms”), Frequency/Pressure Analyses (FPA’s), and Time/Frequency Spectrographic Images (TFSI, often referred to as “spectrograms”). Only the latter, thanks to the colour mapping of pressure values, are capable to deliver simultaneously visual information about the three numerical domains (time, horizontal axis; frequency, vertical axis; pressure, colour) digitally defining the acoustic phenomenon.

Here the Colour Enhanced Time/Pressure Envelope (CETPE) is proposed, a 24-bit RGB colour mapped form of the commonplace TPE available on-screen in any digital audio software: this novel Fast Fourier Transform (FFT)-based rendering, controlled by user-defined parameters, is capable to deliver partial but potentially relevant information about the presence and the intensity of interesting frequency bands in an audio file. A proof-of-concept demonstrator of the 2-color CETPE was developed in Python language, and a sample output screen, consistent with the expected look of the rendering, is included in this paper.

**Keywords:** FFT, oscillogram, spectrogram, screen, colour, digital

## Colour Enhanced Time/Pressure Envelope (CETPE), una nuova rappresentazione del suono digitale su schermo

Le più diffuse forme di visualizzazione del suono digitale comprendono gli Involuppi Tempo/Pressione (TPE, anche detti “oscillogrammi”), le Analisi Frequenza/Pressione (FPA), e le Immagini Spettrografiche Tempo/Frequenza (TFSI, spesso citate come “spettrogrammi”). Solo queste ultime, grazie alla mappatura a colori dei valori di pressione, sono in grado di fornire simultaneamente informazioni visuali sui tre domini numerici (tempo, asse orizzontale; frequenza, asse verticale; pressione: colore) che definiscono digitalmente il fenomeno acustico. Qui viene proposto il Colour Enhanced Time/Pressure Envelope (CETPE), una forma mappata su colore RGB a 24-bit RGB del comune TPE disponibile a schermo in qualsiasi software per l’audio digitale: questa nuova rappresentazione basata sulle Fast Fourier Transform (FFT), controllata da parametri definiti dall’utente, è capace di fornire informazioni parziali ma potenzialmente rilevanti sulla presenza e sull’intensità di interessanti bande di frequenza in un file audio. Un dimostratore proof-of-concept è stato sviluppato in linguaggio Python, e un esempio di schermo di output, coerente con l’aspetto atteso della rappresentazione, è incluso in questo articolo.

**Parole chiave:** FFT, oscillogramma, spettrogramma, schermo, colore, digitale

## 1 | Introduction

The process of analog/digital conversion inherent in digital audio recording has a discrete nature: the continuum of an analogic signal is fractioned in as many discrete units, as the sampling rate allows following the Whittaker–Nyquist–Shannon cardinal theorem of interpolation (Nyquist [1], Shannon [2]). In the recording phase, each sample is separately assigned its specific value, directly proportional to the sound pressure collected by the microphone/recorder equipment during the sampling tempuscule and depending on the available bit depth (Boulanger & Lazzarini [3]).

Besides the instantaneous sound pressure at any time, frequency is the most relevant physical quantity for a qualitative description of acoustic phenomena. While sound pressure can be easily and immediately translated in a digital quantity by simple analog-to-digital converter (ADC) devices, computation is needed to discover which specific frequencies concur to the formation of sound: particularly in the field of bioacoustics, absolute frequency values and patterns of frequency emission are often the main, or the only, subject of study.

Dealing with frequencies, the most extensively adopted algorithm in user-application sound processing is without doubt the direct Fast Fourier Transform (FFT) – an algorithm

that computes the discrete Fourier transform of a sequence of sound data, or its Inverse Fast Fourier Transform (IFFT). Fourier analysis converts a signal from its original domain (often time or space) to a representation in the frequency domain and vice versa (Heideman et al. [4], Smith [5]).

The frequency resolution of FFT-based analyses is directly proportional to FFT size (Welch et al. [6], National Instruments Corporation [7]). Several methods to generate Frequency/Pressure analyses by scanning a continuous interval of an audio file have been available for decades, e.g., the Blackman-Harris method (Blackman & Tukey [8], Harris [9], Nuttall [10]).

Whichever its purpose (research in fields including bioacoustics, recreational purposes such as personal music recording and production, or other), audio processing software must necessarily provide visual user interfaces, delivering all the information needed for interactions that include recording, playback, post-processing activities (selective deletion of soundtracks, tracks merging, digital filtering techniques...) and sound analyses.

To perform the desired operations, users need data on all the three domains of the acoustic phenomenon, namely time, pressure and frequency. The structure of any visual user interface is a compromise among physical constraints (such as the 2D nature of the flat video display), the physiology of human perception and the desire to provide the highest level of information. Among the on-screen renderings, one of such compromises takes the shape of Time/Pressure Envelopes<sup>1</sup> (TPÈs), also cited as oscillograms or sonograms.

TPÈs emerge as the most widespread, intuitive, and practical representation of sound. They are usually displayed on screen in the form of an outlined or single-colour filled area, with time as the horizontal axis, whose vertical span (in other word, the length of the vertical segment representing each sample) is directly proportional to the sample's overall sound pressure, according to the graduation displayed in the relative vertical scale.

Despite its practicality and intuitiveness, ordinary TPÈs provide just two information items: time (horizontal axis) and volume (vertical axis), contrary to the Time/Frequency Spectrographic Images (TFSI's) that – by mapping of relative pressure values to a colour scale – provide three-dimensional data (time, horizontal axis; frequency, vertical axis; pressure, colour).

Inspired by the TFSI, the novel rendering proposed here, Colour Enhanced Time/Pressure Envelope (CETPE), is a TPE that includes a third, frequency-related information item: colour. In that respect, it can be described as a TFSI under disguise.

In fact, it's another way of presenting the same data that appear in a TFSI, with the radical difference that:

- the rendering shape and its horizontal scale will coincide with an ordinary TPE, at the price of a reduced resolution in time (while the standard TPE resolution depends only on the sampling frequency, the CETPE time resolution will be determined by FFT parameters such as FFT size);
- colour information may be restricted to a user-defined range of frequencies;
- colour will appear only when the sound pressure in the desired frequency range exceeds a user-defined threshold.

Optionally, colour information may be restricted to a user-defined range of overall sound pressures, thus excluding the loudest or feeblest portions of the audio file.

The enhancement provided by colour is a very effective diagnostic indicator: it may allow to identify the portions of an audio file, that contain or lack specific frequencies, interesting for a special research purpose.

## 2 | Materials and methods

### 2.1 | TFSI, TPE and screen – dealing with different resolutions

It is known that – in FFT – time and frequency resolution are inversely related: if FFT resolution is increased (high FFT size, high number of discrete “frequency bins”), then time resolution will decrease. FFT size is expressed in “points” or unitary samples, while the number of bins, by default, is equal to half the FFT size + 1, e.g., 8192 points correspond to 4097 bins. For any meaningful scientific use of a time/frequency analysis, FFT sizes of 8192 or above are commonplace. The duration of the analysis window, or time resolution, is inversely proportionate to the frequency resolution. The longer the window, the fewer “images” we get of the signal evolution in time. As an example, according to the general equation:

$$t = nfft / fs$$

where t is the time resolution, nfft is the FFT size and fs is the sampling rate, with a sampling rate of 48 kHz and a FFT size of 1024 points, the spectrum is equally split into images representing a 21 ms duration. If we choose a 4096 points FFT, the spectrum is equally split into images representing a longer 85 ms duration that provides a less precise temporal resolution.

On such premises, it's very obvious that the intrinsic time resolution of an FFT-based rendering, including the TFSI on which the CETPE is based, will be up to hundreds of times lower than the native resolution of pressure data as acquired at the native sampling rate of the recording equipment. Operationally, with audio data translated into data arrays, this will result in radically different dimensions of, on one side, the one- (for monophonic recordings) or bi-dimensional (for stereophonic recordings) amplitude array, that will contain as many columns as recorded samples and, on the other side, the one- or bi-dimensional (idem) array containing the results of the FFT, with the latter containing as many rows as the frequency bins and as many columns as dictated by the FFT size.

<sup>1</sup> The term “envelope”, used in the signal processing field with reference to the output of a Hilbert transform, is here used in the acceptance widespread in the bioacoustic community to refer to the time-history of a pressure signal.

At the array level, the search of an interesting frequency above a given threshold pressure, that may involve one (monophonic) or two (stereophonic) array dimensions, is performed by sweeping the full breadth of a row in the spectrogram array, corresponding to the frequency bin that includes the interesting frequency, and locating the spectrogram array cells whose pressure value exceeds the threshold. Each cell in the spectrogram array subsumes the data from hundreds of adjacent samples in the one-dimensional amplitude array, that correspond to as many timestamps. The list of the spectrogram array cells can be stored in a separate results array for successive use.

To generate a coloured on-screen CETPE, two alternative strategies can be applied:

- colour highlights can be overlaid on a previously generated ordinary TPE as shown by the proof-of-concept Python application (see the Supporting Material section) – a result that can be obtained by calls to existing programming language libraries;
- a full-resolution TPE may be rendered de novo, checking sample by sample whether the pressure data fall into a TFSI column appearing in the results array: all the adjacent pressure data that belong to such a column will be rendered in colour – a result that probably requires programming from scratch.

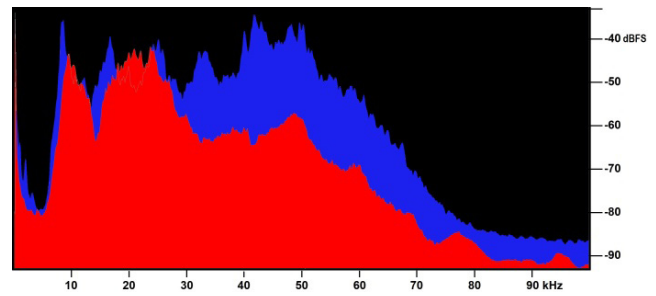
The CETPE will be rendered in a screen window of a given pixel width. Talking about screen resolution, unless the number of spectrogram array columns in the un-zoomed (full breadth) CETPE exceeds the screen window pixel width, any spectrogram column (and thus any colour enhancement) shall not exceed one pixel of width.

The lower resolution of the multi-sample CETPE enhancements as opposed to the unitary samples will become apparent only as soon as the zooming level expands a section of the CETPE to the point that the adjacent samples coincident with a spectrogram row engage a width of more than one pixel: even in that condition, the CETPE will continue to be more useful and informative than its predecessor TFSI, allowing a quicker focus on the interesting song portions than that provided by its corresponding spectral rendering, as illustrated in the following Application Scenario.

## 2.2 | Application Scenario and Proof-of-Concept Python Application

A realistic application scenario may be exemplified as follows: two species, “red” and “blue”, that respectively sing with the frequency profile shown in Figure 1, sing at the same time, with subequal intensity, and with similar echemes, undistinguishable in a standard TPE. Figure 1 is based on two recordings taken on an ASUS 1225B Netbook PC, at the sampling frequency of 250 kHz, following the protocols by Brizio, Buzzetti & Pavan [11] in their 2020 investigation of the inaudible components of Orthopteran songs. As usual in bioacoustic studies, the horizontal axis is linear (non-logarithmic) to provide a higher detail on the different frequency peaks, as required for an accurate

description of the song. Here, such an illustration will allow to grasp subtle differences between the two songs, on which the example illustrated in the following lines will be based.

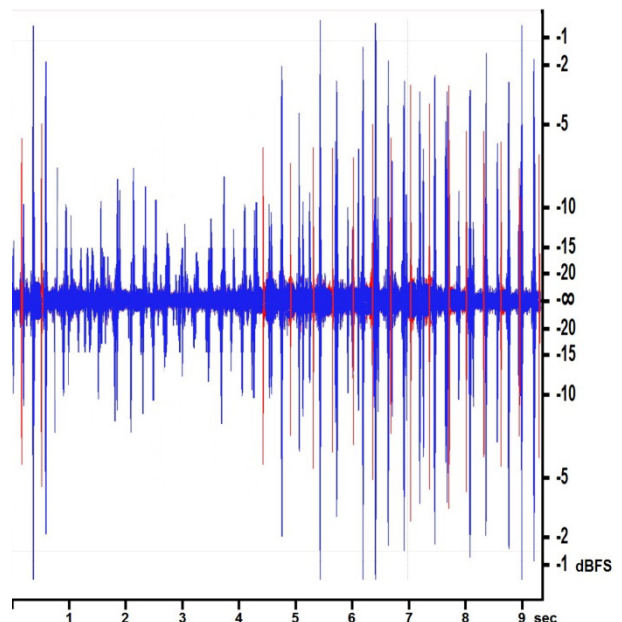


**Fig. 1 – The compared FPA's of two hypothetical species, “red” and “blue” (see text). 0 kHz-100 kHz frequency window from a 250 kHz recording (see text). Horizontal axis is linear (non-logarithmic) to allow an easier understanding of the example provided in the text**

**Comparazione della FPA (analisi frequenza/pressione) di due specie ipotetiche, “rossa” and “blu” (vedi testo). Finestra di frequenza 0 kHz – 100 kHz da una registrazione a 250 kHz (vedi testo). L'asse orizzontale è lineare (non logaritmico) per consentire una più agevole comprensione dell'esempio fornito nel testo**

A researcher needs to measure the following parameters for the red species:

- echeme/syllable duration;
- number of syllables per echeme;
- interval between syllables;
- interval between echemes.



