



Rivista
Italiana di
Acustica

Semestrale di diffusione scientifica e tecnica

v. 49, n. 2/2025
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, papatyad@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)

Zühere Sü Gül, zuhre.su@edu.edu.tr

(TED University, Turkey)

Kirill Horoshenkov, k.horoshenkov@sheffield.ac.uk

(University of Sheffield, United Kingdom)

Kristian Jambrošić, kristjan.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)

Costantino Carlo Mastino, mastino@unica.it

(Università di Cagliari, 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.rychтарикова@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 doppia 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

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



Semestrale di diffusione scientifica e tecnica

*v. 49, n. 2/2025
luglio-dicembre*

FrancoAngeli

ISSNe 2385-2615

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 © 2025 by FrancoAngeli Srl, Milano.

Pubblicato con licenza Creative Commons Attribuzione -
Non commerciale - Non opere derivate 4.0 Internazionale
(CC BY-NC-ND 4.0).

Sono riservati i diritti per Text and Data Mining (TDM),
AI training e tutte le tecnologie simili.

L'opera, comprese tutte le sue parti, è tutelata dalla legge
sul diritto d'autore.
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>.

Amministrazione - Distribuzione:
FrancoAngeli Srl, Viale Monza 106, 20127 Milano.
Tel. +39.02.2837141, e-mail: riviste@francoangeli.it.

v. 49, II semestre 2025

Finito di stampare nel mese di dicembre 2025

Indice

Editoriale/Editorial

7 **Prospettive future: verso materiali acustici più sostenibili?**

Louena Shtrepi, Francesco Pompoli

Contributi invitati/Invited contributions

9 **Materiali fonoassorbenti bio-based e a base di scarti**

Chiara Rubino, Stefania Liuzzi, Francesco Martellotta

21 **Development and acoustic optimisation of sustainable fibrous materials**

Andrea Santoni, Francesco Pompoli, Patrizio Fausti

Articoli scientifici/Scientific papers

37 **Enhancement of the acoustic design workflow through VR technology: the case study of conference room in a historical building**

Davide Cetani, Louena Shtrepi, Angela Guastamacchia, Arianna Astolfi

Note tecniche/Technical notes

45 **Protocollo sperimentale per la valutazione dell'intelligibilità del parlato nelle aule, dotate di impianto elettroacustico, del patrimonio edilizio dell'Università di Bologna**

Matteo Spinelli, Luca Barbaresi, Alessia Nora, Virginia Tardini

55 **Un'applicazione di design acustico all'interno di ambienti scolastici**

Francesco Asdrubali, Lucia Busa, Cristina Carrus, Sergio Luzzi, Paola Pulella

61 **Acoustic characterisation of the noise emitted by a padel court**

Edoardo Piana, Diego Tonetti, Jorge Garcia, Emanuela Milesi

Vita dell'associazione/Life of the association

69 **Resoconto del 51° Convegno Nazionale AIA**

Giovanni Brambilla, Andrea Tombolato

73 **Resoconto del Workshop Internazionale AIA “Classroom noise: a research update”**

Antonino Di Bella, Chiara Visentin

Progetti di ricerca in acustica/Acoustics research projects

- 77 **BRIC INAIL 2022 ID-11: Sviluppo e sperimentazione di prototipi avanzati di dispositivi per il controllo del rumore e delle vibrazioni a tutela della salute dei lavoratori**

Francesco Mori, Andrea Santoni, Patrizio Fausti, Francesco Pompoli, Paolo Bonfiglio, Francesco Marafini, Annalisa Fregolent, Lindoro del Duca, Nicola Stampone, Jacopo Brunetti, Walter d'Ambrogio, Michele Gabrio Antonelli, Christian Preti, Antonio Moschetto, Diego Annesi, Raffaele Mariconte, Pietro Nataletti

Prospettive future: verso materiali acustici più sostenibili?

Louena Shtrepi*, Francesco Pompoli**

Questo numero si apre con la sezione "Articoli Invitati" riguardante lo sviluppo di materiali sostenibili per l'acustica; il tema, di grande attualità, è stato trattato durante il Seminario AIA "Materiali innovativi nell'acustica: tra sostenibilità e innovazione", tenutosi il 30 gennaio 2025 all'Università di Bologna.

I due autori (e relativi gruppi di ricerca) che hanno aderito all'invito della Rivista presentano un articolo su "Materiali fonoassorbenti bio-based e a base di scarti" e su "Sviluppo e ottimizzazione acustica di materiali fibrosi sostenibili"; entrambi gli studi si basano sulla riduzione dell'impatto ambientale dei materiali acustici concentrandosi sull'impiego di materiali riciclati e di origine naturale: l'articolo di Chiara Rubino, Stefania Luzzi e Francesco Martellotta propone un'indagine sperimentale sulle proprietà acustiche fonoassorbenti di materiali compositi innovativi ottenuti da scarti e prodotti naturali utilizzando sia misure nel tubo ad impedenza che in campo diffuso, il contributo di Andrea Santoni, Francesco Pompoli e Patrizio Fausti presenta una metodologia completa per sviluppare e ottimizzare acusticamente i materiali fibrosi sostenibili, con diversi esempi applicativi riguardanti canapa, juta, posidonia e miscele di fibre riciclate.

Nella sezione "Articoli Scientifici" Davide Cetani, Louena Shtrepi, Angela Guastamacchia ed Arianna Astolfi indagano sull'uso della realtà virtuale a supporto della progettazione acustica; lo studio riporta un'indagine oggettiva e soggettiva che ha come obiettivo la validazione percettiva acustica e estetica/architettonica di una ricostruzione virtuale immersiva visiva e acustica della correzione acustica di una sala conferenza in un edificio storico. Gli autori hanno condotto test di intelligibilità del parlato nell'Audio Space Lab del Politecnico di Torino, dotato di sistema Ambisonics e Oculus Meta Quest 2.

Nella sezione "Note Tecniche" sono presenti tre interessanti contributi di cui due affrontano il tema della progettazione acustica degli spazi e il raggiungimento dei valori ottimali: Francesco Asdrubali, Lucia Busa, Cristina Carrus, Sergio Luzzi, e Paola Pulella, presentano uno studio all'interno di ambienti scolastici dove l'esposizione al rumore può incidere sull'apprendimento e sulle capacità di ascolto e concentrazione da parte degli studenti; la nota tecnica riporta i risultati dell'analisi acustica condotta in un'aula scolastica prima e dopo un intervento di riqualificazione acustica con l'obiettivo di ottimizzare i parametri acustici oggettivi rie-

trando nell'intervallo di conformità riportato nella norma UNI 11532-2. In alternativa alle soluzioni passive, Matteo Spinelli, Luca Barbaresi, Alessia Nora, e Virginia Tardini evidenziano le potenzialità dei sistemi attivi come strategia di miglioramento dell'intelligibilità del parlato; gli autori presentano un protocollo sperimentale per la valutazione dell'intelligibilità del parlato nelle aule dotate di impianto elettroacustico. Tale protocollo, sviluppato sulla base di misurazioni svolte in diciassette aule dell'Università di Bologna, risulta un utile strumento per la valutazione di grandi plessi didattici, in un'ottica di programmazione degli interventi di ammodernamento degli impianti elettroacustici.

L'ultima nota tecnica, di Edoardo Piana, Diego Tonetti, Jorge Garcia, e Emanuela Milesi, presenta un tema di attualità vista la recente grande diffusione dello sport del padel: la caratterizzazione acustica del rumore emesso da un campo per questa attività; gli autori evidenziano come la letteratura scientifica riguardante i dati di potenza sonora da associare al rumore emesso da campi da padel sia limitata, e forniscono dati di potenza sonora basati su misurazioni sperimentali, arricchiti da considerazioni sulle strategie di mitigazione acustica applicabili alle sorgenti sonore, rese possibile dall'uso della tecnica ambisonics.

Per quanto riguarda la "Vita dell'Associazione" il numero contiene il resoconto del 51° Convegno Nazionale dell'Associazione Italiana di Acustica (AIA), che si è svolto dal 4 al 6 giugno 2025 a Treviso, descrivendo le attività scientifiche e sociali che si sono tenute nei tre giorni del Convegno.

Il secondo resoconto riporta le attività del Workshop Internazionale dal titolo "Classroom noise: a research update", tenutosi il 12 Settembre a Padova presso l'Archivio Antico di Palazzo Bo, sede dell'Università degli Studi di Padova. Il workshop è stato organizzato dall'Associazione Italiana di Acustica (AIA), in collaborazione con l'Università degli Studi di Padova, l'Università di Ferrara e l'Università Iuav di Venezia.

Il numero si chiude con un contributo alla sezione "Progetti di Ricerca": il resoconto finale su un progetto di collaborazione di tipo BRiC INAIL 2022 ID-11 dal titolo "Sviluppo e sperimentazione di prototipi avanzati di dispositivi per il controllo del rumore e delle vibrazioni a tutela della salute dei lavoratori". Il progetto ha avuto come obiettivo quello di sviluppare e sperimentare, in laboratorio e in campo, nuove tecnologie per ridurre l'esposizione al rumore e alle vibrazioni di operatori alla guida dei mezzi agricoli e in contesti industriali.

Il comitato di Redazione della Rivista Italiana di Acustica coglie l'occasione per augurare a tutti i lettori Auguri di Buon Natale e Buone Feste, augurando un 2026 ricco di stimolanti progetti i cui risultati andranno pubblicati sulla nostra Rivista!