**Fig. 2 – A simulated 2-colour CETPE of a monophonic recording – the red lines correspond to samples whose overall volume falls in the desired Pressure Range (PR) (the lower volume portion is excluded from the analysis), and that contain components in the peculiar Frequency Range (FR) of the red species**  
**Simulazione del CETPE a 2 colori di una registrazione monofonica – le linee rosse corrispondono a campioni il cui volume cade nell'ambito di pressione (PR) desiderato (la porzione a volume più basso è esclusa dall'analisi), e che contengono componenti nel peculiare ambito di frequenza (FR) della specie rossa**

Such values are read manually, on-screen by suitably positioning a visual cursor or the mouse pointer. Unfortunately, for algorithmic reasons the on-screen TFSI, with its blurred peaks, is structurally inadequate for high-precision, time-related measures. But it may be impossible to recognize the red species echemes on a monochrome TPE: the researcher needs simultaneously the optimal time resolution of a TPE, and some discrimination aid that marks only the echemes by the red species, e.g., on the basis that it lacks components above  $-60$  dBFS in the frequency range 35 kHz-60 kHz, or that it includes components above  $-50$  dBFS in the range 20 kHz-25 kHz. Here, a 2-colour CETPE (simulated in Figure 2) can provide a suitable solution.

A simpler scenario would occur during the review of long unsupervised recordings: if the frequency parameters of the target species are known, detecting its presence on a CETPE would be much easier than on a standard TPE and, most importantly, would not require listening to a playback nor chasing visual signatures on a TFSI.

### 2.3 | User Parameters

To optimize informativeness, CETPE generation requires up to four user-input parameters that define a frequency window and a band pressure threshold. Parameters may be set by keyboard input (as in the proof-of-concept application described here) or by visual interactive controls such as sliders.

It may be convenient to restrict the CETPE generation to a range of overall volume: although not strictly necessary, one or two parameters may allow to discriminate samples, based on their overall Pressure Range (PR). Thanks to those optional parameters, it will be possible to restrict the colour rendering only to the loudest or to the feeblest samples, or to a desired mid-range of acoustic pressures.

If the interesting frequency should be searched regardless to the overall volume of the audio file at any given point, these two parameters:

- Overall Pressure Range Bottom (PRB) (dBFS);
- Overall Pressure Range Top (PRT) (dBFS).

Are unnecessary, and can be disregarded or respectively set at a very low negative value and at 0, respectively.

Back to the strictly necessary user input, two parameters will allow to define the frequency range FR relevant to the user purposes:

- Frequency Range Bottom (FRB) (Hz);
- Frequency Range Top (FRT) (Hz).

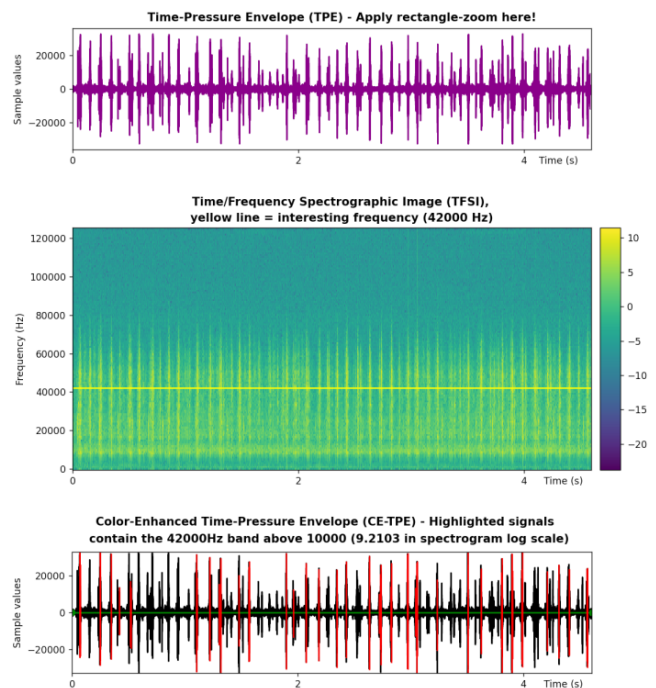
When the frequency range collapses to a single frequency, FRB and FRT coincide, and the possibility of mapping different frequencies to different colours ceases to exist. A single contrasting colour will mark the relevant CETPE portions.

The last indispensable parameter will allow to discriminate samples in the desired frequency range, based on the specific sound pressure of that range:

- Frequency Range Pressure Threshold (FRPT) (dBFS or sample values).

Two different kinds of CEPTE are proposed here, respectively a computationally simpler version named 2-colour CEPTE and a more information-rich version named Multicolour CEPTE.

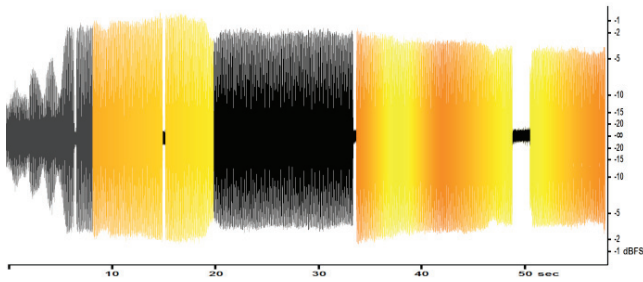
In the 2-colour CEPTE, whenever a sample in the PR includes components in the FR above the FRPT, it is rendered on-screen in contrasting colour (in Fig. 2 and Fig. 3, red), otherwise is rendered in a standard colour (in Fig. 2, blue; in Fig. 3, black). This approach, as implemented in the proof-of-concept application, requires just two user-input parameters, a single interesting frequency and a FRPT. Fig. 3 is a cut-out of the output window of the proof-of-concept application, generated with the following input parameters: interesting frequency 42 kHz, FRPT sample value 10000, corresponding to a value of 9.2103 in the spectrogram log scale used for the TFSI. Image clarity was improved by excluding the outer frame and buttons not strictly required for the understanding of the example.



**Fig. 3 – The output of the proof-of-concept Python application, after the analysis of the same recording appearing in Fig. 2. The outer frame and some control elements available in the output window were cut out to improve image readability**  
*L'output dell'applicazione Python proof-of-concept, dopo l'analisi della stessa registrazione che appare in Fig. 2. La cornice esterna e alcuni elementi di controllo della finestra di output sono stati esclusi per migliorare la leggibilità dell'immagine*

To generate a Multicolour CETPE (for a simulation, see Fig. 4), the user-defined Frequency Window will be split in a fixed number of uniform, discrete Frequency Window Bands (FWB's) that will be mapped to as many RGB bits. FWB number will determine the one-bit-per-band colour mapping method adopted. Alternatives, detailed in the Appendix, include:

- 64 colours (six-FWB's);
- 4096 colours (twelve-FWB's);
- 16M colours "full range" (24-FWB's).



**Fig. 4 – A simulated full range (24-FWB's) Multicolour CETPE – the coloured portions correspond to samples whose overall volume falls in the PR above -5 dBFS (the lower volume portions are excluded from analysis and consequently are not coloured), and that contain components in the desired FR. Colour provides an approximate qualitative assessment of the frequency profile of each sample considered. Only frequency bands above a user-defined FRPT concur to colour definition.**

*Simulazione di un CETPE multicolore (24 bande di frequenza) – le porzioni colorate corrispondono a campioni il cui volume generale cade nel PR (ambito di pressione) superiore a -5 dBFS (le porzioni a volume inferiore sono escluse dall'analisi e di conseguenza non sono colorate), e che contengono componenti nel FR (ambito di frequenza) desiderato. Il colore fornisce un'approssimativa valutazione qualitativa del profilo di frequenza di ogni campione considerato. Solo le bande di frequenza sopra a una FRPT (soglia di pressione per l'ambito di frequenza) definita dall'utente concorrono alla definizione del colore*

## 2.4 | Generation

Algorithmically, CETPE is an alternative way to display a time/frequency spectrogram: instead of the usual spectrographic view, delivered in a rectangular window on the display, with frequency as the vertical axis, a coloured time/pressure envelope (with pressure as the vertical axis) will be generated.

As usual for time/pressure envelopes, the sample-by-sample vertical envelope size will be proportional to overall sample pressure. The only variation occurs in the visual rendering of the vertical segment corresponding to the sound pressure (dBFS) of the current sample, or packet of samples depending on the current on-screen zoom level.

If an optional overall sample pressure range PR is defined by the PRB and PRT parameters, both mute samples (whose sound pressure is zero) and samples whose overall pressure is outside the PR shall be rendered in standard colour (such as black on white background or vice versa), and just the sample whose pressure value is inside the PR will be a candidate for colour assignment.

The steps of the colour rendering cycle are computationally trivial: for that reason, a flow chart illustration is deemed irrelevant. Descriptively:

- for each candidate sample, the TFSI arrays are scanned, to ascertain whether sound pressure in the desired frequency bins is equal to or higher than the pressure threshold FRPT. If not, the candidate sample shall be displayed in standard colour, otherwise the colour computation process is activated, in two possible fashions:

- for 2-colour CETPE, the above-FRPT sample is rendered in contrasting colour, and cycle passes to the next sample;
- for Multicolour CETPE, the discrete FWB's and the corresponding TFSI array rows come into play, depending on the FFT frequency bin size and on the colour mapping: 64, 4096 or 16M colours:
  - for each FWB, relevant rows (frequency bins) in the TFSI array are checked column by column for sound pressure;
  - the RGB colour byte triplet is composed from an empty three-byte binary mask (&H000000), by raising (setting to 1) each colour bit corresponding to any band whose pressure is above the user-defined FRPT: by cascading bitwise OR of the initial binary mask and each raised bit, the appropriate RGB colour is calculated;
  - the sample is rendered on screen in its appropriate size and colour<sup>2</sup>;
  - cycle passes to the next column.

Details about the colour mapping strategy are illustrated in the Appendix.

## 3 | Discussion

While any exhaustive investigation of a digital audio file will still require a standard spectrographic image or frequency analysis, the partial information about frequencies provided by the CETPE may speed-up many routine activities, including the tedious process of identifying the relevant portions of long-duration, unsupervised recordings as those commonplaces in bioacoustical monitoring.

In that respect, the novel CETPE decreases the effort inherent in the on-screen visual analysis of TFSI's: while the latter require a time-consuming process of visual pattern recognition and expert interpretation to identify the relevant portions of an audio file, CETPE allows to discriminate the same portions relying on colour only: without the need to recognize visually a special spectral pattern, even an unskilled operator can identify colour.

Once criteria for relevancy are defined and user parameters are set consequently, thus suitably defining the FR and FRPT and, optionally, the overall PR, a CETPE will be generated, where only the interesting portions are coloured.

The definition of a frequency window may serve different qualitative purposes, e.g., locating the portions where:

- the target-signal occurs;
- the target-signal is not apparent;
- noise occurs.

<sup>2</sup> To generate, or to overwrite, an envelope line of adequate vertical length, one needs to check the maximum and the minimum value of the unitary samples, corresponding to (subsumed by) the current FFT array column. Knowing the sampling rate and the FFT size, also this passage is computationally trivial.

At the same time, the FRPT parameter, by excluding under-threshold occurrences of the desired frequency range, allows a qualitative discrimination, e.g., allows to locate the portions where:

- the target-signal is stronger;
- noise is higher (or lower).

Furthermore, the colour is not assigned randomly, but according to a rigid colour mapping in which reddish, greenish, and bluish hues are respectively related with higher, mid and lower frequency ranges. In that respect, the colour itself will be delivering useful information about frequency, the same way it delivers information about pressure in any standard TFSI.

Even though the idea was conceived in the context of bioacoustic investigations, any scientific field can benefit from CETPÈs, in so far as the on-screen (or on-print) analysis of digital audio is concerned. Examples abound in diverse fields including radio astronomy, other applications of signal processing, monitoring of industrial processes (performed in real time or on previously obtained recordings), etcetera. In as much as specific features of spoken language and music can be described in terms of special frequency patterns, CETPE may also fruitfully be applied to studies in linguistics and in the musical field.

At a higher level of abstraction, the concept of CETPE does not necessarily involve just the frequency domain: as an example, it would be relatively easy to associate colour to user-defined sound pressure ranges, regardless of frequency, or to time-based sound pressure patterns, with the same purpose of the frequency-based CETPE, that is to say, to highlight portions of a TPE that contain features uneasy or impossible to grasp in its single-color representation.

## 4 | Conclusions

At the price of a maximum time resolution equal to the TFSI on which it's based, necessarily lower than the maximum resolution of a standard TPE, the novel CETPE rendering contextually provides an on-screen visualization of three information items: time, sound pressure, and frequency – limited to the presence and above-threshold intensity of one or more user-defined frequency bands.

Besides its potential in speeding-up tedious activities, CETPE may allow to engage less skilled human resources in frequency-targeted spectral monitoring activities, such as the recognition of the portions that contain the song of a given species in a lengthy audio file generated by unmanned bioacoustical monitoring equipment.

As a matter of fact, contrary to the expert recognition and interpretation process of TFSI's, once an expert has set the user parameters according to the specific relevancy criteria, even an unskilled operator may identify the relevant, colour filled sections in the CETPE.

Likewise, the on-screen selection and deletion of noisy sections from a recording may be simplified without requiring a more time-consuming intervention on the TFSI screens.

Although the CETPE provides the same time resolution as the TFSI, in the visual presentation the frequency-related colour highlights can be overlaid on a previously generated ordinary TPE (as in the proof-of-concept Python application cited in this article), resulting in easier on-screen time measures of interesting frequency occurrences, than available via the TFSI alone.

As an alternative to overlaying, a full-resolution TPE may be rendered de novo, by checking sample by sample whether the TFSI arrays' pressure data satisfy the interesting frequency/pressure requirements, and by rendering in a frequency-mapped colour all the related CETPE portions.

CETPE may serve different purposes in any field where the on-screen (or on-print) analysis of digital audio is concerned: the technique can be used to highlight the TPE portions where phenomena involving any numerical domain occur.

Frequency, sound pressure, and time – alone, or in combination – can provide opportunities to generate CETPÈs, in so far as the interesting digital quantities or the interesting patterns can be algorithmically recognised by a software implementation.