* Vice-responsabile di Redazione della Rivista Italiana di Acustica

** Responsabile di Redazione della Rivista Italiana di Acustica

DOI: 10.3280/ria2-2025oa21455

Materiali fonoassorbenti bio-based e a base di scarti*

Chiara Rubino^{a*} | Stefania Liuzzi^a | Francesco Martellotta^a

^a Dipartimento di Architettura,
Costruzione e Design, Politecnico di Bari,
Via Orabona, 4, 70125 Bari

* Autore di riferimento:
chiara.rubino@poliba.it

Ricevuto: 14/5/2025

Accettato: 18/6/2025

On line first: 26/9/2025

DOI: 10.3280/riaof-2025oa20130

ISSN: 2385-2615

Per contenere l'impatto ambientale derivante dall'uso di risorse non rinnovabili, cresce l'interesse nella ricerca di materie prime alternative per la produzione di pannelli fonoassorbenti sostenibili. In questo ambito, le direttive europee promuovono soluzioni costruttive innovative finalizzate sia alla riduzione dell'impatto ambientale, sia al miglioramento dell'efficienza degli edifici, nuovi ed esistenti. In linea con i principi dell'economia circolare, il presente studio propone un'indagine sperimentale sulle proprietà acustiche, espresse in termini di coefficienti di assorbimento ad incidenza normale e in campo diffuso, di materiali compositi innovativi ottenuti da scarti e prodotti naturali. I risultati mostrano buone performance fonoassorbenti per tutti i campioni testati, con variazioni correlate alle proprietà microstrutturali, come porosità e resistenza al flusso.

Parole chiave: fonoassorbimento, scarti, leganti naturali, sostenibilità

Bio-based and waste-based sound absorbing materials

To reduce the environmental impact associated with the use of non-renewable resources, increasing attention is being paid to alternative raw materials for the production of sustainable sound-absorbing panels. In this context, European directives promote innovative construction solutions aimed not only at minimizing environmental impact but also at improving the efficiency of both new and existing buildings. Aligned with circular economy principles, this study presents an experimental investigation on the acoustic performance expressed in terms of sound absorption coefficients under normal incidence and in diffuse field of innovative composite materials produced from natural products and waste. The results show good sound absorption performance for all tested samples, with variations linked to microstructural properties such as porosity or air low resistivity.

Keywords: sound absorption, waste, natural binders, sustainability

1 | Introduzione

I materiali più comunemente impiegati nel settore edilizio per il controllo acustico sono principalmente composti di origine inorganica e sintetica quali lana di vetro, lana di roccia e polistirene. Sebbene tali materiali garantiscano elevate prestazioni in termini di coefficienti di assorbimento acustico, essi sono associati a significativi impatti ambientali in termini di elevata energia grigia durante la fase di produzione e di difficoltà di riciclo a fine vita [1]. Inoltre, a causa della ridotta durabilità, le fibre potrebbero diventare inalabili, rappresentando un potenziale rischio per la salute umana in caso di esposizione prolungata [2]. In questo contesto, una delle principali sfide nella progettazione degli edifici di nuova generazione è la riduzione del fabbisogno energetico, assicurando al contempo comfort termoacustico indoor mediante l'impiego di componenti in grado di garantire sostenibilità ambientale e salubrità degli ambienti. La necessità di adottare materiali compositi

non tossici, riciclabili ed ecocompatibili sta, quindi, orientando la ricerca verso l'utilizzo di fibre naturali, di origine vegetale o animale, e di materiali da scarto come valide alternative alle fibre minerali e sintetiche. Non solo la selezione della matrice, ma anche quella del legante richiede un'attenta valutazione, poiché l'accoppiamento di una matrice sostenibile con un legante non ecocompatibile può compromettere l'intero bilancio ambientale del materiale, annullando la possibilità di riciclare il composito a fine vita e vanificando così gli sforzi in termini di sostenibilità. La Valutazione del Ciclo di Vita (LCA, Life Cycle Assessment) è riconosciuta come una metodologia standardizzata [3, 4] per quantificare in modo oggettivo gli impatti ambientali associati a prodotti e processi lungo l'intero ciclo di vita, dalla fase di approvvigionamento delle materie prime fino allo smaltimento finale. Nel caso dei materiali bio-based, l'LCA rappresenta uno strumento essenziale per supportare lo sviluppo sostenibile e l'adozione di strategie di economia circolare [5]. I risultati dell'analisi LCA costituiscono, inoltre, la base tecnica per la redazione delle Dichiarazioni Ambientali di Prodotto (EPD, Environmental Product Declarations), strumenti di comunicazione trasparente e verificata che permettono il confronto tra prodotti simili in termini di prestazioni ambientali [6], secondo standard internazionali [7].

* Articolo invitato a seguito della presentazione orale al Simposio internazionale AIA "Materiali innovativi in acustica: tra sostenibilità e tecnologia" tenutosi a Bologna il 30 gennaio 2025.

Alla luce delle considerazioni esposte, il presente articolo si propone di sintetizzare i risultati più rilevanti delle ricerche condotte dagli autori sull'impiego di materiali fonoassorbenti innovativi. Tali materiali sono composti, con matrici di natura granulare (come scarti di potatura dell'olivo) o fibrosa (come la paglia), ottenute da scarti industriali (come gli scarti tessili), o da residui vegetali (come gli scarti della mandorla). Il legante impiegato è, nella maggior parte dei casi, ecocompatibile; nei casi in cui non è stato possibile rispettare pienamente il criterio di sostenibilità nella scelta del legante, la miscela è stata progettata in modo da ridurne al minimo la quantità, garantendo comunque benefici nella fase di produzione del materiale finale. Ad esempio, nei casi in cui è stata utilizzata una fibra sintetica come legante, la scelta è ricaduta su una fibra in grado di abbassare significativamente la temperatura richiesta durante il processo produttivo. Pertanto, dopo due sezioni introduttive, una dedicata alla descrizione dei diversi materiali oggetto di studio, delle loro peculiarità e dei relativi processi produttivi, e l'altra finalizzata a fornire una breve analisi dei parametri e delle proprietà esaminate, vengono presentati i risultati sperimentali in termini di coefficienti di assorbimento acustico ad incidenza normale e casuale. L'analisi è accompagnata dalla valutazione dei parametri non acustici, misurati o stimati mediante modelli teorici.

L'articolo riassume i risultati di ricerche scientifiche già pubblicate e si configura come supporto scritto ai contenuti presentati durante il Simposio internazionale AIA, tenutosi a Bologna il 30 gennaio 2025. Infatti, l'obiettivo dell'articolo è documentare e valorizzare le attività svolte durante il Simposio, pertanto parte dei contenuti del paper sono già stati pubblicati in altra sede.

2 | Materiali

2.1 | Scarti tessili

Gli scarti tessili, derivanti dalla produzione e dal fine vita dei capi, rappresentano una criticità ambientale crescente; il loro reimpegno come materia prima per la realizzazione di materiali fonoassorbenti consente di valorizzare le proprietà acustiche intrinseche delle fibre tessili, promuovendo al contempo pratiche sostenibili e circolari nel settore tessile/moda e in quello dell'edilizia. Questo approccio si inserisce in continuità con quanto evidenziato da Del Rey et al. [8], che hanno dimostrato l'efficacia della lana di pecora, materiale tessile naturale e rinnovabile, come valida alternativa ai materiali fonoassorbenti convenzionali, grazie alle sue elevate prestazioni acustiche e al ridotto impatto ambientale. I materiali a base di scarti tessili sono stati realizzati mediante due diverse tecnologie: l'incollaggio chimico e il processo di termofusione.

Nel primo caso, il processo produttivo è stato condotto in laboratorio e ha previsto fasi di selezione, preparazione e miscelazione degli scarti tessili, seguite da formatura ed essiccamiento. Dapprima gli scampoli di scarto sono stati ridotti alle dimensioni adeguate a poter essere cardati e trasformati in fibre. Dopo l'immersione nella soluzione legante selezionata, le

fibre sono state sottoposte a un processo di strizzatura meccanica per eliminare l'eccesso di liquido. Tale operazione è stata necessaria per evitare che un eccesso di legante, una volta solidificato, potesse compromettere l'omogeneità della porosità nel campione finale, favorendo, ad esempio, la formazione di croste superficiali. La miscela così ottenuta è stata quindi compressa in stampi di PVC per formare campioni cilindrici, successivamente essiccati in stufa a 105 °C. Le fibre sono state legate impiegando soluzioni a base di chitosano (CH) e gomma arabica (GA), ottenendo i campioni successivamente denominati CH-n e GA-n, dove n sta ad indicare la densità del singolo provino (Fig. 1-a) [9]. Sono stati realizzati provini con densità apparente compresa tra 80 e 197 kg/m³ e spessore di 50 mm.

Per quanto riguarda i materiali ottenuti tramite termofusione, la produzione su scala di laboratorio [10] è stata successivamente ottimizzata per un'applicazione industriale [11]. In entrambi i casi, è stata impiegata una fibra legante bicomponente costituita da un nucleo in poliestere e da un rivestimento esterno in copoliestere, con punto di fusione a 100 °C. Il rivestimento si ammorbidisce durante la fase di riscaldamento, fungendo da agente legante, mentre il nucleo in poliestere, grazie al suo punto di fusione più elevato (270 °C), preserva la forma e conferisce integrità meccanica al materiale finale. I provini a scala di laboratorio sono stati realizzati cardando proporzioni definite di fibre tessili e fibra legante (quest'ultima in modo da risultare il 20% del peso totale del provino), in modo da ottenere una miscela uniforme che è stata predisposta in appositi stampi e compressa e riscaldata tramite una piastra idraulica, controllando l'abbassamento della piastra superiore fino ad un'altezza prestabilita di 50 mm. Sono stati realizzati cinque tipi di provini (successivamente indicati come BICO-n) con densità apparente compresa tra 51 e 167 kg/m³ e spessore di 50 mm.

Grazie alla collaborazione con un'azienda toscana, è stato possibile realizzare l'up-scaling industriale di alcune miscele testate in laboratorio. Utilizzando la tecnologia air-laying, le fibre di scarto cardate sono state trasformate in un materassino omogeneo e consolidato per termofusione a 100 °C, impiegando il 15% in peso di fibra bicomponente come legante. La riduzione della percentuale di legante rispetto ai campioni da laboratorio è dovuta alla composizione mista degli scarti utilizzati a livello industriale, rispetto alla sola lana impiegata in precedenza. La Fig. 1-b mostra i campioni ottenuti (con densità compresa tra 68 e 134 kg/m³ e spessore variabile compreso tra 25 e 50 mm), denominati TW-n.

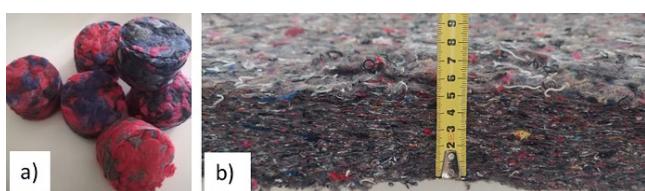


Fig. 1 – Materiali a base di scarti tessili ottenuti con la tecnica ad incollaggio chimico a), e con il processo air-laying b)
Textile waste materials obtained following the chemical binding method a), and the air-laying technique b)

2.2 | Scarti della mandorla

La realizzazione di materiali a base di scarti di mandorla ha previsto l'utilizzo della pellicina, il sottile strato a diretto contatto con il frutto [12]. Dopo la sbucciatura delle mandorle in acqua ad alta temperatura, la pellicina viene raccolta e accumulata in serbatoi esterni rappresentando il principale scarto di lavorazione delle aziende che producono prodotti a base di mandorle pelate. Pertanto, prima di essere impiegato come materia prima per materiali innovativi, lo scarto è stato essiccato in stufa a 50°C, fino al raggiungimento di una massa costante ($\pm 0,5\%$). Gli aggregati vegetali raffreddati a temperatura ambiente sono stati, quindi, legati tra loro impiegando due diverse soluzioni di legante chimico. Il primo provino, denominato GA (235 kg/m³ e spessore 50 mm) e mostrato in Fig. 2-a, ha previsto l'utilizzo dei residui di mandorla "tal quali", mescolati con una soluzione acquosa di gomma arabica (GA). Le dimensioni medie degli aggregati erano di 10 mm di larghezza, 20 mm di lunghezza e 0,5 mm di spessore. Il secondo provino, denominato PVA (373 kg/m³ e spessore 50 mm) e mostrato in Fig. 2-b, ha comportato l'inclusione di bucce di mandorla macinate e trasformate in fibre di dimensione media 3 mm \times 3 mm e spessore di 0,2 mm, legate con una soluzione acquosa di alcol polivinilico (PVA). La scelta di impiegare gli aggregati in dimensioni diverse è conseguenza della conservatezza, ampiamente dimostrata in letteratura [13], dell'influenza del mix design sul comportamento fonoassorbente dei materiali. Le due miscele testate sono il risultato di numerosi tentativi condotti in laboratorio al fine di valutare il miglior rapporto legante/aggregato vegetale in grado di garantire una porosità adeguata alla struttura del materiale. Pertanto, le due miscele sono state realizzate rispettando un rapporto legante/aggregato che assume un valore pari a 0.30 nella miscela GA e 0.62 nella miscela PVA.

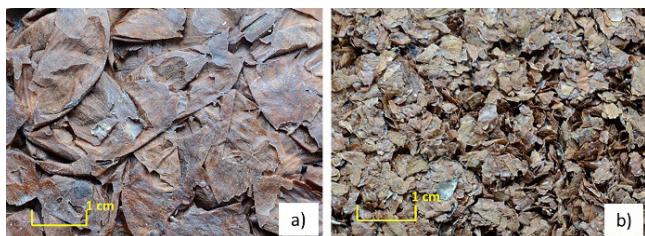


Fig. 2 – Materiali a base di scarti di mandorla impiegati "tal quali" e legati con una soluzione a base di gomma arabica (GA a), o ridotti in dimensioni più piccole e legati con una soluzione a base di alcol polivinilico (PVA) b)

Almond waste materials with almond skin used "as is," mixed with a gum arabic water solution (GA a), or with grounded almond skin bonded with a polyvinyl acetate water solution (PVA) b)

2.3 | Paglia

Nonostante la paglia di orzo sia un residuo agricolo ampiamente riutilizzato in agricoltura come lettiera per gli animali o ammendante per il suolo e impiegato con successo come bio-

massa per la produzione di energia rinnovabile, si è cercato di dare un valore aggiunto immaginando di impiegarlo come materiale fibroso nel settore dell'edilizia [14]. La canapa [15], così come altre varietà di fibre vegetali [16], sono state oggetto di crescente interesse. Tutte queste tipologie di fibre naturali, grazie alla loro struttura porosa e alla capacità di assorbire il suono, si prestano all'utilizzo in pannelli fonoassorbenti o isolanti termici, offrendo un'alternativa ecocompatibile ai materiali convenzionali. In questo contesto, dopo aver essiccato le fibre di paglia in stufa a 50°C, fino al raggiungimento di una massa costante ($\pm 0,5\%$), queste sono state legate tra loro impiegando una soluzione di silicato di sodio in quantità pari al 30% del peso totale del provino (Fig. 3). Sono stati ottenuti due provini SF-25 e SF-50 con densità apparente di 152 kg/m³ e spessore di 25 e 50 mm.



**Fig. 3 – Materiali a base di paglia di orzo e silicato di sodio
Straw based materials obtained using sodium silicate solution as binder**

2.4 | Scarti di potatura dell'olivo

Studi recenti [17, 18] confermano il potenziale dei residui vegetali agricoli per la realizzazione di isolanti termici e materiali fonoassorbenti innovativi. Le foglie di olivo, così come gli aggregati precedentemente analizzati, se opportunamente combinate con leganti naturali, possono rappresentare una soluzione efficace nel campo dell'edilizia [19]. Tutti i provini testati sono stati confezionati dopo aver essiccato le foglie di olivo in stufa a 50°C, fino al raggiungimento di una massa costante ($\pm 0,5\%$). In un primo momento lo scarto è stato testato "tal quale", senza l'aggiunta di leganti chimici, ma considerando tre diverse lunghezze dello scarto che hanno dato vita a tre campioni differenti: SOO_G1 con lunghezza media delle foglie intorno ai 40 mm, SOO_G2 con lunghezza media delle foglie intorno ai 15 mm e SOO_G3 ottenuto tritando le foglie fino a raggiungere una lunghezza intorno a 5 mm o anche meno (Fig. 4-a). In un secondo momento, lo scarto vegetale impiegato per ottenere le matrici G1, G2 e G3, è stato legato impiegando una soluzione legante a base di chitosano, ottenendo i campioni SO1_G1, SO1_G2 ed SO1_G3 (Fig. 4-b). Infine, le frazioni di scarto sono state combinate tra loro ottenendo i campioni S02 (50% G1 + 30% G2 + 20% G3) ed S03 (50% G1 + 30% G2

+ 20% G3 con applicazione di una pressione di 3kPa durante la produzione del provino, fino a maturazione completa). Il campione S04 è stato invece ottenuto usando la calce come legante e le foglie di lunghezza media di 40 mm (G1) come matrice. Tutti i provini hanno uno spessore di 50 mm.



Fig. 4 – Esempi di scarti di olivo impiegati come matrice a); campioni con scarti legati con una soluzione a base di chitosano b)

Example of olive pruning waste used as matrix a), samples with waste bonded with a chitosan solution b)

2.5 | Scarti della carta

La letteratura scientifica evidenzia la possibilità di utilizzare la cellulosa nel settore edilizio per la produzione di pannelli con proprietà fonoassorbenti [20]. A tal fine, è stata sviluppata una matrice composita a base di polpa di carta, legata con colla vinilica e integrata con tre differenti aggregati leggeri: fondi di caffè esausti (ottenendo la miscela CG 318 kg/m³), segatura (ottenendo la miscela SP di 200 kg/m³) e paglia di favino (ottenendo la miscela FB di 348 kg/m³) (Fig. 5) [21]. Gli scarti cartacei sono stati idratati per 24 ore a temperatura ambiente per favorire la disgregazione della matrice fibrosa. Gli aggregati leggeri sono stati essiccati a 90 °C fino a massa costante ($\pm 0,5\%$). La miscela è stata omogeneizzata meccanicamente e successivamente disidratata tramite strizzatura e sgocciolamento per 15 minuti. Dopo la miscelazione del composto, il materiale è stato versato in stampi con spessore di 40 mm, successivamente essiccati in stufa a 90° C. Le percentuali degli aggregati impiegate nelle miscele sono state ottimizzate in laboratorio, con l'obiettivo di bilanciare tre parametri quali la lavorabilità dell'impasto, la compattezza del prodotto finale e la sua porosità.