## Conclusioni

Al costo di una risoluzione temporale massima uguale a quella dello spettrogramma tempo-frequenza (TFSI) su cui si basa, necessariamente inferiore della risoluzione massima di un involucro tempo/pressione (TPE) standard, la nuova rappresentazione CETPE fornisce contestualmente una visualizzazione a schermo di tre informazioni: tempo, pressione acustica e frequenza – limitatamente alla presenza ed intensità sopra soglia di una o più bande di frequenza definite dall'utente.

Al di là del suo potenziale nel velocizzare attività ripetitive, la CETPE può consentire di impiegare risorse umane a minor competenza in attività di monitoraggio spettrale mirate alla frequenza, come il riconoscimento di porzioni che contengono il canto di una data specie in un lungo file audio generato da un apparato non presidiato di monitoraggio bioacustico.

Di fatto, contrariamente al processo esperto di riconoscimento e interpretazione dei TFSI, una volta che un esperto abbia definito i parametri utente secondo gli specifici criteri di rilevanza, anche un operatore incompetente può identificare le sezioni rilevanti, colorate, del CETPE.

Allo stesso modo, la selezione e cancellazione a schermo delle sezioni rumorose di una registrazione possono essere semplificate senza richiedere interventi più macchinosi sugli schermi delle TFSI.

Benché il CETPE fornisca la stessa risoluzione nel tempo della TFSI, nella presentazione visuale i colori correlati alle frequenze possono essere sovrainpressi su una normale TPE generata in precedenza (come avviene nell'applicazione Python proof-of-concept citata in questo articolo), fornendo a schermo misure del tempo delle occorrenze di frequenze interessanti, più agevoli di quelle ottenibili dalle sole TFSI.

Come alternativa alla sovrainpressione, una TPE a piena risoluzione può essere generata ex novo, controllando campione per campione se i dati di pressione contenuti nelle array della TFSI soddisfano i requisiti di frequenza/pressione interessanti, e restituendo in colore mappato sulla frequenza tutte le relative porzioni di CETPE.

Il CETPE può servire differenti scopi in qualsiasi ambito in cui sia richiesta l'analisi a schermo (o su stampa) dell'audio digitale: la tecnica può essere impiegata per evidenziare le porzioni di TPE in cui avvengono fenomeni coinvolgenti qualsiasi dominio numerico.

La frequenza, la pressione sonora e il tempo – da soli o in combinazione – possono fornire opportunità per generare CETPE, nella misura in cui le quantità digitali interessanti o i pattern interessanti possono essere riconosciuti algoritmicamente da un'implementazione software.

## 5 | Acknowledgements

The author thanks the anonymous reviewers for their insightful comments and suggestions.

## 6 | Supporting Material

The source code of the proof-of-concept Python software [12] [13], released under permissive Copyright Commons CC BY-SA 4.0 license [14] is freely available for download, along with the example audio file [15] based on the mix-down of the two songs analysed in Fig. 1, the same audio file used by the proof-of-concept application to generate Fig. 3.

## 7 | Appendix

### 7.1 | Colour Mapping

While 2-colour CETPE does not require any FWB-based colour mapping strategy, Multicolour CETPE can take advantage of a frequency-related colour rendition (“informative palette”).

The concept of colour mapping as proposed here is strongly dependent on the 24-bit RGB colour model. By splitting the user-defined frequency range in 6, 12 or 24 uniform discrete FWB, it will be possible to map each FWB to a colour bit, thus generating a palette of 64, 4096 and 16M colours respectively.

#### 7.1.1 | Matching the FFT frequency bin size, and the theoretically available number of bands in the RGB model

As clarified in the introduction, once a spectrogram array is generated, frequency-related information is not continuous, but is proposed in discrete units (bins) corresponding to array rows. So, rather than a natural frequency bracket (e.g., from 10000 Hz to 10500 Hz), it will be one or more frequency bin (e.g., in case of 100 Hz bins, array rows from 100 to 105) that will be mapped to a colour bit. The identification of the frequency bins included in a frequency band is computationally very trivial. The same frequency bin (e.g., the one including the 10000 Hz frequency) can be considered part of two adjacent frequency bands (e.g., the 9000 Hz-10000 Hz band and the 10000 Hz-11000 Hz band) with no relevant effect on the generation of a Multicolour CETPE. Hereinafter, for the sake of clarity, natural, continuous frequency bands will be

cited even though the actual colour mapping computation will involve discrete frequency bins.

#### 7.1.2 | One-bit-per-band, 24-bands full range colour mapping (white noise above threshold = &HFFFFFF)

In the full 24-bit range mapping, all possible colours are used, including lowest-brightness (darker) colours engaging the low-intensity bits 1-8 in each colour byte (R, G or B). This may allow for a more precise mapping, but – due to potentially reduced contrast – may be less effective visually. An “informative palette” is adopted, where the red channel maps the higher frequency range, the green channel maps the middle frequency range, and the blue channel maps the lower frequency range.

Table 1 includes an example: the definition of FWB boundaries is arithmetically trivial, based on user parameters.

**Tab. 1 – Example of one-bit-per-band, 24-band full-range colour mapping for a frequency window spanning 12 kHz from 2 kHz to 14 kHz**

**Esempio di mappatura del colore a un bit per banda, su 24 bande (ambito completo) per una finestra di frequenza di 12 kHz da 2 kHz a 14 kHz**

| FWB     | From/To Hz     | Corresponding RGB bit | Colour byte | Frequency window range |
|---------|----------------|-----------------------|-------------|------------------------|
| Band 24 | 14000<br>13501 | Red bit 128 (MSB)     |             |                        |
| Band 23 | 13500<br>13001 | Red bit 64            |             |                        |
| Band 22 | 13000<br>12501 | Red bit 32            |             |                        |
| Band 21 | 12500<br>12001 | Red bit 16            |             |                        |
| Band 20 | 12000<br>11501 | Red bit 8             | Red         | Higher Range           |
| Band 19 | 11500<br>11001 | Red bit 4             |             |                        |
| Band 18 | 11000<br>10501 | Red bit 2             |             |                        |
| Band 17 | 10500<br>10001 | Red bit 1 (LSB)       |             |                        |
| Band 16 | 10000<br>9501  | Green bit 128 (MSB)   |             |                        |
| Band 15 | 9500<br>9001   | Green bit 64          |             |                        |
| Band 14 | 9000<br>8501   | Green bit 32          |             |                        |
| Band 13 | 8500<br>8001   | Green bit 16          |             |                        |
| Band 12 | 8000<br>7501   | Green bit 8           | Green       | Mid-Range              |
| Band 11 | 7500<br>7001   | Green bit 4           |             |                        |
| Band 10 | 7000<br>6501   | Green bit 2           |             |                        |
| Band 9  | 6500<br>6001   | Green bit 1 (LSB)     |             |                        |

**Tab. 1 – follows**

| FWB    | From/To Hz   | Corresponding RGB bit | Colour byte | Frequency window range |
|--------|--------------|-----------------------|-------------|------------------------|
| Band 8 | 6000<br>5501 | Blue bit 128 (MSB)    | Blue        | Lower Range            |
| Band 7 | 5500<br>5001 |                       |             |                        |
| Band 6 | 5000<br>4501 | Blue bit 32           |             |                        |
| Band 5 | 4500<br>4001 | Blue bit 16           |             |                        |
| Band 4 | 4000<br>3501 | Blue bit 8            |             |                        |
| Band 3 | 3500<br>3001 | Blue bit 4            |             |                        |
| Band 2 | 3000<br>2501 | Blue bit 2            |             |                        |
| Band 1 | 2500<br>2001 | Blue bit 1 (LSB)      |             |                        |

7.1.3 | *One-bit-per-band, 12-bands partial range colour mapping (white noise above threshold = &HF0FOFO)*

In the 12-bit partial range mapping, only the most significant four bits in each RGB channel are engaged in the mapping. While the concept of “informative palette” is still supported, this implies the exclusion of the majority of dark colours, and increases brightness and contrast when the most significant bits in each colour byte are activated. This may improve display clarity at the expense of frequency resolution. Table 2 includes an example of 12-bit mapping for a frequency window spanning 12000 Hz from 2000 Hz to 14000 Hz.

**Tab. 2 – Example of one-bit-per-band, 12-bands colour mapping for a frequency window spanning 12 kHz from 2 kHz to 14 kHz**  
*Esempio di mappatura del colore a un bit per banda, su 12 bande per una finestra di frequenza di 12 kHz da 2 kHz a 14 kHz*

| FWB     | From/To Hz     | Corresponding RGB bit | Colour byte | Frequency window range |            |
|---------|----------------|-----------------------|-------------|------------------------|------------|
| Band 12 | 14000<br>13001 | Red bit 128 (MSB)     | Red         | Higher Range           |            |
| Band 11 | 13000<br>12001 |                       |             |                        | Red bit 64 |
| Band 10 | 12000<br>11001 | Red bit 32            |             |                        |            |
| Band 9  | 11000<br>10001 | Red bit 16            |             |                        |            |
| UNUSED  |                | Red bit 8             |             |                        | UNUSED     |
|         |                | Red bit 4             |             |                        |            |
|         |                | Red bit 2             |             |                        |            |
|         |                | Red bit 1 (LSB)       |             |                        |            |

**Tab. 2 – follows**

| FWB    | From/To Hz    | Corresponding RGB bit | Colour byte | Frequency window range |              |             |
|--------|---------------|-----------------------|-------------|------------------------|--------------|-------------|
| Band 8 | 10000<br>9001 | Green bit 128 (MSB)   | Green       | Mid-Range              |              |             |
| Band 7 | 9000<br>8001  |                       |             |                        | Green bit 64 |             |
| Band 6 | 8000<br>7001  | Green bit 32          |             |                        |              |             |
| Band 5 | 7000<br>6001  | Green bit 16          |             |                        |              |             |
| UNUSED |               | Green bit 8           |             |                        | UNUSED       |             |
|        |               | Green bit 4           |             |                        |              |             |
|        |               | Green bit 2           |             |                        |              |             |
|        |               | Green bit 1 (LSB)     |             |                        |              |             |
| Band 4 | 6000<br>5001  | Blue bit 128 (MSB)    |             |                        | Blue         | Lower Range |
| Band 3 | 5000<br>4001  |                       |             |                        |              |             |
| Band 2 | 4000<br>3001  | Blue bit 32           |             |                        |              |             |
| Band 1 | 3000<br>2001  | Blue bit 16           |             |                        |              |             |
| UNUSED |               | Blue bit 8            | UNUSED      |                        |              |             |
|        |               | Blue bit 4            |             |                        |              |             |
|        |               | Blue bit 2            |             |                        |              |             |
|        |               | Blue bit 1 (LSB)      |             |                        |              |             |

7.1.4 | *One-bit-per-band, 6-bands (2-MSB) mapping*

This six-FWB mapping will engage only the two most significant (and higher-contrast) bits in each colour byte, as illustrated in Table 3. The resulting 64-colours, 2-MSB per channel RGB palette, appearing in Fig. 5, has the desirable

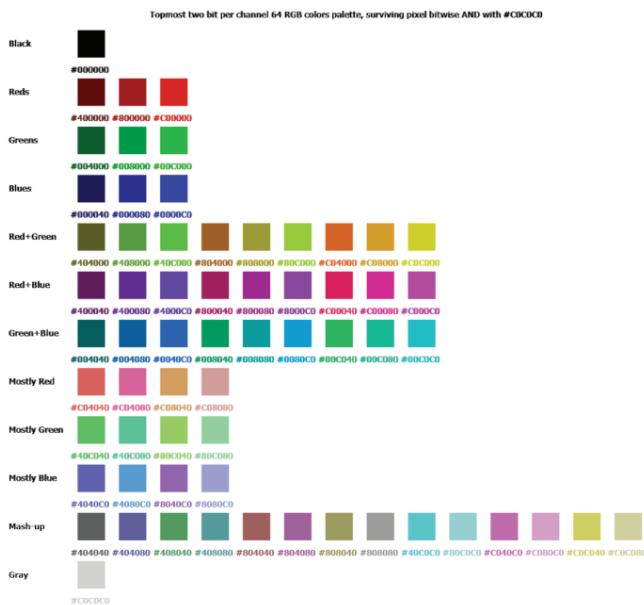
**Tab. 3 – Example of one-bit-per-band, 6-band colour mapping for a frequency window 12 kHz from 2 kHz to 14 kHz**  
*Esempio di mappatura del colore a un bit per banda, su 6 bande per una finestra di frequenza di 12 kHz da 2 kHz a 14 kHz*

| FWB    | From/To Hz     | Corresponding RGB bit | Colour byte | Frequency window range |            |
|--------|----------------|-----------------------|-------------|------------------------|------------|
| Band 6 | 14000<br>12001 | Red bit 128 (MSB)     | Red         | Higher Range           |            |
| Band 5 | 12000<br>10001 |                       |             |                        | Red bit 64 |
| UNUSED |                | Red bit 32            |             |                        | UNUSED     |
|        |                | Red bit 16            |             |                        |            |
|        |                | Red bit 8             |             |                        |            |
|        |                | Red bit 4             |             |                        |            |
|        |                | Red bit 2             |             |                        |            |
|        |                | Red bit 1 (LSB)       |             |                        |            |



**Tab. 3 – follows**

| FWB    | From/To Hz | Corresponding RGB bit | Colour byte | Frequency window range |
|--------|------------|-----------------------|-------------|------------------------|
| Band 4 | 10000      | Green bit 128 (MSB)   | Green       | Mid-Range              |
|        | 8001       |                       |             |                        |
| Band 3 | 8000       | Green bit 64          |             |                        |
|        | 6001       |                       |             |                        |
| UNUSED |            | Green bit 32          | UNUSED      |                        |
| UNUSED |            | Green bit 16          |             |                        |
| UNUSED |            | Green bit 8           |             |                        |
| UNUSED |            | Green bit 4           |             |                        |
| UNUSED |            | Green bit 2           |             |                        |
| UNUSED |            | Green bit 1 (LSB)     |             |                        |
| Band 2 | 6000       | Blue bit 128 (MSB)    | Blue        | Lower Range            |
|        | 4001       |                       |             |                        |
| Band 1 | 4000       | Blue bit 64           |             |                        |
|        | 2001       |                       |             |                        |
| UNUSED |            | Blue bit 32           | UNUSED      |                        |
| UNUSED |            | Blue bit 16           |             |                        |
| UNUSED |            | Blue bit 8            |             |                        |
| UNUSED |            | Blue bit 4            |             |                        |
| UNUSED |            | Blue bit 2            |             |                        |
| UNUSED |            | Blue bit 1 (LSB)      |             |                        |



**Fig. 5 – 64-colours, 2-MSB per channel, 24-bit RGB high-contrast informative palette. Under each square, its respective 24-bit hexadecimal colour code. In each channel, only the two MSB are considered, allowing only the values &H00, &H40, &H80 and &HCO**

**Tavolozza informativa ad alto contrasto a 64 colori RGB 24-bit, con 2 MSB (bit più significativi) per canale. Sotto ogni quadrato, il relativo codice colore esadecimale a 24 bit. In ogni canale, solo i due MSB sono considerati, permettendo solamente i valori &H00, &H40, &H80 and &HCO**

property to provide a sharp increase of brightness as soon as the most significant bits in each RGB channel are activated. Considering the limited amount of display pixels engaged by each sample in the CETPE, the reduced palette coupled with the fewer bands considered may improve clarity, at the expense of a limited number of FWB's (six) enabled by this reductive mapping.