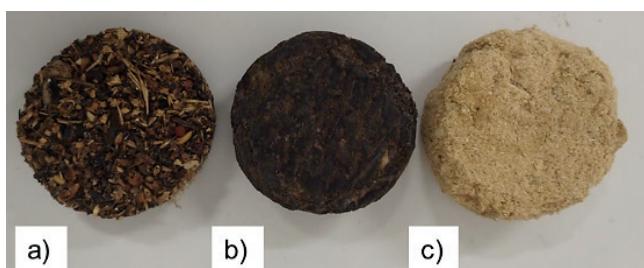


Fig. 5 – Materiali a base di polpa di carta con paglia di favino a), fondi di caffè b) e segatura c)

Paper waste with fava bean residues a), coffee grains b) and sawdust powder c)

Al fine di sintetizzare le tipologie di materiali analizzati e i relativi risultati in termini di assorbimento acustico, in Tab. 1 sono elencati i campioni testati, suddivisi per tipologia. Per ciascun

provino sono riportati: il codice identificativo *ID*, le fibre o gli scarti utilizzati, il tipo di legante impiegato e lo spessore *s*.

Tab. 1 – Riassunto dei campioni testati
Summary of tested samples

<i>ID</i>	Scarto base	Legante	<i>s</i> [mm]
CH-n	Fibre tessili	Chitosano	50
GA-n	Fibre tessili	Gomma Arabica	50
BICO-n	Fibre tessili	Fibra bicomponente termofusione	50
TW-n	Fibre tessili	Fibra bicomponente air-laying	25-40
GA	Mandorla tal quale	Gomma Arabica	50
PVA	Mandorla sminuzzat	Alcol polivinilico	50
SF_25	Paglia di orzo	Silicato di sodio	25
SF_50	Paglia di orzo	Silicato di sodio	50
S00_G1	Foglie olivo, 40 mm	–	50
S00_G2	Foglie olivo, 15 mm	–	50
S00_G3	Foglie olivo, 5 mm	–	50
S01_G1	Foglie olivo, 40 mm	Chitosano	50
S01_G2	Foglie olivo, 15 mm	Chitosano	50
S01_G3	Foglie olivo, 5 mm	Chitosano	50
S02	Foglie olivo, dimensioni miste	Chitosano	50
S03	Foglie olivo, dimensioni miste	Chitosano	50
S04	Foglie olivo, 40 mm	Calce	50
CG	Carta e caffè	Colla vinilica	40
SP	Carta e segatura	Colla vinilica	40
FB	Carta e paglia	Colla vinilica	40

3 | Metodi

3.1 | Proprietà acustiche

Il coefficiente di assorbimento acustico ad incidenza normale è stato determinato in accordo alla procedura di misura prevista dalla norma ISO 10534-2 [22]. Un rumore a banda larga è generato da un altoparlante (20 W) posto all'estremità del tubo ad impedenza BSWA SW 260; mentre all'estremità opposta è presente una terminazione rigida su cui è alloggiato il materiale in prova. Il tubo include due configurazioni diverse che prevedono un diametro di 60 e 30 mm, coprendo la gamma di alte frequenze da 100 Hz a 6.3 kHz. Per ogni materiale sono stati testati tre campioni e i risultati sono analizzati in termini di curva di assorbimento acustico ottenuta come media delle tre misure.

3.2 | Proprietà non acustiche

Le principali proprietà non acustiche che rivestono un ruolo fondamentale nella modellazione della propagazione dell'onda sonora nei materiali e che saranno, pertanto, analizzate per i materiali oggetto di studio sono la porosità ε , la resistività al

flusso d'aria σ e la tortuosità τ . Ciascuno di questi parametri è stato sia misurato sperimentalmente in laboratorio, sia stimato mediante un algoritmo di ottimizzazione basato sul modello teorico più adeguato al comportamento del materiale analizzato. L'analisi delle curve di assorbimento acustico farà tuttavia riferimento ai parametri stimati e, ove non disponibile una stima attendibile, a quelli direttamente misurati.

3.2.1 | Misure sperimentali

La misura sperimentale della porosità aperta dei materiali ha richiesto la misura del volume reale occupato dal campione di prova, all'interno del picnometro ad elio ULTRAPYC 1200-e Quantachrome, attraverso l'applicazione del principio dello spostamento di gas come l'elio. La resistenza al flusso d'aria è stata misurata in accordo alla ISO 9053:2018 [23], generando un flusso continuo attraverso il campione e rilevando la caduta di pressione. Infine, la tortuosità è stata ottenuta utilizzando la resistenza elettrica del materiale come parametro indicativo della sua capacità di condurre la corrente, e quindi della lunghezza e sinuosità dei canali che lo caratterizzano. Pertanto, la misura della tortuosità implica la necessità di rendere conduttivo il materiale, immergendolo in una soluzione elettrolitica (soluzione acquosa di solfato di rame). Questa operazione è spesso in contrasto con la morfologia del materiale, con la natura solubile dei leganti impiegati e con la struttura chimica degli scarti impiegati come materia prima. Pertanto, nella maggior parte dei casi, la tortuosità è stata solo ottenuta tramite applicazione di un modello matematico, come sarà meglio spiegato nel paragrafo successivo.

3.2.2 | Modelli previsionali

I coefficienti di assorbimento acustico misurati sono stati confrontati con quelli previsti dal modello teorico sviluppato da Johnson, Champoux e Allard (JCA) [24, 25] e con la versione integrata da Lafarge (JCAL) [26]. Il modello JCA esprime l'impenedenza caratteristica e il numero d'onda in funzione della densità effettiva ρ_e (Eq. (1)) e del modulo di densità dinamica K_e (Eq. (2)), a loro volta funzione di numerosi parametri fisici in ingresso quali la densità ρ , la porosità ϵ , la tortuosità τ , le lunghezze caratteristiche viscosa λ e termica λ' , e la resistività al flusso σ :

$$\rho_e = \frac{\tau\rho}{\epsilon} \left[1 + \frac{\sigma\epsilon}{jw\rho\tau} \sqrt{1 + j \frac{4\tau^2\eta\rho w}{\sigma^2\lambda^2\epsilon^2}} \right] \quad (1)$$

$$K_e = \frac{\gamma P_0 / \epsilon}{\gamma - (\gamma - 1) \left[1 - j \frac{8k}{\lambda'^2 c_p \rho w} \sqrt{1 + j \frac{\lambda'^2 c_p \rho w}{16k}} \right]} \quad (2)$$

Questo modello è stato successivamente incrementato da Lafarge che, al fine di considerare gli effetti termici alle basse frequenze, ha introdotto un ulteriore termine definito permeabilità termica statica k'_0 (Eq. (3)):

$$K_e = \frac{\gamma P_0 / \epsilon}{\gamma - (\gamma - 1) \left[1 - j \frac{\epsilon k}{k'_0 c_p \rho w} \sqrt{1 + j \frac{4k'_0 c_p \rho w}{k\lambda'^2 \epsilon^2}} \right]} \quad (3)$$

Una trattazione più approfondita del significato fisico di tali parametri esula dallo scopo del presente articolo; pertanto, si rimanda il lettore ai lavori originali [25, 26] o a testi di riferimento [27]. Poiché non è stato possibile misurare direttamente tutti i parametri richiesti dai modelli, è stato utilizzato un metodo inverso [28] per stimare quelli mancanti. Sfruttando i coefficienti di assorbimento misurati, i valori delle proprietà fisiche mancanti, insieme a quelli misurati direttamente, sono stati determinati tramite un algoritmo in grado di individuare il set di parametri che permettesse la migliore corrispondenza tra i dati sperimentali e le previsioni teoriche.

4 | Risultati

4.1 | Scarti tessili

In Tab. 2 sono riportati i valori delle proprietà non acustiche misurate e stimate per i materiali a base di scarti tessili realizzati a scala di laboratorio. I parametri ottenuti con l'algoritmo di ottimizzazione, sulla base del modello teorico JCA sono affiancati da un asterisco.

Tab. 2 – Riassunto dei parametri non acustici misurati o derivati indirettamente dall'applicazione del modello JCA (asteriscati)

Summary of non-acoustical parameters measured or indirectly derived from the application of the JCA (with a star model)

ID	ρ kg/m ³	ϵ –	σ kN·s/m ⁴	τ –
CH-1	197	0.86	66.3	1.08*
CH-2	145	0.89	46.0	1.06*
CH-3	122	0.91	16.5	1.05*
CH-4	80	0.94	11.7	1.03*
GA-1	177	0.87	44.7	1.08*
GA-2	143	0.90	23.6	1.06*
GA-3	93	0.93	14.4	1.04*
BICO-1	167	0.88	86.0*	2.55
BICO-2	136	0.90	54.1*	1.82
BICO-3	115	0.91	48.6*	2.16
BICO-4	90	0.93	33.2*	1.09
BICO-5	51	0.95	23.4*	1.32

Al fine di valutare l'influenza dei processi di fabbricazione sul comportamento fonoassorbente dei diversi campioni, le curve di assorbimento sono analizzate confrontando materiali con simile resistenza al flusso, indipendentemente dalla tecnologia produttiva impiegata. Nella Fig. 6, sono confrontati i campioni BICO-2 e CH-1 che, nonostante una differenza del 31% nella densità apparente, presentano valori di resistenza al flusso d'aria simili, con una differenza del 15%. Come si osser-

va in Tab. 2, questo comportamento è attribuibile alla maggiore tortuosità del materiale BICO-2 che genera percorsi dell'aria più complessi, compensando così la differenza di densità apparente e restituendo valori di resistenza al flusso comparabili.

Nella Fig. 7, il campione BICO-3 è confrontato con i campioni CH-2 e GA-1. Il campione BICO-3, pur avendo una densità apparente inferiore del 21% rispetto a CH-2, presenta una resistenza al flusso solo leggermente inferiore (circa 5%), grazie a una maggiore tortuosità (Tab. 2) che ne incrementa la permeabilità e consente prestazioni di assorbimento acustico comparabili. Considerazioni analoghe valgono per il confronto con il campione GA-1. Tuttavia, il campione BICO-3 ha mostrato un valore di resistenza al flusso d'aria circa l'8% superiore rispetto al campione GA-1, pur con una densità apparente inferiore del 35%.

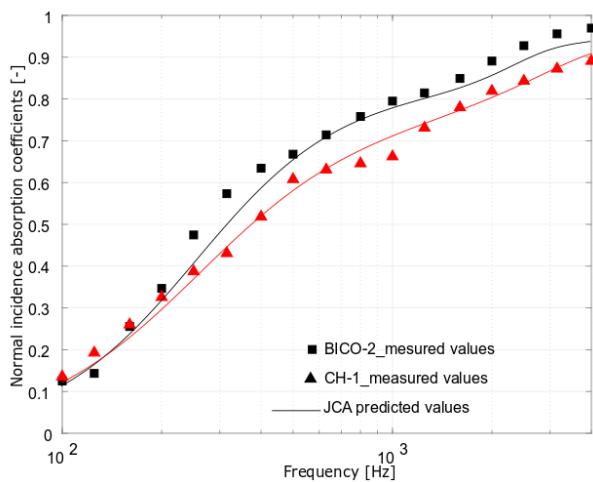


Fig. 6 – Confronto tra i coefficienti di assorbimento acustico ad incidenza normale misurati e stimati per i campioni BICO-2 e CH-1 (spessore 40 mm)

Comparison between normal incidence sound absorption coefficients measured and predicted for BICO-2 and CH-1 samples (thicknesses of 40 mm)

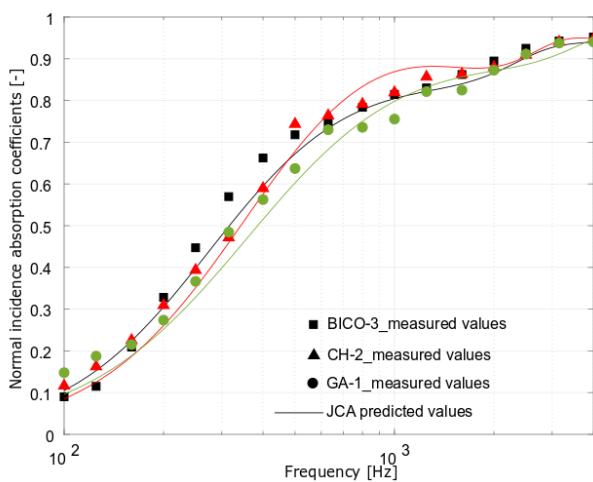


Fig. 7 – Confronto tra i coefficienti di assorbimento acustico ad incidenza normale misurati e stimati per i campioni BICO-3, CH-2 e GA-1 (spessore 40 mm)

Comparison between normal incidence sound absorption coefficients measured and predicted for BICO-3, CH-2 and GA-1 samples (thicknesses of 40 mm)

La Fig. 8 riporta le curve di assorbimento acustico misurate per i campioni BICO-5 e GA-2 che, con resistenze al flusso quasi identiche (differenza del 2%), ma densità apparente che differiscono del 64%, mostrano curve di assorbimento acustico sovrapponibili fino a 630 Hz. A 1.25 kHz, BICO-5 raggiunge un picco di assorbimento prossimo all'unità, mentre GA-2 si ferma a 0,9, verosimilmente a causa della maggiore densità. Il confronto tra le figure evidenzia che, indipendentemente dalla tecnologia produttiva, i materiali con resistenza al flusso più bassa seguono un comportamento acustico simile a quello teorico dei materiali porosi, con coefficienti di assorbimento bassi alle basse frequenze, che aumentano repentinamente alle frequenze medie fino a raggiungere un picco con valori α vicini all'unità alle alte frequenze. All'aumentare della resistenza al flusso, l'andamento delle curve di assorbimento acustico rimane pressoché invariato, ma si osserva una riduzione dei valori del coefficiente di assorbimento α .

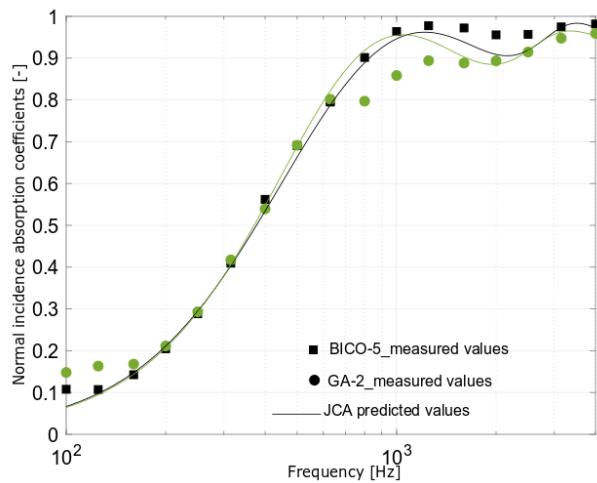


Fig. 8 – Confronto tra i coefficienti di assorbimento acustico ad incidenza normale misurati e stimati per i campioni BICO-5, e GA-2 (spessore 40 mm)

Comparison between normal incidence sound absorption coefficients measured and predicted for BICO-5 and GA-2 samples (thicknesses of 40 mm)

Il confronto delle curve di assorbimento misurate con quelle teoriche mostra come entrambi i modelli teorici siano in grado di prevedere i valori sperimentali con una certa accuratezza.

La Tab. 3 riassume i parametri non acustici misurati e stimati (questi ultimi asteriscati) che si riveleranno utili per meglio descrivere le curve di assorbimento ad incidenza normale dei materiali a base di scarti tessili realizzati a scala industriale, rappresentate in Fig. 9.

Il campione TW-1 evidenzia un comportamento fonoassorbente coerente con quello di un materiale poroso ideale, con un picco di assorbimento acustico ($\alpha \approx 1$) a 2.125 kHz. Tale prestazione è attribuibile all'elevata porosità e alla bassa resistenza al flusso d'aria (Tab. 3), che conferiscono al materiale un'impedenza superficiale prossima a quella dell'aria. La tortuosità prossima all'unità non ha influenzato la frequenza del picco, che si verifica in corrispondenza della condizione di risonanza per un quarto di lunghezza d'onda rispetto allo

Tab. 3 – Riassunto dei parametri non acustici misurati o derivati indirettamente dall'applicazione del modello JCA (asteriscati)

Summary of non-acoustical parameters measured or indirectly derived from the application of the JCA (with a star) model

ID	ρ kg/m^3	ϵ –	σ $kN\cdot s/m^4$	τ –
TW-1	68	0.92	19.2*	1.0*
TW-2	96	0.91	38.0*	1.0*
TW-3	134	0.89	81.2*	1.0*

spessore del campione. Ben diversi sono i risultati per il campione TW-2 che, sebbene fosse caratterizzato da una porosità e da un valore di tortuosità pari all'unità (Tab. 3), ha mostrato una curva di assorbimento senza alcun picco evidente. Questo comportamento è attribuibile all'elevata resistenza al flusso d'aria che ha determinato una riduzione della velocità del suono nel materiale, penalizzando l'assorbimento alle alte frequenze. Considerazioni simili potrebbero essere fatte per il campione TW-3, che ha mostrato la resistenza al flusso d'aria più alta (Tab. 3). In questo caso, i coefficienti di assorbimento sonoro sono risultati inferiori a quelli mostrati dagli altri due campioni su tutta la gamma di frequenze, a causa dell'elevata resistenza al flusso d'aria e dello spessore ridotto del campione.

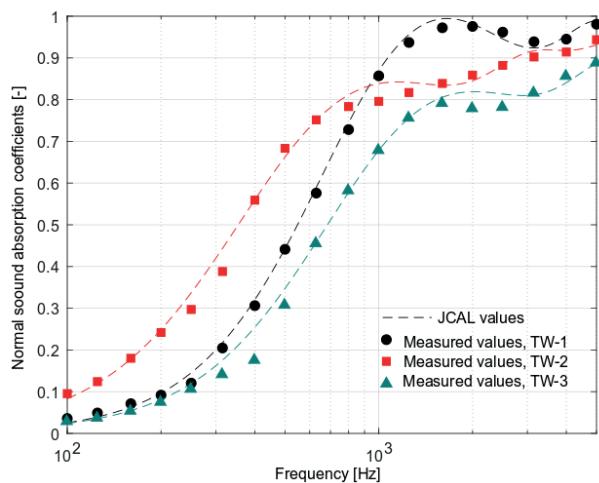


Fig. 9 – Confronto tra i coefficienti di assorbimento acustico ad incidenza normale misurati e stimati per i campioni TW-1, TW-2 e TW-3, con spessori rispettivamente di 40 mm, 50 mm e 25 mm

Comparison between normal incidence sound absorption coefficients measured and predicted for TW-1, TW-2 and TW-3 samples with thicknesses respectively of 40 mm, 50 mm and 25 mm

Come osservato in Fig. 9, il confronto tra le curve sperimentali e quelle ottenute con il modello teorico JCAL conferma la buona capacità predittiva del modello in grado di stimare accuratamente posizione, altezza e larghezza del primo picco, soprattutto per il campione TW-1. Per i campioni TW-2 e TW-3, il modello ha mostrato una buona corrispondenza fino a frequenze medio-basse, ma ha presentato lievi discrepanze alle alte frequenze.