**References**

- [1] H. Nyquist, Certain topics in telegraph transmission theory, Trans. AIEE. 47 (2) (1928) 617-644.
- [2] C.E. Shannon, Communication in the presence of noise, P. IRE 37 (1) (1949) 10-21. <https://doi.org/10.1109/jrproc.1949.232969>
- [3] R. Boulanger, V. Lazzarini (Eds.), The Audio Programming Book, The MIT Press, Cambridge, Massachusetts (2011) 209-212.
- [4] M.T. Heideman, D.H. Johnson, C.S. Burrus, Gauss and the history of the fast Fourier transform, IEEE ASSP Magazine 1 (4) (1984) 14-21.
- [5] J. Smith, Pulse Code Modulation (PCM) in Mathematics of the Discrete Fourier Transform (DFT) with Audio Applications, 2nd ed., online book (2007). <https://ccrma.stanford.edu/~jos/mdft/mdft.html> (accessed December 29, 2022).
- [6] T.B. Welch, H.G. Wright Cameron, M.G. Morrow, Real-Time Digital Signal Processing from MATLAB to C with the TMS320C6x DSPs, 2nd ed., CRC Press, Boca Raton, USA, 2012.
- [7] National Instruments Corporation, White Paper 4278–The Fundamentals of FFT-Based Signal Analysis and Measurement in LabVIEW and LabWindows/CVI, 2018. [www.ni.com/white-paper/4278/en/](http://www.ni.com/white-paper/4278/en/) (accessed June 10, 2022).
- [8] R.B. Blackman, J.W. Tukey, The measurement of power spectra from the point of view of communications engineering, Bell Syst. Tech. J. 37 (1958) 185-282.
- [9] F.J. Harris, On the use of windows for harmonic analysis with the discrete Fourier transform, Proc. IEEE 66 (1978) 51-83.
- [10] A.H. Nuttall, Some windows with very good sidelobe behavior, IEEE Trans. Acoust. Speech Signal Process 29 (1981) 84-91.
- [11] C. Brizio, F.M. Buzzetti, G. Pavan, Beyond the audible: wide band (0-125 kHz) field investigation on Italian Orthoptera (Insecta) songs, Biodiversity Journal, 11 (2) (2020) 443-496. <https://doi.org/10.31396/Biodiv.Jour.2020.11.2.443.496>
- [12] Proof-of-concept, Python source code. [www.cesarebrizio.it/CE-TPE\\_Python\\_V4.0.py](http://www.cesarebrizio.it/CE-TPE_Python_V4.0.py) (accessed November 15, 2023).
- [13] Proof-of-concept, Python source code, HTML color-highlighted version. [www.cesarebrizio.it/CE-TPE%20HTML%20source.html](http://www.cesarebrizio.it/CE-TPE%20HTML%20source.html) (accessed November 15, 2023).
- [14] Copyright Commons – CC BY-SA 4.0 License deeds <https://creativecommons.org/licenses/by-sa/4.0/deed.en> (accessed November 15, 2023).
- [15] Proof-of-concept, example WAV file. [www.cesarebrizio.it/CETPE\\_Audio\\_Sample.wav](http://www.cesarebrizio.it/CETPE_Audio_Sample.wav) (accessed November 15, 2023).



# Resoconto del Seminario AIA “L’evoluzione del controllo delle vibrazioni: smart sensor networks & industry 4.0”

Alessandro Schiavi

INRiM – Istituto Nazionale di Ricerca Metrologica,  
Str. Delle Cacce, 91, 10135 Torino  
a.schiavi@inrim.it

**Ricevuto:** 20/11/2023

**Accettato:** 1/12/2023

**DOI:** 10.3280/ria2-2023oa16987

**ISSN:** 2385-2615

Il 28 marzo a Torino, si è tenuto il Seminario “L’evoluzione del controllo delle vibrazioni: smart sensor networks & Industry 4.0”, presso l’Istituto Nazionale di Ricerca Metrologica (INRiM). Il seminario è stato organizzato dall’Associazione Italiana di Acustica (AIA), in collaborazione con INRiM, Politecnico di Torino, ACCREDIA e Arpa Piemonte. Il presente articolo ne riassume i contenuti tecnico scientifici e lo scopo.

**Parole chiave:** seminario, AIA, associazione italiana di acustica

## **Report of the AIA Workshop “The evolution of vibration control: smart sensor networks & smart industry”**

On March 28<sup>th</sup> in Turin, was held the workshop “The evolution of vibration control: smart sensor networks & Industry 4.0” at the National Institute of Metrological Research (INRiM). The workshop was organized by the Italian Acoustics Association (AIA) in collaboration with INRiM, Politecnico di Torino, ACCREDIA and Arpa Piemonte. This article summarizes its technical-scientific contents and main purpose.

**Keywords:** workshop, AIA, Acoustical Society of Italy

## 1 | Introduzione

Nella giornata del 28 marzo 2023 a Torino, si è tenuto il Seminario “L’evoluzione del controllo delle vibrazioni: smart sensor networks & Industry 4.0”, presso l’Istituto Nazionale di Ricerca Metrologica (INRiM). Il seminario è stato organizzato dall’Associazione Italiana di Acustica (AIA), in collaborazione con INRiM, Politecnico di Torino, ACCREDIA e Arpa Piemonte.

Il Seminario ha visto un’interessata ed ampia platea di partecipanti (80 delegati, e 25 Crediti Formativi Professionali erogati per Ingegneri), provenienti dall’ambito accademico, industriale, dei servizi e della ricerca. Pur se a lungo rimandato a causa della pandemia (infatti inizialmente il Seminario era stato programmato per marzo 2020), i temi trattati hanno mantenuto – e tuttora mantengono – un significativo carattere innovativo, proiettato verso la cosiddetta “Quarta Rivoluzione Industriale”, attraverso la trasformazione digitale dei sistemi e degli strumenti di misurazione, e dei processi di gestione dei dati e di analisi.

Nel presente articolo si propone una breve sintesi dei contenuti tecnici e scientifici, sociali e organizzativi del Seminario.

## 2 | Programma scientifico

I lavori del Seminario sono stati aperti dal Presidente dell’AIA, Prof. Francesco Asdrubali e dal Direttore Scientifico dell’INRiM, Prof. Pietro Asinari, che hanno fornito un quadro introduttivo dal punto di vista dell’Associazione Italiana di Acustica e della metrologica applicata.



**Fig. 1 – L’apertura dei lavori del Seminario**  
*The opening of the Seminar’s work*

Il seminario mirava ad esaminare le prospettive emergenti legate alla digitalizzazione nell’ambito delle vibrazioni meccaniche, considerandole come un’opportunità concreta per lo sviluppo e l’espansione delle competenze tecniche e scientifiche. Gli argomenti trattati hanno fornito un quadro generale, dal punto di vista scientifico, tecnico ed applicativo, attraverso un approccio divulgativo, particolarmente rivolto a coloro che sono coinvolti nelle misurazioni in diversi settori di controllo e monitoraggio: dai processi industriali (per il monitoraggio del funzionamento di sistemi o la prevenzione dei difetti), all’Industria 4.0 (per la gestione dell’automazione e del Machine Learning), così come per altre applicazioni oggi molto diffuse, come il rilevamento ambientale, sismico e delle infrastrutture, i sistemi di navigazione e posizionamento, la chirurgia e le diagnosi a distanza, il rilevamento di feedback sulla salute e il rischio ambientale/naturale.

D'altra parte, si rende necessario definire anche un quadro metrologico adeguato per supportare l'implementazione della nuova sensoristica digitale e delle reti di sensori, attualmente non ancora disponibile. La qualità e l'affidabilità dei dati rivestono un'importanza fondamentale, insieme alla selezione di adeguati sistemi di misurazione, sensori fisico-digitali di ultima generazione, e metodi di analisi. Conformemente a quanto evidenziato nel documento strategico del Comitato Consultivo per l'Acustica, gli Ultrasuoni e le Vibrazioni (CCAUV) del BIPM, la diffusione di tali sistemi richiede infatti il sostegno di una nuova metrologia, necessaria per garantire un funzionamento affidabile e sicuro, compreso il rilevamento digitale, nonché per supportare le catene di riferibilità e soddisfare i requisiti di gestione della qualità.

I temi affrontati durante il Seminario sono stati molteplici, offrendo una panoramica diversificata di applicazioni e sviluppi tecnologici presentati da rinomati esperti provenienti da Università, Industria, Agenzie e Laboratori.

### 3 | La sintesi degli interventi

Il Seminario è stato articolato in 4 sessioni, a cui è seguito un partecipato e interessato dibattito tra relatori e pubblico.

Dopo la sessione introduttiva, in cui sono state presentate le recenti attività di ricerca metrologica sviluppate in INRiM, volte a fornire la taratura di sensori accelerometrici fisico-digitali e di reti di sensori (Alessandro Schiavi, INRiM), e il ruolo di ACCREDIA relativamente all'accreditamento, nel quadro emergente della digitalizzazione (Federico Marengo, ACCREDIA), si sono succedute 3 sessioni tecniche, così suddivise:

- Sessione 1: "Applicazioni innovative, Sensor network e Big-Data".
- Sessione 2: "Strumenti e sistemi di misura di nuova generazione".
- Sessione 3: "Applicazioni per l'industria, le infrastrutture e la salute".

La sessione 1 ha introdotto i più recenti metodi adottati in ambito industriale, come la «*Novelty Detection*», per l'analisi dell'evoluzione di danneggiamenti in sistemi meccanici attraverso l'uso di reti di sensori (Alessandro Paolo Daga – Politecnico di Torino), e in ambito ambientale per la gestione dell'incertezza in test di monitoraggio sismico in strutture, mediante il «*Machine Learning*» (Giulio D'Emilia – Università dell'Aquila).

Nella sessione 2 relatori provenienti dal mondo industriale hanno presentato i più avanzati sistemi sviluppati per il controllo delle vibrazioni, attraverso l'uso di sensoristica di nuova generazione, in particolare sono state presentate le ultime tipologie di sensori intelligenti «*smart sensors*», realizzate da STMicroelectronics, per il monitoraggio delle vibrazioni (Davide Terzi – STMicroelectronics), e della progettazione e gestione di estese reti di monitoraggio *Wireless* (Stefano Prioletta – PCB); infine è stata presentata un'approfondita analisi dei problemi e

delle possibili soluzioni relative all'acquisizione simultanea delle due tipologie di informazioni, ponendo a confronto differenti approcci standard: UNI 9614 e UNI 9916 (Andrea Cerniglia – ACCON Italia Srl).

Nella sessione 3 è stata presentata un'ampia panoramica dello stato dell'arte, attraverso esempi applicativi, delle più recenti tecniche di misure e di controllo delle vibrazioni, come nel monitoraggio delle infrastrutture e per la valutazione del disturbo (Jacopo Fogola, Fabrizio Bosco – ARPA Piemonte), per la salvaguardia del costruito storico, nei beni monumentali (Alessandro Grazzini – Politecnico di Torino), e per il controllo e la mitigazione delle vibrazioni trasmesse all'uomo (Christian Preti – STEMS – CNR); sono stati quindi presentati i meccanismi che regolano la relazione tra la vibrazione meccanica e la radiazione acustica (Andrea Santoni – Università di Ferrara), e gli aspetti metrologici relativi alla caratterizzazione e taratura di microfoni MEMS digitali di nuova generazione (Fabio Saba – INRiM).

Ulteriori informazioni possono essere reperite sul sito dell'Associazione Italiana di Acustica, alla pagina: <https://acustica-iaa.it/evoluzione-del-controllo-delle-vibrazioni-smart-sensor-networks-industry-4-0-torino-28-marzo-2023/>

### 4 | Eventi sociali

La giornata del Seminario è stata anticipata da una cena informale di benvenuto a cui hanno partecipato i membri del comitato organizzatore, del comitato scientifico, i relatori ed alcuni partecipanti al Seminario.