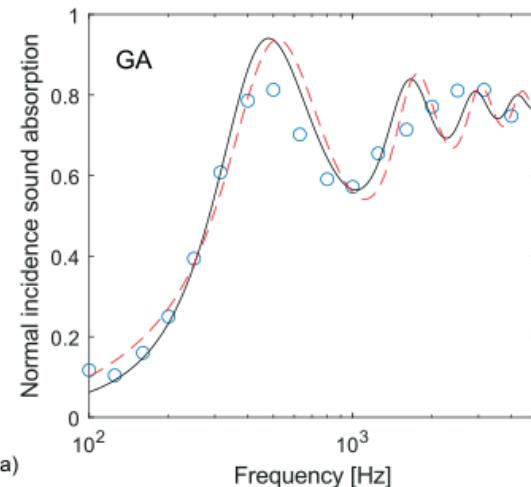
4.2 | Scarti della mandorla

La Tab. 4 riporta i parametri non acustici sperimentali e stimati tramite il modello teorico JCA (indicati con asterisco) con riferimento ai campioni realizzati con gli scarti della mandorla. I valori ottenuti evidenziano un'elevata tortuosità del materiale, parametro che successivamente contribuirà a spiegare la deviazione osservata tra le curve di assorbimento sperimentali e l'andamento teorico atteso, in particolare per quanto riguarda lo spostamento del primo picco.

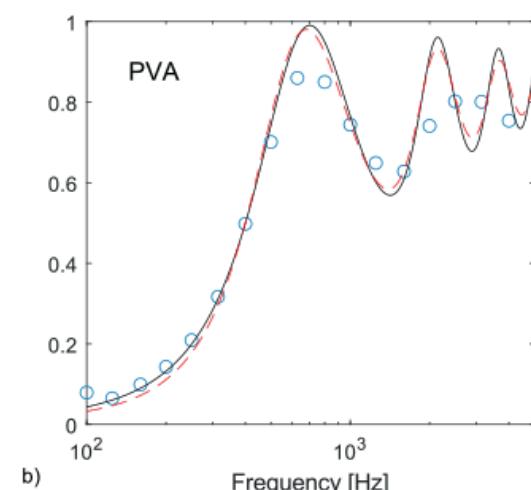
Tab. 4 – Riassunto dei parametri non acustici misurati o derivati indirettamente dall'applicazione dei modelli JCA (asteriscati).

Summary of non-acoustical parameters measured or indirectly derived from the application of the JCA (with a star) model

ID	ρ kg/m^3	ϵ –	σ $kN\cdot s/m^4$	τ –
GA	235	0.81	13.4	5.50*
PVA	373	0.68	23.4	4.40*



a)



b)

Fig. 10 – Confronto tra i coefficienti di assorbimento acustico ad incidenza normale misurati e stimati dai modelli JCA (curva nera) e JCAL (curva rossa) per i campioni GA a) e PVA b) spessi 50 mm

Comparison between normal incidence sound absorption coefficients measured and predicted by JCA (black curve) and JCAL (red curve) models for GA a) and PVA b) samples 50 mm thick

La Fig. 10 riporta le curve di assorbimento ad incidenza normale, in bande di terzi d'ottava, nel range di frequenze da 100 Hz a 5 kHz. I due campioni mostrano un comportamento simile, con due picchi separati da un avvallamento, mantenendo un andamento analogo fino a 160 Hz, punto in cui le curve assumono un trend di crescita differente. Infatti, il campione GA ha registrato un primo picco a 500 Hz, con un valore di α prossimo a 0.8. Il campione PVA, invece, ha mostrato coefficienti di assorbimento inferiori rispetto a quelli di GA fino a 630 Hz, dove compare il primo picco ($\alpha = 0.9$), mentre la curva di GA continua a diminuire con un valore di α pari a 0.7. In entrambi i casi, il primo picco è stato rilevato a una frequenza inferiore a 1.7 kHz (valore teorico al quale ci si aspetterebbe il primo massimo di assorbimento per un pannello di 50 mm di spessore), indicando una significativa riduzione della velocità del suono nel materiale, attribuibile alla complessa microstruttura porosa e all'elevata tortuosità. In entrambi i casi, il primo picco è seguito da un avvallamento con un valore minimo di α intorno a 0.6, registrato a 1 kHz per il campione GA e a 1.6 kHz per il campione PVA. Successivamente, le due curve crescono fino a raggiungere un secondo picco intorno a 3.15 kHz.

Come mostrato in Fig. 10, l'applicazione del modello fenomenologico JCA ha fornito una buona corrispondenza con i dati sperimentali in termini di frequenze di picco, sebbene con leggere discrepanze nei valori assoluti. Il modello JCAL, utilizzato per confronto, non ha fornito un miglioramento significativo rispetto al modello JCA.

4.3 | Paglia

La Tab. 5 riporta i valori dei parametri non acustici misurati e stimati tramite il modello JCA (questi ultimi asteriscati). Analogamente ai composti a base di scarti di mandorla, il valore di tortuosità prossima a 2 indica una morfologia interna complessa, la cui configurazione strutturale incide significativamente sulle prestazioni fonoassorbenti del materiale.

Tab. 5 – Riassunto dei parametri non acustici misurati o derivati indirettamente dall'applicazione dei modelli JCA (asteriscati)
Summary of non-acoustical parameters measured or indirectly derived from the application of the JCA (with a star) model

ID	ρ kg/m ³	ϵ	τ
SF	152	0.90	1.9*

In Fig. 11 sono mostrati i coefficienti di assorbimento sonoro ad incidenza normale in bande di terzi d'ottava, nel range di frequenze da 100 Hz a 5000 kHz. Trattandosi di due campioni estratti dalla stessa miscela, il diverso comportamento fonoassorbente osservato può essere attribuito alla differenza di spessore con cui sono stati realizzati i campioni (50 e 25 mm). Entrambi i campioni mostrano coefficienti di assorbimento trascurabili (inferiori a 0.2) alle medie-basse frequenze. A partire da 500 Hz, i valori di α subiscono incrementi graduau-

li, sebbene seguendo andamenti di crescita differenti. In effetti, per entrambi i campioni è stato osservato un primo picco con un valore di α di circa 0.8, ma questo è stato localizzato a 2 kHz per il campione di 25 mm e a 1.25 kHz per quello da 50 mm. La posizione dei massimi di assorbimento a frequenze più basse al crescere dello spessore era un fenomeno atteso in virtù del fatto che il primo picco si colloca normalmente a una frequenza la cui lunghezza d'onda quartica corrisponde allo spessore del campione. Tuttavia, come già evidenziato per i composti precedentemente analizzati, lo spostamento del primo picco di assorbimento verso frequenze più basse di quella teorica, può essere una conseguenza della tortuosità che caratterizza la struttura porosa del materiale. Per entrambi i materiali, al primo picco di assorbimento segue un avvallamento con valore di α pari a 0.80 per il campione di 25 mm e pari a 0.65 per il campione spesso 50 mm. Alle alte frequenze, i coefficienti di assorbimento raggiungono valori di α superiori a 0.9, a partire da 4 kHz per il campione spesso 25 mm e da 3.15 kHz per il campione da 50 mm.

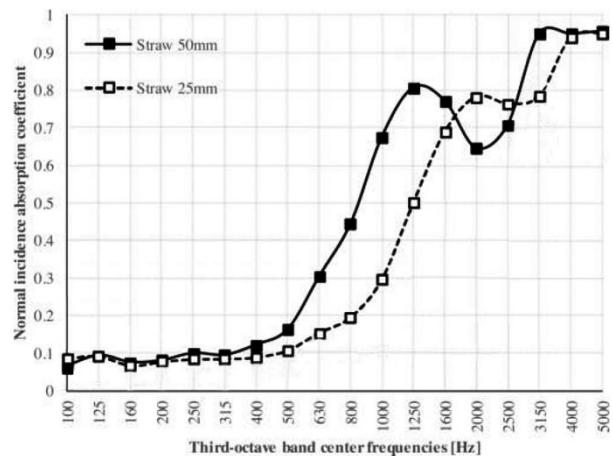


Fig. 11 – Coefficienti di assorbimento acustico ad incidenza normale misurati per i campioni SF_25 ed SF_50 rispettivamente di 25 e 50 mm

Normal incidence sound absorption coefficients measured for SF_25 and SF_50 samples, respectively 25 and 50 mm thick

4.4 | Scarti di potatura dell'olivo

In Tab. 6 sono elencati i valori dei parametri non acustici misurati e stimati (questi ultimi asteriscati) per i materiali a base di scarti di potatura dell'olivo. I dati indicano che i campioni ottenuti tramite miscelazione di granulometrie diverse mostrano valori di resistenza al flusso circa due volte superiori rispetto a campioni di densità simile ma con granulometria singola, suggerendo che la miscelazione non sempre migliora le proprietà acustiche del materiale, come sarà illustrato successivamente.

In Fig. 12 sono mostrati i coefficienti di assorbimento acustico ad incidenza normale misurati per le configurazioni con (S01_G1, S01_G2 ed S01_G3) e senza legante (S00_G1, S00_G2, S00_G3). Tutti i campioni mostrano un comportamento simile fino a 400 Hz, mentre a frequenze più alte emergono differenze significative. Nel caso del campione S00_G1,

Tab. 6 – Riassunto dei parametri non acustici misurati o derivati indirettamente dall'applicazione dei modelli JCA (asteriscati).