**Fig. 2 – Piazza Vittorio Veneto  
Vittorio Veneto Square**

La convivialità dell'evento, organizzato presso il Ristorante "Il Porto id Savona", nella magnifica cornice dei portici di Piazza Vittorio Veneto, ha favorito un fruttuoso scambio di idee e proposte di attività congiunte, negli ambiti tecnici della tematica del convegno, nonché la possibilità di nuove adesioni all'Associazione Italiana di Acustica, da parte di professionisti ed esperti di vibrazioni, reti di sensori e sensoristica digitale.



**Fig. 3 – Cena di benvenuto**  
*Welcome dinner*

## 5 | L'organizzazione

Il seminario è stato organizzato dall'Associazione Italiana di Acustica, in collaborazione con INRiM, e con il patrocinio del Politecnico di Torino, di ACCREDIA e di ARPA Piemonte.

Il Comitato Organizzatore locale (A. Schiavi, A. Prato, F. Mazzoleni, J. Fogola, B. Fracassi, E. Melli) ha curato l'organizzazione dell'evento presso il campus INRiM, ha contribuito alla definizione del programma e all'invito dei relatori, oltre a diffondere, attraverso i propri canali istituzionali e degli Enti patrocinanti, le informazioni dell'evento.

Il comitato Scientifico (A. Schiavi, F. Asdrubali, S. Luzzi, F. Pedrielli, E. Carletti, P. Fausti, A. Cerniglia, C. Preti) ha significativamente supportato l'organizzazione dell'evento, l'armonizzazione dei contenuti scientifici e delle presentazioni e l'invito dei relatori. Si vuole sottolineare il ruolo fondamentale della Segreteria del Seminario (S. Senesi), che ha supportato la realizzazione dell'evento, sovrinteso alla preparazione del materiale informativo, contribuito alla diffusione dell'evento, e gestito gli aspetti amministrativi. Infine un ringraziamento per il supporto è dovuto ai Sostenitori Platinum AIA 2023: Ecophon, Siemens, Sogimi Gruppo; ai Sostenitori Oro AIA 2023: Aesse Ambiente, Head acoustics, Saint-Gobain, Spectra, Svantek, Wood-Skin; ai Sostenitori Argento AIA 2023: Isolgomma; ed ai Sostenitori Bronzo AIA 2023: Rockwool.

# Resoconto del 49° Convegno Nazionale AIA

Francesco Pompoli<sup>a\*</sup> | Patrizio Fausti<sup>a</sup>

<sup>a</sup> Dipartimento di Ingegneria,  
Università di Ferrara,  
Via Saragat, 1, 44122 Ferrara

\* Autore di riferimento:  
francesco.pompoli@unife.it

**Ricevuto:** 20/11/2023

**Accettato:** 1/12/2023

**DOI:** 10.3280/ria2-2023oa16987

**ISSN:** 2385-2615

Si è tenuto dal 7 al 9 giugno, presso il Polo Scientifico Tecnologico dell'Università di Ferrara il 49° Convegno Nazionale dell'Associazione Italiana di Acustica (AIA). Il convegno è stato organizzato dall'AIA con la collaborazione del Dipartimento di Ingegneria dell'Università di Ferrara e con il CNR-STEMS sede di Ferrara. Nel presente articolo si propone un resoconto delle attività scientifiche e sociali che si sono tenute nei tre giorni di Convegno.

**Parole chiave:** convegno nazionale, AIA, associazione italiana di acustica

## Report of the 49th AIA National Conference

The 49th National Conference of the Acoustical Society of Italy (AIA) was held from 7 to 9 June at the Polo Scientifico Tecnologico of the University of Ferrara. The conference was organized by AIA in collaboration with the Department of Engineering of the University of Ferrara and with the CNR-STEMS headquarters in Ferrara. This article presents a report of the scientific and social activities that took place during the three days of the Conference.

**Keywords:** national conference, AIA, Acoustical Society of Italy

## 1 | Introduzione

Dal 7 al 9 giugno, presso il Polo Scientifico Tecnologico dell'Università di Ferrara, si è tenuto il 49° Convegno Nazionale dell'Associazione Italiana di Acustica (AIA).

Il convegno è stato organizzato dall'AIA con la collaborazione del Dipartimento di Ingegneria dell'Università di Ferrara e con il CNR-STEMS sede di Ferrara.

È stato un convegno di grande partecipazione (241 delegati, 13 aziende nell'area espositiva, 95 partecipanti ai corsi TCA) e di grande successo, con un programma ricco di contenuti tecnico-scientifici (sessioni, presentazioni, poster, rassegne, corsi, premi a giovani acustici) e di momenti di socialità (aperitivo e visita tecnica al Teatro Comunale, passeggiata all'alba sulle mura, cena sociale al palazzo Roverella, visita alla mostra sul "Rinascimento a Ferrara", gita in barca sul fiume Po).

Nel presente articolo si propone un resoconto degli aspetti scientifici, sociali e organizzativi che hanno caratterizzato questa edizione del Convegno Nazionale AIA.

## 2 | Programma scientifico

Il Convegno si è aperto con la cerimonia di apertura durante la quale sono intervenute diverse autorità accademiche, tra cui la Prof.ssa Evelina Lamma (Prorettrice Vicaria dell'Università di Ferrara), il Prof. Marco Franchini (Direttore del Dipartimento di Ingegneria) ed il Prof. Giorgio Dalpiaz (Responsabile Scientifico del Laboratorio in Rete Mechlav), nonché i Presidenti di alcune Associazioni con cui l'AIA ha rapporti di collaborazione, tra cui il Prof. Claudio Zilio, Presidente AICARR (Associazione

Italiana Condizionamento dell'Aria, Riscaldamento e Refrigerazione) e il Prof. Andrea Gasparella, Presidente IBPSA Italia (International Building Performance Simulation Association). Durante la cerimonia sono stati annunciati i vincitori dei premi AIA, assegnati a lavori di grande qualità che hanno premiato giovani acustici ed acustiche, che rappresentano il futuro dell'Associazione: Gioia Fusaro (Premio Sacerdote), Alessandro Monticelli (Premio Giacomini), Paola Pulella (Premio giovani professionisti) e Francesco Mori (Premio Barducci).

Durante la cerimonia di apertura è stata consegnata ad Alessandro Peretti la targa di Socio Onorario, a coronamento di 40 anni di partecipazione alla vita della Associazione.

Le sessioni strutturate organizzate sono state 14 (tabella 1), coordinate da 31 chairman, e sono state suddivise in due aule in parallelo, con un totale di 77 presentazioni orali.

Le sessioni sono cominciate in seduta plenaria con un toccante ricordo di Gianni Pavan, tragicamente scomparso nei giorni precedenti al Convegno: Gianni Brambilla, Andrea Cerniglia ed Anna Magrini hanno ricordato la sua straordinaria attività di studio nel settore della bioacustica.

Una particolare menzione alla sessione di "Vibroacustica di sistemi meccanici e prodotti industriali", coordinata da Paolo Bonfiglio ed Emiliano Mucchi, che ha raccolto contributi di aziende che operano in ambiti acustici solitamente non rappresentati durante i convegni AIA. I nove contributi hanno riguardato applicazioni automotive e industriali di aziende quali *Adler Peltzer Group*, *Autoneum*, *Phononic Vibes*, *CNH Industrial*, *Lavazza*; l'auspicio è che anche nei prossimi eventi le aziende siano stimolate a partecipare alle sessioni scientifiche portando il loro contributo alla comunità acustica italiana. Tra le sessioni più ricche di interventi occorre menzionare quella sul

*Rumore negli ambienti di vita* (9 presentazioni ed 1 poster), *Benessere acustico e benessere globale degli ambienti* (8 presentazioni e 2 poster) e *Acustica dei materiali e dei sistemi edilizi* (8 presentazioni ed 1 poster).

Alle sessioni orali si è aggiunta una sessione poster con nove contributi, esposti per tutta la durata del convegno e discussi in una sessione dedicata di 30' nella giornata di giovedì 8 giugno. Gli atti del convegno, che comprendono un totale di 90 articoli, sono pubblicati al seguente link: <https://bit.ly/49ConvegnoAIA> con accesso riservato agli iscritti all'evento.

Durante il Convegno hanno riscosso grande successo le visite guidate presso i Laboratori di Acustica del Dipartimento di Ingegneria, ed in particolare alla Camera Anecoica, con oltre 60 partecipanti distribuiti in due turni di visita.

### 3 | Area espositiva e rassegne tecniche

Nell'atrio della Sede del Convegno è stata allestita un'area espositiva che ha accolto 13 sponsor. Da sottolineare che ben 12 di essi sono sostenitori commerciali annuali dell'AIA e vanno ringraziati per la loro fiducia e costante partecipazione agli eventi organizzati dalla Associazione. Il loro numero, crescente nel corso degli ultimi anni, rappresenta un record storico per l'AIA ed un impegno organizzativo importante per trovare spazi e allestimenti che possano soddisfare le loro richieste. A completamento dell'area espositiva, all'interno del programma scientifico sono state inserite 9 rassegne tecniche in sessione plenaria durante le quali le aziende sponsor hanno potuto illustrare gli ultimi prodotti/applicazioni nel settore dell'acustica e delle vibrazioni.

### 4 | Corsi TCA

Nella mattinata di mercoledì, prima dell'inizio del Convegno, ed in quella di venerdì, al termine del Convegno, sono stati organizzati, in collaborazione con l'Ordine degli Ingegneri di Ferrara, due corsi TCA da 4 ore dal titolo:

- segnalazione sonora e vocale (EVAC); dal design al collaudo;
- le norme richiamate dai CAM: UNI 11367:2023 e UNI 11532-2:2020.

I 50 posti disponibili per ciascun corso sono stati praticamente esauriti (50 partecipanti per il primo corso, 45 partecipanti per il secondo).

### 5 | Eventi sociali

Le tre giornate di Convegno sono state ricche di eventi sociali che hanno favorito un clima di grande affiatamento tra i partecipanti. La prima serata è stata dedicata al Cocktail di Benvenuto, tenutosi presso il Ridotto del Teatro Comunale di Ferrara. Durante il cocktail sono state organizzate visite guidate al teatro Comunale, che hanno riscosso grande successo tra i partecipanti. Di grande impatto la suggestiva visita alla

Sala degli Argani posta nel sottotetto dell'edificio che ospita gli originali argani risalenti al '700 che venivano utilizzati per sollevare i lampadari. Il cocktail di benvenuto è stato seguito dal concerto del Coro Polifonico Santo Spirito di Ferrara diretto dal Maestro Francesco Pinamonti.

La seconda giornata è cominciata all'alba con l'iniziativa *Sunrise Run&Walk* che ha accompagnato i coraggiosi partecipanti (40) in una suggestiva passeggiata per le mura rinascimentali ed il centro storico di Ferrara lungo due percorsi di 6 km per la camminata ed 8 km per la corsa. L'evento, che si spera entri stabilmente nei programmi sociali dei prossimi convegni (nazionali e non solo...) ha raccolto grande apprezzamento; lo sforzo e la fiducia dei partecipanti è stata ripagata da una maglietta celebrativa con il logo della manifestazione disegnato da Giuseppe Bonfiglio.

La serata della seconda giornata è stata dedicata alla Cena Sociale, tenutasi nel suggestivo cortile del Palazzo rinascimentale Roverella. Graziati dal meteo un po' instabile nei giorni del convegno, i partecipanti (200) sono stati rifocillati dai pregevoli piatti preparati da *Quel Fantastico Giovedì* e successivamente intrattenuti da estemporanei e apprezzatissimi interventi musicali tra cui spicca il duo "Gioia Fusaro & Dario D'Orazio" ed il gruppo "Los Tenores del sueño" che ha ripresentato la hit "*Sonido Lindo* (AIA, AIA, AIA, AIA !!!) riveduta ed aggiornata in alcune strofe. Da segnalare che la serata è debordata nelle ore notturne e che alcuni giovani acustici hanno superato le 24 ore no-stop avendo visto l'alba del venerdì dopo aver partecipato alla Sunrise Run&Walk del giovedì.

Nella terza giornata, al termine del Convegno, sono stati organizzati due eventi: una visita della mostra "Rinascimento a Ferrara" presso il Palazzo dei Diamanti, per gli interessati non impegnati con il corso TCA sui CAM e, a chiusura di giornata, una gita in barca con navigazione al tramonto sul fiume Po, simbolicamente in direzione Torino, verso Forum Acusticum.

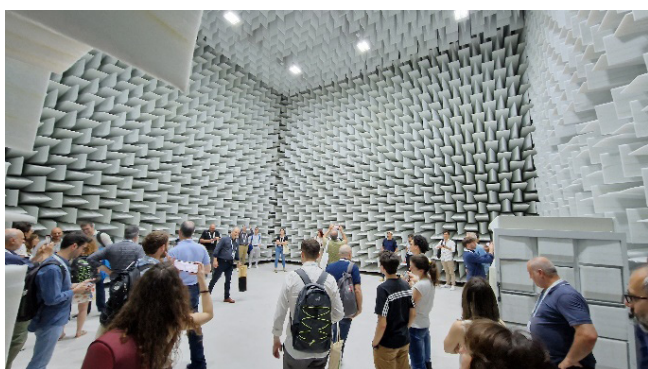
La serata è poi proseguita liberamente in città, con un folto gruppetto di irriducibili che, appena sbarcati dalla "Nena", ha approfittato della sagra delle Pro Loco della Provincia di Ferrara, presso la Darsena di San Paolo, altri che si sono diretti verso degustazioni di gelato artigianale e/o bicchiere della staffa in locali del centro storico.