Summary of non-acoustical parameters measured or indirectly derived from the application of the JCA (with a star) model

ID	ρ kg/m ³	ϵ –	σ kN·s/m ⁴	τ –
S00_G1	66.2	0.98	–	–
S00_G2	127.3	0.98	–	–
S00_G3	218.9	0.83	–	–
S01_G1	79.5	0.96	49.1	1.90*
S02_G2	143.5	0.94	58.2	–
S03_G3	244.4	0.81	107	–
S0_2	143.8	0.89	98.5	–
S0_3	218.5	0.84	210.2	2.03*
S0_4	900	–	–	–

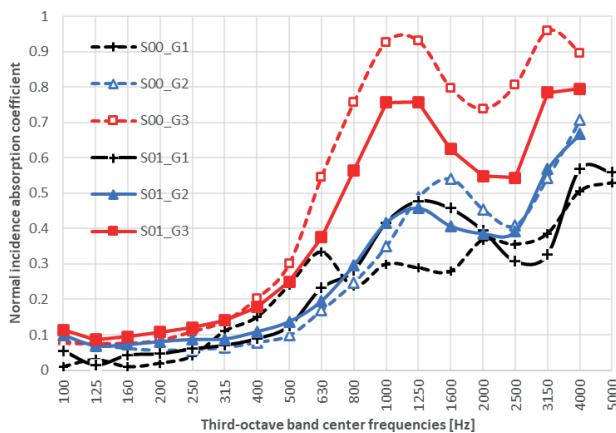


Fig. 12 – Coefficienti di assorbimento acustico ad incidenza normale misurati per i campioni (spessi 50 mm) con granulometria singola con (S01_G1, S01_G2 ed S01_G3) e senza legante (S00_G1, S00_G2, S00_G3)

Normal incidence sound absorption coefficients measured for samples (50 mm thick) with single granulometry, with (S01_G1, S01_G2, and S01_G3) and without binder (S00_G1, S00_G2, S00_G3)

i coefficienti di assorbimento acustico assumono un valore stabile intorno a 0.3 tra 500 Hz e 1.6 kHz, per poi aumentare fino a 0.5 a 5 kHz. Il campione S01_G1, con la stessa matrice di S00_G1 ma con il chitosano come legante, ha registrato un primo picco intorno a 1.25 kHz, con α pari a 0.5, seguito da un avallamento tra 2.5 kHz e 3.15 kHz, e infine un nuovo picco a 4 kHz. I campioni S00_G2 e S01_G2 hanno mostrato un comportamento simile alle basse e alte frequenze, con differenze tra 1 e 2 kHz, dove i picchi di assorbimento sono apparsi rispettivamente a 1.6 kHz e 1.25 kHz, evidenziando l'effetto del legante sulla risposta acustica. Dal confronto tra i campioni S01_G1 e S01_G2 emerge che le due curve di assorbimento hanno un andamento pressoché sovrapponibile fino a 2 kHz. Tuttavia, nel range di frequenze più elevate, la granulometria G2 ha determinato un incremento delle prestazioni di assorbimento acustico. I campioni S00_G3 e S01_G3 hanno mostrato i più alti coefficienti di assorbimen-

to acustico, con picchi allineati in frequenza. Tuttavia, l'inclusione del legante nel campione S01_G3 ha comportato una riduzione del 20% dell'assorbimento, attribuibile alla parziale occlusione della porosità e alla conseguente diminuzione della permeabilità del materiale.

Per i campioni con granulometria mista (Fig. 13), il campione S02 ha mostrato un assorbimento lievemente superiore fino a 800 Hz rispetto ai campioni con densità simile, un picco più ampio intorno a 1.25 kHz, e un incremento finale di α fino a 0.8 a 4 kHz e oltre. Il campione S03, avente la stessa composizione di S02, ma compresso durante il processo di formatura, ha evidenziato un assorbimento leggermente inferiore alle basse frequenze. Nel range di frequenze medio-alte, si è manifestato il consueto picco a 1.25 kHz, con un valore massimo di α pari a 0.85, seguito da valori di α prossimi a 0.9 per frequenze superiori a 3.15 kHz. Anche in questo caso, così come evidenziato per i precedenti materiali compositi analizzati, il primo picco di tutte le curve ottenute risulta spostato verso frequenze più basse rispetto al valore teorico. Nonostante non sia stata effettuata una misura o una stima della tortuosità per tutti i materiali, la matrice costituita da più foglie sovrapposte lascia pensare ad un percorso tortuoso del suono. Il campione S04, contenente malta come legante, ha mostrato un comportamento diverso dagli altri campioni, con una curva piatta e α variabile tra 0.30 e 0.35, raggiungendo il massimo tra 415 Hz e 400 Hz. Questo comportamento è probabilmente dovuto alla malta che, riempiendo gli spazi tra le foglie, ha fatto sì che il campione si comportasse come un pannello vibrante invece che come un assorbitore poroso, riducendo l'efficacia dell'interazione visco-termica.

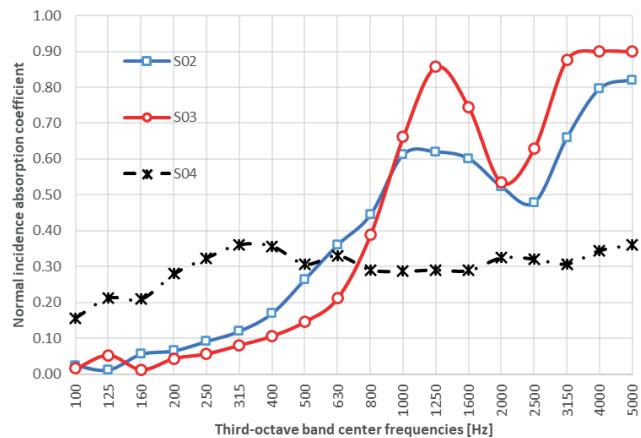


Fig. 13 – Coefficienti di assorbimento acustico ad incidenza normale misurati per i campioni (spessi 50 mm) con granulometria mista (S02, S03 ed S04)

Normal incidence sound absorption coefficients measured for samples (50 mm thick) with mixed granulometry (S02, S03 ed S04)

Infine, le curve sperimentali ottenute per i campioni S01_G1 e S03 sono state confrontate con quelle stimate applicando il modello teorico JCA, mostrando un ottimo accordo tra i valori misurati e quelli stimati (Fig. 14).

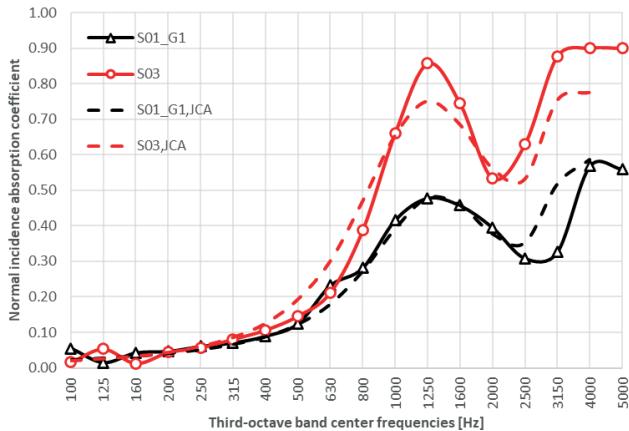


Fig. 14 – Confronto tra i coefficienti di assorbimento acustico ad incidenza normale misurati sperimentalmente e le curve di assorbimento previste dal modello JCA per i campioni SO1_G1 ed SO3

Comparison between normal incidence sound absorption coefficients experimentally measured and sound absorption curves predicted by JCA model for SO1_G1 and SO3 samples

4.5 | Scarti della carta

La Tab. 7 riporta i valori dei parametri non acustici misurati e stimati attraverso l'applicazione del modello JCA per i materiali a base di scarti della carta. Analogamente a quanto accaduto per i materiali a base di diatomite, l'elevata deviazione standard delle misure sperimentali ha reso necessario ricercare i parametri non acustici con riferimento ai coefficienti minimi e massimi misurati. Per ciascuna miscela, i valori massimi di resistenza al flusso sono generalmente associati ai valori minimi di assorbimento, tipicamente rilevati sulla faccia inferiore del provino. Tale superficie risulta infatti più densa e compatta per via della distribuzione manuale della miscela all'interno dello stampo e all'azione della gravità durante il processo di essiccazione.

Tab. 7 – Riassunto dei parametri non acustici misurati o derivati indirettamente dall'applicazione dei modelli JCA (asteriscati)
Summary of non-acoustical parameters measured or indirectly derived from the application of the JCA (with a star) model

ID	ρ kg/m ³	ϵ –	σ $10^4 \text{ kN}\cdot\text{s}/\text{m}^4$		τ –	
			min	max	min	max
CG	318	0.78	160*	48.0*	4.9*	4.3*
SP	200	0.87	68.0*	32.0*	2.2*	4.9*
FB	348	0.68	37.0	22.0	14.8*	6.6*

In Fig. 15, sono riportate le curve di assorbimento acustico ad incidenza normale misurate nel range di frequenze da 125 Hz a 5 kHz rispettivamente per i campioni CG, SP e FB.