**Fig. 1 – Consegna targa socio onorario al Dott. Alessandro Peretti**  
**Delivery of honorary member plaque to Dr. Alessandro Peretti**



**Fig. 2 – Area espositiva**  
*Exhibition area*



**Fig. 3 – In visita alla camera anecoica**  
*Visiting an anechoic chamber*



**Fig. 4 – Logo sulla maglietta per la passeggiata all'alba sulle mura**  
*(disegnata da Beppe Bonfiglio)*  
**Logo on the t-shirt for the sunrise walk on the walls**  
*(designed by Beppe Bonfiglio)*



**Fig. 5 – All'alba davanti al castello di Ferrara**  
*At dawn in front of the castle of Ferrara*



**Fig. 6 – I camminatori all'alba sulle mura**  
*Walkers at dawn on the walls*



**Fig. 7 – Cena sociale al Palazzo Roverella**  
*Social dinner at Palazzo Roverella*

**Tab. 1 – Elenco delle sessioni strutturate e rispettivi chairmen**  
*List of structured sessions and chairmen*

| <i>Sessione Strutturata</i>                        | <i>Chair</i>                |
|--|-----------------------------|
| S01 – Rumore negli ambienti di vita                | Caniato, Cerniglia, Fausti  |
| S02 – Rumore e vibrazioni nei luoghi di lavoro     | Maricone, Mori              |
| S03 – Acustica dei materiali e dei sistemi edilizi | Barbaresi, Di Bella, Secchi |
| S04 – Acustica architettonica e musicale           | De Salvio, Farnetani        |



**Tab. 1 – segue**

| <i>Sessione Strutturata</i>   | <i>Chair</i>                 |
|---|------------------------------|
| S05 – Metrologia, misure acustiche e strumentazione                                 | Ascari, Prato                |
| S07 – Acustica numerica   | Fratoni, Marescotti          |
| S09 – Acustica legale e forense   | Luzzi, Tombolato             |
| S11 – Monitoraggio e valutazione delle vibrazioni trasmesse agli edifici e all'uomo | Santoni, Schiavi             |
| S12 – Materiali sostenibili e metamateriali per l'acustica                          | Fusaro, Martellotta, Pompoli |
| S13 – Vibroacustica di sistemi meccanici e prodotti industriali                     | Bonfiglio, Mucchi            |
| S14 – Acustica degli Uffici e Open Space  | D'Orazio, Parati             |
| S15 – Benessere acustico e benessere globale degli ambienti                         | Prodi, Puglisi, Visentin     |
| S16 – Valutazione e controllo del rumore degli impianti eolici                      | Licitra, Mastino             |
| S17 – Paesaggio sonoro  | Brambilla                    |



**Fig. 8 – In visita al teatro comunale**  
*Visiting the municipal theater*



**Fig. 9 – In visita al teatro comunale**  
*Visiting the municipal theater*



**Fig. 10 – Il lento scorrere del fiume Po, dal battello fluviale “Nena”**  
*The slow flow of the Po river, from the “Nena” river boat*



**Fig. 11 – Bella luce e splendidi sorrisi, a fine convegno sul grande fiume**  
*Beautiful light and splendid smiles at the end of the conference on the great river*



**Fig. 12 – Gli organizzatori a fine convegno, esausti ma soddisfatti!**  
*The organizers at the end of the conference, exhausted but satisfied!*

# Resoconto del X Convegno della European Acoustical Association, Forum Acusticum 2023

Arianna Astolfi<sup>a\*</sup> | Francesco Asdrubali<sup>b</sup>

<sup>a</sup> Politecnico di Torino, Dipartimento Energia, Corso Duca degli Abruzzi, 24, 10129 Torino

<sup>b</sup> Dipartimento di Scienze umane e sociali internazionali (SUSI), Università per Stranieri di Perugia, Piazza Fortebraccio, 4, 06123 Perugia

\* Autore di riferimento:  
arianna.astolfi@polito.it

**Ricevuto:** 20/11/2023

**Accettato:** 1/12/2023

**DOI:** 10.3280/ria2-2023oa16987

**ISSN:** 2385-2615

Si è svolto a Torino, dall'11 al 15 settembre 2023, Forum Acusticum, il 10° Convegno della EAA – European Acoustics Association, l'Associazione che riunisce ben 33 società acustiche nazionali di tutta Europa. Il Congresso è stato organizzato a livello nazionale da AIA, Associazione Italiana di Acustica, che da oltre 50 anni – è stata fondata nel 1972 – rappresenta in Italia il più autorevole punto di riferimento tecnico-scientifico in materia. Con 1250 partecipanti, di cui 488 con meno di 35 anni, il Forum Acusticum 2023 è stato ospitato al Politecnico di Torino, in un'area rinnovata del campus con aule nuove e attrezzate. Il Congresso ha rappresentato un evento di livello mondiale nei settori dell'acustica e delle vibrazioni e una grande opportunità per i partecipanti di aumentare le proprie conoscenze e di condividere esperienze e competenze.

**Parole chiave:** Convegno Internazionale, EAA, Forum Acusticum

## **Report of the 10th Conference of the European Acoustical Association, Forum Acusticum 2023**

Forum Acusticum, the 10th conference of the EAA – European Acoustics Association, the association that brings together 33 national acoustic societies, took place in Turin from 11 to 15 September 2023, from all over Europe. The Congress has been organized at a national level by AIA, the Italian Association of Acoustics, which for over 50 years, was founded in 1972, it has represented the most authoritative technical-scientific reference point on the subject in Italy. With 1250 participants, of which 488 were under 35 years old, the Forum Acusticum 2023 was hosted at the Polytechnic of Turin, in a renovated area of the campus with new and equipped classrooms. The Congress represented a world-class event in acoustics and vibration and a great opportunity for participants to increase their knowledge and share experiences and expertise.

**Keywords:** International Conference, EAA, Forum Acusticum

## 1 | Introduzione

Le stime più recenti dell'Agenzia Ambientale Europea (European Environment Agency) evidenziano che più del 20% della popolazione degli stati europei è esposta cronicamente a livelli di rumore da traffico veicolare nocivi per la salute. La percentuale è molto più alta nelle aree urbane e, nonostante le politiche comunitarie e nazionali di prevenzione e mitigazione del rumore, è destinata ad aumentare al 30% entro il 2030.

Per parlare di queste tematiche, ma anche di molto altro, si è svolto a Torino, dall'11 al 15 settembre 2023, Forum Acusticum, il 10° Convegno della EAA – European Acoustics Association, l'Associazione che riunisce ben 33 società acustiche nazionali di tutta Europa. Il Congresso è stato organizzato a livello nazionale da AIA, Associazione Italiana di Acustica, che da oltre 50 anni – è stata fondata nel 1972 – rappresenta in Italia il più autorevole punto di riferimento tecnico-scientifico in materia. Con 1250 partecipanti, di cui 488 con meno di 35 anni, il Forum Acusticum 2023 è stato ospitato al Politecnico

di Torino, in un'area rinnovata del campus con aule nuove e attrezzate. Il Congresso ha rappresentato un evento di livello mondiale nei settori dell'acustica e delle vibrazioni e una grande opportunità per i partecipanti di aumentare le proprie conoscenze e di condividere esperienze e competenze.

Grazie alla collaborazione con il Green Team del Politecnico di Torino, il congresso è stato un evento green, caratterizzato da una grande attenzione all'ambiente, aspetto che rappresenta una novità assoluta per una manifestazione di questa portata nel campo dell'acustica. Il 65% degli intervistati ha apprezzato il focus sulla sostenibilità, il 44% ha fatto più di 10.000 passi durante le giornate del convegno e il 79% ha riempito la borraccia con l'acqua dello SMAT (Società Metropolitana Acque Torino SpA) per dissetarsi.

## 2 | Programma scientifico

Il programma scientifico è stato estremamente ricco e interessante, con 5 relazioni plenarie, 990 presentazioni orali,

60 presentazioni di poster per coprire tutti gli argomenti dell'acustica, dall'acustica fisica agli argomenti applicati, quali ad esempio l'acustica architettonica, l'acustica musicale, il soundscape, la bioacustica, l'acustica edilizia, il rumore industriale e da infrastrutture di trasporto e altri ancora. Sono stati organizzati 11 numeri speciali con articoli selezionati dal convegno sulla Rivista Italiana di Acustica e su riviste internazionali tra le quali "Acoustics", "Acoustics in Practice", "Acta Acustica", "Applied Acoustics", "Building Acoustics", "Noise Mapping".

Le relazioni plenarie sono state incentrate sui temi del patrimonio acustico della biodiversità, della qualità ambientale acustica, visiva e termica, sulla ricostruzione virtuale del campo sonoro, sulla produzione vocale dei vertebrati, sull'anno internazionale del suono (2020-21). Si sono organizzate, inoltre, visite tecniche presso il Centro Ricerche, Innovazione Tecnologica e Sperimentazione Rai (CRITS), l'Istituto Nazionale di Ricerca Metrologica (INRiM), i laboratori NVH (Noise, vibration, and harshness) di Stellantis, la galleria del vento di Pininfarina, l'auditorium del Grattacielo Intesa Sanpaolo, il Teatro Regio. Nella sede del congresso è stata allestita un'ampia esposizione, con 35 aziende che hanno presentato materiali acustici innovativi e strumentazioni acustiche di ultima generazione.

Il congresso è stato preceduto dalla scuola estiva EAA sui temi emergenti dell'acustica, organizzata dalla professoressa Louena Shtrepi del Politecnico di Torino e dal dottor Iván Herrero-Durá della Bertrandt Technologie GmbH di Mönshheim in Germania. Organizzata nei tre giorni che precedono Forum Acusticum, con più di 60 docenti di primissimo piano, la scuola è stata una grande opportunità formativa per 165 fra studenti e giovani ricercatori di tutto il mondo. I giovani acustici hanno beneficiato anche del Forum Laboris, che li ha messi in contatto con alcune imprese alla ricerca di talenti, e di un evento sociale organizzato dallo Young Acoustician Network.

### 3 | Cerimonie di apertura e chiusura ed eventi sociali

Alla cerimonia inaugurale sono intervenuti il Presidente della EAA, prof. Dick Botteldoren, la professoressa Arianna Astolfi del Politecnico di Torino, Chair del congresso, il co-chair del congresso e Presidente dell'AIA, prof. Francesco Asdrubali, e numerose autorità accademiche e cittadine, quali il Rettore Guido Saracco, l'Assessora del Comune di Torino alla transizione ecologica e digitale e alle politiche per l'ambiente, dottoressa Chiara Foglietta, Patrizia Lombardi, Vice-rettrice al Campus e Comunità sostenibile del Politecnico di Torino, il Direttore scientifico dell'INRiM, Pietro Asinari, il Direttore di ARPA Piemonte, il dott. Secondo Barbero.

Coerentemente alle tematiche trattate, si è tenuto un concerto al Conservatorio di Torino "G. Verdi", visite turistiche al Museo del Cinema, Museo Lavazza e Mu-

seo Egizio, una cena di gala al Museo dell'Automobile, e una jam session alle Officine Grandi Riparazioni. La jam session ha visto più di 20 formazioni e oltre 50 persone (musicisti, cantanti) esibirsi su un grande palcoscenico, creando un magico effetto di aggregazione tra paesi e culture diverse.

Alla cerimonia di chiusura sono stati consegnati 6 premi per i migliori articoli presentati da giovani ricercatori finanziati dalla HEAD-Genuit-Foundation e sono stati presentati i risultati molto positivi sul sondaggio relativo all'evento eco-sostenibile. Parte degli utili sono stati destinati a piantare 11 aceri tra il civico 30 e il civico 34 di Corso Castelfidardo a Torino, nel Campus Politecnico.



**Foto 1 – Welcome cocktail presso il Castello del Valentino (Politecnico di Torino, Torino)**

*Welcome cocktail at the Valentino Castel (Politecnico di Torino, Torino)*



**Foto 2 – Accompagnamento musicale degli studenti del Conservatorio Statale di Musica Giuseppe Verdi di Torino al Welcome Cocktail (Castello del Valentino, Politecnico di Torino)**

*Welcome Cocktail with jazz performance by the students of Conservatorio Statale di Musica Giuseppe Verdi di Torino (Valentino Castle, Politecnico di Torino)*



**Foto 3 – I partecipanti e docenti della Summer School (Aule I, Politecnico di Torino)**  
**Summer School Participants and lecturers (Rooms I, Politecnico di Torino)**



**Foto 6 – Ballerini di tango (Elena Garis e Marcelo Ballonzo) durante il concerto presso Conservatorio Statale di Musica Giuseppe Verdi di Torino**  
**Tango dancers (Elena Garis and Marcelo Ballonzo) during the concert at Conservatorio Statale di Musica Giuseppe Verdi di Torino**



**Foto 4 – La cerimonia di apertura presso l'Aula Magna "Giovanni Agnelli" (Politecnico di Torino)**  
**Opening ceremony at the Main Hall "Giovanni Agnelli" (Politecnico di Torino)**



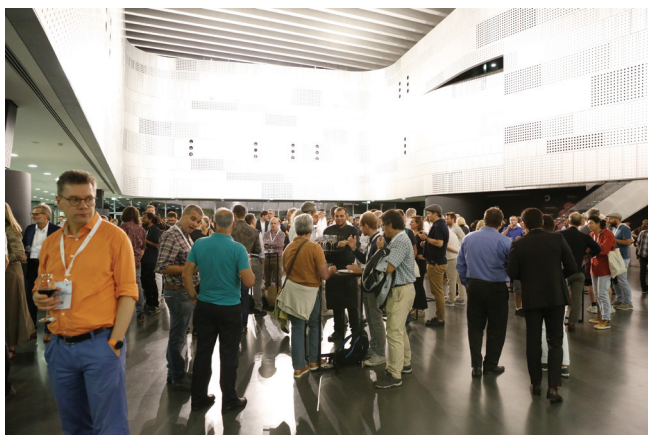
**Foto 7 – Gruppo musicale durante la Jam Session presso OGR Torino**  
**Band performance during the Jam Session at OGR Torino**



**Foto 5 – Il concerto di tango argentino con il Quartetto Marcucci (Marco Fringuellino, Ezio Borghese, Ciro Cirri, Enrico Luxardo) e musica classica con Paolo Tarizzo e Danilo Putrino (Conservatorio Statale di Musica Giuseppe Verdi di Torino)**  
**Argentine tango concert by Quartetto Marcucci (Marco Fringuellino, Ezio Borghese, Ciro Cirri, Enrico Luxardo) and classical music concert by Paolo Tarizzo and Danilo Putrino (Conservatorio Statale di Musica Giuseppe Verdi di Torino)**



**Foto 8 – Visita del Museo dell'Automobile di Torino (MAUTO)**  
**Visit of the Museo dell'Automobile di Torino (MAUTO)**



**Foto 9 – Gala Dinner presso il Museo dell'Automobile di Torino (MAUTO)**  
*Gala Dinner at the Museo dell'Automobile di Torino (MAUTO)*



**Foto 10 – Il Team organizzatore al Gala Dinner presso il Museo dell'Automobile di Torino (Team locale del Politecnico di Torino e PCO: CCI Srl (Centro Congressi Internazionale) di Torino)**  
*Organizing team at the Gala Dinner at Museo dell'Automobile in Torino (Local team of Politecnico di Torino and PCO: CCI Srl (Centro Congressi Internazionale) di Torino)*



**Foto 11 – Il Team organizzatore (PCO: CCI Srl (Centro Congressi Internazionale) di Torino e team locale del Politecnico di Torino)**  
*Organizing team (PCO: CCI Srl (Centro Congressi Internazionale) di Torino and Local team of Politecnico di Torino)*



**Foto 12 – I chairs della conferenza (Francesco Asdrubali e Arianna Astolfi)**  
*Chairs of the conference (Francesco Asdrubali e Arianna Astolfi)*

# Beautiful Sounds 2023. Suoni positivi per luoghi felici

Sergio Luzzi

Vie en.ro.se Ingegneria  
Viale Belfiore, 36, 50144 Firenze  
sergio.luzzi@vienrose.it

**Ricevuto:** 20/11/2023

**Accettato:** 1/12/2023

**DOI:** 10.3280/ria2-20230a16987

**ISSN:** 2385-2615

Il 18 ottobre a Firenze, si è tenuto l'evento "Beautiful Sounds 2023. Suoni positivi per luoghi felici" nella prestigiosa sede di Palazzo Vecchio. L'evento è stato organizzato da: Associazione Italiana di Acustica (AIA), Comune di Firenze e Ordine degli Ingegneri, in collaborazione con Vie en.ro.se. Ingegneria e con l'Associazione Pescas. Il presente articolo ne riassume i contenuti tecnico scientifici e lo scopo.

**Parole chiave:** seminario, AIA, associazione italiana di acustica

## **Beautiful Sounds 2023. Positive sounds for happy places**

On October 18th in Florence, the event "Beautiful Sounds 2023. Positive sounds for happy places" was held in the prestigious venue of Palazzo Vecchio. The event was organized by: Italian Association of Acoustics (AIA), Municipality of Florence and Order of Engineers, in collaboration with Vie en.ro.se. Engineering and with the Pescas Association. This article summarizes its technical-scientific contents and purpose.

**Keywords:** Workshop, AIA, Acoustical Society of Italy

## 1 | Introduzione

Il suono gioca un ruolo importante nella fruizione dei luoghi e dei paesaggi così come in tutte le attività umane. L'Associazione Italiana di Acustica lo ha sperimentato coordinando a livello nazionale le iniziative dell'Anno Internazionale del Suono, iniziativa globale riferita alla "Charter of Sound" UNESCO n. 39C/59 conclusa al Forum Acusticum di Torino nel settembre 2023.

I paesaggi sonori, naturali e antropizzati, caratterizzano l'identità dei luoghi di vita e di lavoro. I suoni sono una componente essenziale della comunicazione, sotto forma di parlato e ascolto, avvertimento, musica e suoni creativi. I suoni indesiderati e disturbanti, percepiti come rumore, devono essere controllati per garantire ambienti di vita e di lavoro di qualità.

Fin dal 1998 l'Associazione Italiana di Acustica, insieme al Comune e all'Ordine degli Ingegneri di Firenze organizza le Giornate di Studio sull'Acustica, nella meravigliosa sede del Salone dei Cinquecento di Palazzo Vecchio. I temi trattati nelle precedenti "giornate" hanno riguardato tutti gli aspetti della valutazione e la mitigazione del rumore in ambito urbano e della qualità acustica dei luoghi, evidenziando la correlazione tra esposizione al rumore e salute delle persone esposte, presentando i risultati di ricerche nazionali e internazionali nell'ambito dell'acustica applicata.

Nella tradizione delle "Giornate" di Palazzo Vecchio, il 18 ottobre 2023 si è svolto a Firenze l'evento "Beautiful Sounds 2023. Suoni positivi per luoghi felici", una giornata di studio organizzata dai partner storici, AIA, Comune di Firenze e Ordine degli Ingegneri, in collaborazione con Vie en.ro.se. Ingegneria e con l'Associazione Pescas.

## 2 | Il programma scientifico

L'evento scientifico ha visto la partecipazione di quasi duecento persone e ha raccolto contributi di esperti provenienti da molti settori che a livelli diversi si occupano di suono e benessere negli ambienti di vita. La giornata si è composta di interventi dedicati ai suoni del mondo e delle città, alle componenti identitarie del suono come fonte di salute, di piacere, di memoria e alla compatibilità dei suoni e dei rumori con il territorio. A questi temi si è aggiunta una sessione strutturata sui risultati dell'importante progetto europeo Life SNEAK, coordinato dal Comune di Firenze, che tratta delle problematiche di acustica e vibrazioni legate alla mobilità urbana ove si sovrappongono molteplici sorgenti e sono necessarie particolari soluzioni per la mitigazione degli impatti.

Dopo l'introduzione sulla possibile definizione dei Beautiful Sounds, affidata a Sergio Luzzi e Giovanni Brambilla, si è parlato delle politiche e dei progetti per la qualità sonora degli spazi urbani, con Arnaldo Melloni e Andrea Giorgio, Assessore all'Ambiente del Comune di Firenze. Natacha Fabbri, filosofa della scienza, esperta di suoni e armonia, ha parlato di "Edifici che cantano", ovvero dell'incontro (felice) di musica, architettura e filosofia. Si è quindi parlato di comfort e qualità acustica degli spazi per l'apprendimento con gli interventi degli architetti Simone Secchi e Lucia Busa, di convivenza acustica, ovvero di controllo e mitigazione delle immissioni come soluzione di buon vicinato con l'avvocato Santo Durelli e l'ingegnere Vincenzo Giuliano, con l'intervento sull'acustica dell'habitat felice di Giuseppe Salamone, ingegnere olistico, si è parlato delle sonorità positive nella progettazione del

benessere abitativo, con l'intervento su i suoni e i rumori del presente e del futuro a cura di Gaetano Licitra si è parlato di big data e di applicazioni dell'Intelligenza artificiale per la valutazione del rumore urbano. Si sono presentati i suoni positivi in città e in aperta campagna, le aree quiete, zone silenziose, tranquillity trails a cura di Francesco Borchì e si è parlato di automobili silenziose, considerando esperienze di sound design e sound enrichment, di auto elettriche e asfalti a bassa rumorosità con Chiara Bartalucci e Marco Di Giusto. L'ultima relazione scientifica, affidata a Roberta Righini ha trattato di paesaggi sonori storici e naturali di bioacustica, ecoacustica e identità sonora dei luoghi, ricordando l'amico e collega Gianni Pavan, che di questi temi è stato uno dei massimi esperti.

La giornata sui Beautiful Sounds ha compreso una tavola rotonda su come salvare i suoni del pianeta, una sessione sul progetto LIFE SNEAK dedicato alle azioni per la mitigazione in aree densamente popolate, alla riduzione delle emissioni di rumore delle tramvie e agli asfalti a bassa emissione per

la mitigazione del rumore nelle aree urbane e un corso di aggiornamento per i tecnici competenti in acustica sul tema del rumore intrusivo, quale importante competenza per il TCA esperto in acustica forense. Il corso, che ha visto docenze estremamente qualificate e alta partecipazione di tecnici competenti, ha trattato dell'attività del consulente tecnico d'ufficio e di parte chiamato a effettuare accertamenti e perizie su tematiche di inquinamento acustico, danno e disturbo provocati da esposizione al rumore, immissioni e loro tollerabilità, anche con riferimento alle problematiche di non conformità acustica e di isolamento degli edifici. Presentando esempi applicativi e casi studio, si è trattato dell'accertamento dell'entità del rumore intrusivo, in contesti giudiziari e stragiudiziali, e della tutela di chi subisce il disturbo acustico, temi trattati alla luce della legislazione e normativa vigente con riferimento alle recenti linee guida dell'Organizzazione Mondiale della Sanità e alla specifica tecnica UNI/TS 11844:2022 dedicata specificamente alla misurazione e all'analisi del rumore intrusivo.

# Resoconto del Symposium on the Acoustics of Poro-Elastic Materials. SAPEM2023

Elio Di Giulio<sup>a</sup> | Raffaele Dragonetti<sup>a\*</sup> | Marialuisa Napolitano<sup>a</sup> | Rosario Aniello Romano<sup>a</sup>

Dipartimento di Ingegneria Industriale,  
Università degli Studi di Napoli "Federico II",  
Piazzale Tecchio, 80, 80125 Napoli

\* Autore di riferimento:  
raffaele.dragonetti@unina.it

**Ricevuto:** 20/11/2023

**Accettato:** 1/12/2023

**DOI:** 10.3280/ria2-2023oa16987

**ISSNe:** 2385-2615

Si è tenuto dal 7 al 10 novembre 2023, presso il GRAND HOTEL EUROPA PALACE SORRENTO il 7° Convegno Internazionale "Symposium on the Acoustics of Poro-Elastic Materials. SAPEM2023". Il convegno è stato organizzato dall'azienda Matelys, patrocinato dall'AIA e con la collaborazione del Dipartimento di Ingegneria Industriale dell'Università di Napoli, Federico II e dell'International Institute of Acoustic Technology of the China Acoustic Valley. Nel presente articolo si propone un resoconto delle attività scientifiche e sociali che si sono tenute nei quattro giorni di Convegno.

**Parole chiave:** convegno internazionale, SAPEM, Poro-Elastic Materials

## **Report of the Symposium on the Acoustics of Poro-Elastic Materials. SAPEM2023**

From 7 to 10 November 2023, the 7th International Symposium on the Acoustics of Poro-Elastic Materials. SAPEM2023 – was held at the GRAND HOTEL EUROPA PALACE SORRENTO. The conference was organized by Matelys, sponsored by the AIA and with the collaboration of the Department of Industrial Engineering of the University of Naples, Federico II and the International Institute of Acoustic Technology of the China Acoustic Valley. This article offers an account of the scientific and social activities that took place during the four-day conference.

**Keywords:** international conference, SAPEM, Poro-Elastic Materials

## 1 | Introduzione

Dal 7 al 10 novembre 2023, presso il Grand Hotel Europa Palace Sorrento il 7° Convegno Internazionale Symposium on the Acoustics of Poro-Elastic Materials. SAPEM2023.

Il convegno è stato organizzato dall'azienda Matelys, patrocinato dall'AIA e con la collaborazione del Dipartimento di Ingegneria Industriale dell'Università di Napoli, Federico II e dell'International Institute of Acoustic Technology of the China Acoustic Valley.

È stato il primo convegno che si è tenuto contemporaneamente in Italia ed in Cina collegati in streaming mediante supporto audio-visivo che ha consentito la partecipazione di ricercatori ed esperti di tutto il mondo equamente divisi nelle due sedi in Sorrento (Italia) e 常熟 (Changshu, Cina).

È stato un convegno di grande successo, con un programma ricco di contenuti tecnico-scientifici (presentazioni, poster e corsi pomeridiani di approfondimento) e di momenti di socialità (visita ai laboratori del CeSMA (Napoli) e cena di gala in caratteristico ristorante ubicato in un tipico giardino sorrentino).

Nel presente articolo si propone un resoconto degli aspetti scientifici, sociali e organizzativi che hanno caratterizzato questa edizione del Convegno Internazionale SAPEM.

## 2 | Programma scientifico

Il Convegno ha preso inizio con una cerimonia di apertura in live streaming tra la sede italiana e quella cinese durante la quale sono intervenuti gli organizzatori del convegno: il prof. Raffaele Dragonetti, come rappresentante italiano, e il dr. Heavy Zhang fondatore della società PROSYNX Technology Inc, ProBiot Group Co., Ltd, come rappresentante cinese (Foto 1).



**Foto 1 – Apertura delle sessioni scientifiche in collegamento con la Cina**  
*Opening of the scientific sessions in connection with China*



Durante la cerimonia di apertura è stata commemorata la scomparsa del prof. David Linton Johnson, uno dei maggiori scienziati di fama internazionale che si è distinto nella caratterizzazione del suono all'interno di materiali porosi. Sua è la "J" nell'oramai famoso modello di Johnson-Champoux-Allard-Lafarge usato per la descrizione delle proprietà acustiche dei materiali porosi.

Le presentazioni dei lavori si sono articolate nelle quattro giornate del congresso secondo un programma ricco di interessanti contributi (Tabella 1). I relatori si sono alternati tra la sede italiana e cinese ed in entrambi le sedi, connesse in modalità live streaming, dando la possibilità ai presenti da entrambe le sedi di interagire con gli oratori (Foto 2). Era possibile assistere all'evento anche in modalità online, ciò ha permesso di coinvolgere anche ricercatori e professionisti di tutto il globo che, per ragioni diverse, non hanno potuto partecipare dal vivo alla conferenza. Le tematiche affrontate durante il congresso sono state la caratterizzazione dei materiali porosi naturali e sintetici, l'analisi di nuove tecnologie realizzative, l'analisi di materiali

**Tab. 1 – Elenco delle sessioni e delle keynote**  
**List of sessions and keynotes**

**TUESDAY, NOV. 7, 2023**

|             |             |             |                      |   |
|-------------|-------------|-------------|----------------------|---|
| 05:10→05:30 | 11:10→11:30 | 18:10→18:30 | Tapio Lokki et al.   | <b>IT</b> Sound Speed Variations in Close Proximity to Porous Absorbers |
| 05:30→05:50 | 11:30→11:50 | 18:30→18:50 | Melanie Nolan et al. | <b>IT</b> Acoustic characterization of anisotropic porous materials     |

**WEDNESDAY, NOV. 8, 2023**

|                                       |             |             |  |  |
|---------------------------------------|-------------|-------------|--|--|
| 09:00→15:30 China: morning activities |             |             |  |  |
| 02:30→03:10                           | 08:30→09:10 | 15:30→16:10 | Yutong Xue                                 | <b>CH</b> Multi-Functional Porous Materials: Characterization, Modeling and Potential in System-Level Noise Control                            |
| 03:10→03:30                           | 09:10→09:30 | 16:10→16:30 | Yutong Xue et al.                          | <b>CH</b> Acoustical Properties of Anisotropic Spinoid Structures  |
| 03:30→03:50                           | 09:30→09:50 | 16:30→16:50 | Elio Di Giulio et al.                      | <b>IT</b> Towards a control of acoustic energy conversion in structured porous materials   |
| 03:50→04:10                           | 09:50→10:10 | 16:50→17:10 | Theo Cavalieri et al.                      | <b>IT</b> Characterization of pressure-dependent sound absorption in perforated rigid-frame porous materials                                   |
| 04:10→04:30                           | 10:10→10:30 | 17:10→17:30 | Zenong Cai et al.                          | <b>IT</b> Experimental study on the effect of microgeometry of Kelvin-Cell-based porous structures on sound insulation performance             |
| 04:30→05:00 Coffee break              |             |             |  |  |
| 05:00→05:40                           | 11:00→11:40 | 18:00→18:40 | Rui Cao                                    | <b>CH</b> Recent advances in computational and statistical methods   |
| 05:40→06:00                           | 11:40→12:00 | 18:40→19:00 | Yinshan Cai et al.                         | <b>CH</b> Stable model order reduction of vibro-acoustic finite element models with poroelastic materials                                      |
| 06:00→06:20                           | 12:00→12:20 | 19:00→19:20 | Olivier Dazel et al.                       | <b>IT</b> A recursive method to evaluate the scattering properties of grating stacks   |
| 06:20→06:40                           | 12:20→12:40 | 19:20→19:40 | Cong Truc Nguyen et al.                    | <b>IT</b> Effect of Pore Size Polydispersity on Acoustic Properties of High-Porosity Solid Foams   |
| 06:40→07:00                           | 12:40→13:00 | 19:40→20:00 | María Mónica Ballesteros Villarreal et al. | <b>IT</b> Effects of anisotropic parameters on the acoustical behavior of porous materials with Biot's model through the finite element method |
| 07:00→07:20                           | 13:00→13:20 | 20:00→20:20 | Zhao Jing                                  | <b>CH</b> Study of finite-difference time-domain analysis on sound fields with porous materials  |

**Tab. 1 – segue**

**THURSDAY, NOV. 9, 2023**

|                                       |             |             |                            |   |
|---------------------------------------|-------------|-------------|----------------------------|---|
| 09:00→15:00 China: morning activities |             |             |                            |   |
| 02:00→02:40                           | 08:00→08:40 | 15:00→15:40 | Dengke Li                  | <b>CH</b> Application of Lightweight Acoustic Materials and Structures in Rail Vehicles   |
| 02:40→03:00                           | 08:40→09:00 | 15:40→16:00 | YuXiang Cheng et al.       | <b>CH</b> Analysis and optimization of sound absorption performance of porous materials with airflow resistivity gradient structure         |
| 03:00→03:20                           | 09:00→09:20 | 16:00→16:20 | Peter Goransson et al.     | <b>IT</b> Optimising low-frequency sound absorption in anisotropic multilayered poroelastic media using analytical microstructure modelling |
| 03:20→03:40                           | 09:20→09:40 | 16:20→16:40 | Jean-Philippe Groby et al. | <b>IT</b> Willis coupling in one-dimensional poroelastic laminates  |
| 03:40→04:10 Coffee break              |             |             |                            |   |
| 04:10→04:50                           | 10:10→10:50 | 17:10→17:50 | Philippe Glé               | <b>IT</b> Bio and geobased materials  |
| 04:50→05:10                           | 10:50→11:10 | 17:50→18:10 | Jacques Cuenca et al.      | <b>IT</b> Statistical characterisation of porous media from sound absorption and ultrasound transmission measurements                       |

**FRIDAY, NOV. 10, 2023**

|  |             |             |                                    |   |
|--|-------------|-------------|------------------------------------|---|
| 09:00→15:30 China: Open discussion about topics of next edition, collaboration opportunities, private meetings |             |             |                                    |   |
| 02:30→03:10  | 08:30→09:10 | 15:30→16:10 | Mathieu Gaborit & Tomasz Zielinski | <b>IT</b> 3D printing poroelastic media: features, artifacts and the bigger picture   |
| 03:10→03:30  | 09:10→09:30 | 16:10→16:30 | Huina Mao et al.                   | <b>IT</b> 3D Auxetic Lattice Metamaterials From Distorted Kelvin Cells  |
| 03:30→03:50  | 09:30→09:50 | 16:30→16:50 | Haesang Yang et al.                | <b>IT</b> Optimized configuration of multi-layered polyurethane foams in a dissipative silencer for broadband noise reduction         |
| 03:50→04:10  | 09:50→10:10 | 16:50→17:10 | Mathieu Maréchal et al.            | <b>IT</b> Dispersion relations of guided acoustic waves in poroelastic-based multilayer structures                                    |
| 04:10→04:30  | 10:10→10:30 | 17:10→17:30 | Gino Iannace et al.                | <b>IT</b> Experimental methods to evaluate the effective acoustic performance of screen made in metamaterials                         |
| 04:30→05:00 Coffee break   |             |             |                                    |   |
| 05:00→05:20  | 11:00→11:20 | 18:00→18:20 | Fulbert Mbaïllem et al.            | <b>IT</b> Aeroacoustic modelling of rotating propeller interaction with porous treatments using LBM simulations                       |
| 05:20→05:40  | 11:20→11:40 | 18:20→18:40 | Franck Sgard et al.                | <b>IT</b> Sound Absorption Coefficient of Extended-Reaction Poroelastic Materials under Monopole Excitation: A Cautionary Examination |
| 05:40→06:00  | 11:40→12:00 | 18:40→19:00 | Dmitri Kartofelev et al.           | <b>IT</b> On pulse propagation in porous visco-elastic felt-like material   |
| 06:00→06:20  | 12:00→12:20 | 19:00→19:20 | Maria Miranda Vuin et al.          | <b>IT</b> Strain wave propagation through felt  |
| 06:20→06:40  | 12:20→12:40 | 19:20→19:40 | Quang Vu Tran et al.               | <b>IT</b> Identification of microstructural descriptors characterizing the macro-behavior of polydisperse random fibrous media        |

**POSTERS**

|                              |  |
|------------------------------|--|
| Francesco Pompoli et al.     | <b>IT</b> Sustainable Materials of Marine Origin: Experimental Investigation on Sound-Absorbing Properties and Possible Applications |
| Janis Heldmann et al.        | <b>IT</b> Modelling of hierarchical pore structures in freeze-dried pectin cryogels  |
| François-Xavier Bécot et al. | <b>IT</b> Acoustic Porous Materials, a brief history, edit 2023  |
| Xinzhong Xiong et al.        | <b>CH</b> Experimental Investigation of a simple Meta-Structure's sound absorption installed in different impedance tubes            |



**Foto 2 – Interazione dei presentatori e degli uditori tra Italia e Cina**  
*Interaction of presenters and listeners between Italy and China*

multifunzionali e lo studio di nuovi concetti nella progettazione, nei metodi computazionali e nelle tecniche metrologiche.

La conferenza ha ospitato diverse keynote tenute da importanti relatori ed esperti del settore. In particolare, il giorno 7 novembre, in Cina si sono alternate due keynote tenute da Fabien Chevillotte, dal titolo “From the micro-structure to condensed meta-material models” e da Li Cheng, sempre in Cina, dal titolo “Micro-perforated Boundary Modulated Slow Waves for Sound Absorption in a Sonic Black Hole Structure”. Il giorno 8 novembre si sono alternate altre due interessantissime keynote tenute da Yutong Xue e da Rui Cao dai titoli rispettivamente “Multi-Functional Porous Materials: Characterization, Modeling and Potential in System-Level Noise Control” e “Recent advances in computational and statistical methods”. Il giorno 9 novembre la prima keynote si è tenuta in Cina da Dengke Li e dal titolo “Application of Lightweight Acoustic Materials and Structures in Rail Vehicles” mentre la seconda in Italia da Philippe Glé, dal titolo “Bio and geobased materials”. Nell’ultimo giorno, il 10 novembre, si è tenuto in Italia l’ultima interessante keynote da Mathieu Gaborit e da Tomasz Zielinski dal titolo “3D-printing poroelastic media: features, artifacts and the bigger picture”.

Durante il Convegno ha riscosso notevole successo la visita guidata presso i Laboratori del CeSMA ([www.cesma.unina.it](http://www.cesma.unina.it)), nonché la visita alla Apple Developer Academy (Foto 3).



**Foto 3 – Visita ai laboratori del CeSMA**  
*Visit to the CeSMA laboratories*

### 3 | Area espositiva e rassegne tecniche

Nell’atrio della Sede del Convegno è stata allestita un’area espositiva che ha accolto sponsor che operano nel settore dell’acustica ed un’area per la presentazione dei poster. Durante i momenti dedicati ai coffee break le aziende sponsor hanno potuto illustrare gli ultimi prodotti/applicazioni nel settore dell’acustica e delle vibrazioni.

### 4 | Corsi pomeridiani

Nel pomeriggio del 7 novembre le aziende:

- Z-Lab;
- Matelys.

hanno tenuto due seminari tematici, dove hanno illustrato le loro attività ed i loro prodotti. Durante questi seminari sono state approfondite e discusse le tematiche inerenti alla misurazione, alla prototipazione e alle tecniche numeriche per il controllo del rumore.

Nel pomeriggio del 8 novembre è intervenuta l’azienda Undabit. L’ing. Baiano Svizzero ha tenuto un altro interessante seminario sull’utilizzo di software open-source basati sulle tecniche agli elementi finti per applicazioni acustiche e vibroacustiche.

### 5 | Eventi sociali

Le quattro giornate di Convegno sono avvenute nello stupendo scenario della penisola Sorrentina. Nei salotti del lussuoso albergo Grand Hotel Europa Palace (<https://europapalace.com/>) i congressisti, prendendo spunto dagli interventi delle sessioni orali mattutine, hanno intrattenuto interessanti conversazioni e meeting di approfondimento nelle aree messe a disposizione per il congresso (Foto 4). Il giorno 9 novembre, presso il ristorante “o Parrucchiano” ([www.parrucchiano.com/](http://www.parrucchiano.com/)), all’interno di un agrumeto sorrentino, si è svolta la cena di gala dove hanno preso parte tutti i partecipanti del congresso.



**Foto 4 – Partecipanti al congresso presso la sede di Sorrento**  
*Participants in the conference at the Sorrento site*



# AIA Rivista Italiana di Acustica

*Semestrale di diffusione scientifica e tecnica*

## EDITORIALE/EDITORIAL

Tempo di bilanci, di ringraziamenti e di elezioni  
*Asdrubali*

## ARTICOLI SCIENTIFICI/SCIENTIFIC PAPERS

Sviluppo di una finestra metamateriale con ventilazione e attenuazione acustica ottimizzata

*Fusaro*

Metodi di deep learning acustico per il riconoscimento dei dissesti della pavimentazione stradale

*Monticelli*

Analisi sperimentali e numeriche di cristalli sonici utilizzati in barriere antirumore

*D'Orazio*

Indagine sull'ambiente sonoro in alcune aree alpine della Valle d'Aosta

*Brambilla et al.*

## NOTE TECNICHE/TECHNICAL NOTES

Galleria Commerciale dell'Aeroporto di Fiumicino: analisi acustica di un ambiente di grandi dimensioni

*Pulella et al.*

Riflessioni sul rumore intrusivo da sorgente specifica

*Brambilla*

Colour Enhanced Time/Pressure Envelope (CETPE), a novel on-screen rendering of digital sound

*Brizio*

## VITA DELL'ASSOCIAZIONE/LIFE OF THE ASSOCIATION

Resoconto del Seminario AIA "L'evoluzione del controllo delle vibrazioni: smart sensor networks & industry 4.0"

*Schiavi*

Resoconto del 49° Convegno Nazionale AIA

*Pompoli et al.*

Resoconto del X Convegno della European Acoustical Association, Forum Acusticum 2023

*Astolfi et al.*

Beautiful Sounds 2023. Suoni positivi per luoghi felici

*Luzzi*

Resoconto del Symposium on the Acoustics of Poro-Elastic Materials.

SAPEM2023

*Di Giulio et al.*



**FrancoAngeli**

La passione per le conoscenze

**Edizione fuori commercio**

R9504.2023.2