È possibile osservare una marcata differenza prestazionale tra la faccia superiore dei provini, esposta all'aria (up) e quella inferiore, a diretto contatto con la base dello stampo (down). Le differenze riscontrate sono attribuibili a disomogeneità microstrutturali derivanti dal processo di realizzazione

manuale del provino e al diverso comportamento delle due facce durante il ritiro e la fase di essiccazione. Nella miscela CG (con il caffè), tali differenze si manifestano principalmente alle alte frequenze (> 1.3 kHz); mentre per la miscela FB (con paglia di favino) emergono già a partire da 500 Hz, intensificandosi oltre i 2 kHz, verosimilmente a causa dell'effetto della granulometria irregolare del residuo di paglia di favino sulla superficie ridotta del campione testato alle alte frequenze. La miscela SP (con la segatura), invece, mostra un comportamento più uniforme delle due facce, riconducibile alla capacità della segatura di mitigare il ritiro durante l'essiccazione. Il campione con paglia di favino presenta una risposta acustica più piatta, associata a bassa resistività al flusso, bassa porosità e alta tortuosità, probabilmente dovute a una microstruttura di tipo granulare. In tutti i casi, le ampie deviazioni standard (identificate con l'area colorata intorno alla curva) segnalano una variabilità tra i campioni non trascurabile.

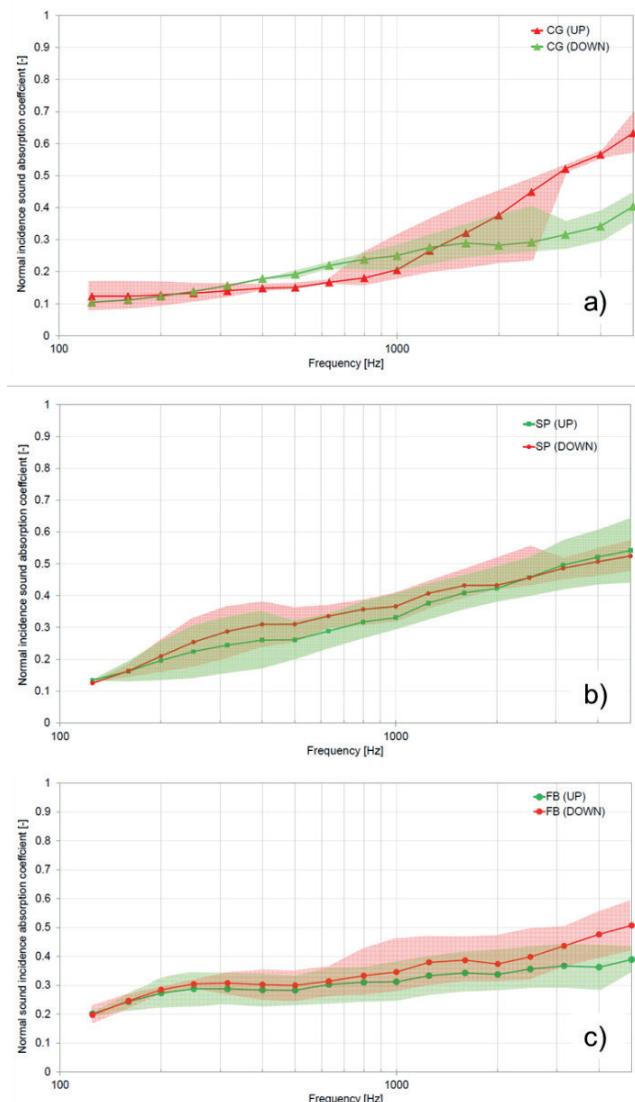


Fig. 15 – Confronto tra i coefficienti di assorbimento acustico ad incidenza normale misurati sperimentalmente e le curve di assorbimento previste dal modello JCA per i campioni CG a), SP b) e FB c)

Comparison between normal incidence sound absorption coefficients experimentally measured and sound absorption curves predicted by JCA model for CG a), SP b) e FB c) samples

5 | Conclusioni

Il presente articolo ha l'obiettivo di sintetizzare i principali risultati delle attività di ricerca condotte dagli autori. Le sperimentazioni hanno riguardato numerose materie prime naturali e scarti di origine industriale o vegetale, combinati con differenti tipologie di leganti. Tali combinazioni hanno dato origine a materiali compositi, prevalentemente a matrice fibrosa o granulare, la cui struttura è stata fortemente influenzata dalla tecnica di produzione impiegata, influenzando in modo significativo le proprietà acustiche.

I materiali a matrice fibrosa hanno mostrato un comportamento acustico caratteristico dei materiali fonoassorbenti porosi, con bassi coefficienti di assorbimento alle basse frequenze, seguiti da un rapido incremento nel range delle medie frequenze, fino a raggiungere un picco massimo alle alte frequenze. Al contrario, i materiali a matrice granulare hanno mostrato curve di assorbimento caratterizzate da molteplici picchi, con valori dei coefficienti fortemente condizionati dalla resistenza al flusso del materiale. Tutti i materiali analizzati risultano idonei all'impiego come strati interni fonoassorbenti o come pannelli per sistemi di controsoffittatura.

Dal punto di vista ambientale, le ricerche in corso sono orientate alla valutazione dell'impatto ecologico dei materiali. Ad ogni modo, specialmente nel caso di utilizzo degli scarti, il loro reimpiego consente di evitare il conferimento in discarica o l'incenerimento, conferendo così ai materiali una marcata valenza in termini di sostenibilità. Sviluppi futuri della ricerca prevedono l'ottimizzazione delle miscele dei compositi al fine di migliorare ulteriormente le prestazioni acustiche, la sperimentazione di nuovi leganti a basso impatto ambientale e la standardizzazione delle tecniche di produzione per garantire la ripetibilità dei risultati. Inoltre, verranno approfondite le analisi LCA (Life Cycle Assessment) e sviluppate relative Dichiarazioni Ambientali di Prodotto (EPD), con l'obiettivo di posizionare i materiali nel mercato edilizio secondo criteri di trasparenza ambientale e circolarità. Ulteriori studi valuteranno anche la durabilità e il comportamento igrotermico dei materiali in condizioni operative reali, al fine di validarne l'applicazione in contesti edilizi diversi.

Conclusions

The paper aims to summarize the main results of research activities carried out by the authors. The experiments involved numerous natural raw materials and waste products of industrial or vegetal origin, combined with different types of binders. Different composite materials were obtained, predominantly with fibrous or granular matrices, whose structure was strongly influenced by the adopted manufacturing technique, significantly affecting their acoustic properties.

Fibrous matrix materials exhibited acoustic behavior typical of porous sound-absorbing materials, characterized by low absorption coefficients at low frequencies, followed by a sharp increase in the mid-frequency range, reaching a maximum peak at high frequencies. Conversely, granular matrix materials showed absorption curves with

multiple peaks, with coefficient values influenced by the material's airflow resistivity. All analyzed materials are suitable for use as internal sound-absorbing layers or as panels for suspended ceiling systems.

From an environmental perspective, ongoing research focuses on assessing the ecological impact of these materials. In any case, particularly when using waste materials, their reuse avoids landfill disposal or incineration, thus giving the materials considerable value in terms of sustainability. Future developments of the research include the optimization of the blend composite to further improve the acoustic performance, the testing of new low environmental impact binders and the standardization of the production techniques to ensure the repeatability of the results. Furthermore, the Life Cycle Assessment (LCA) analysis will be deepened, and the related Environmental Product Declarations (EPD) will be developed, with the aim of introducing these materials in the construction market according to the principles of environmental transparency and circularity. Further studies will also evaluate the durability and hygrothermal behavior of the materials in real operating conditions, in order to validate their application in different building contexts.

Bibliografia

- [1] S.V. Joshi, L.T. Drzal, A.K. Mohanty, S. Arora, Are natural fiber composites environmentally superior to glass fiber reinforced composites?, *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing* 35 (2004) 371–376. <https://doi.org/10.1016/j.compositesa.2003.09.016>.
- [2] T.W. Hesterberg, G.A. Hart, Synthetic Vitreous Fibers: A Review of Toxicology Research and Its Impact on Hazard Classification, *Critical Reviews in Toxicology* 31 (2001) 1–53. <https://doi.org/>.
- [3] ISO 14040:2006. Environmental management – Life cycle assessment – Principles and framework. International Organization for Standardization, Geneva, Switzerland.
- [4] ISO 14044:2006. Environmental management – Life cycle assessment – Requirements and guidelines. International Organization for Standardization, Geneva, Switzerland.
- [5] S. Füchsl, F. Rheude, H. Röder, Life Cycle Assessment (LCA) of Thermal Insulation Materials: A Critical Review. *Cleaner Materials* 5 (2022) 100119. <https://doi.org/10.1016/j.clema.2022.100119>.
- [6] F. Asdrubali, G. Grazieschi, D.M. Gandola, The Role of Environmental Product Declarations in the Decarbonization of Building Materials and Components. *Energies* 18 (2025) 1308. <https://doi.org/10.20944/preprints202502.0255.v1>.
- [7] ISO 14025:2010. Environmental labels and declarations – Type III environmental declarations – Principles and procedures. International, Geneva, Switzerland.
- [8] R. Del Rey, A. Uris, J. Alba, P. Candelas, Characterization of sheep wool as a sustainable material for acoustic applications. *Materials* 10 (2017) 1277. <https://doi.org/10.3390/ma10111277>.
- [9] C. Rubino, M. Bonet Aracil, J. Gisbert-Payá, S. Liuzzi, P. Stefanizzi, M. Zamorano Cantó, F. Martellotta, Composite eco-friendly sound absorbing materials made of recycled textile waste and biopolymers, *Materials* 12 (2019) 4020. <https://doi.org/10.3390/ma12234020>
- [10] C. Rubino, M. Bonet Aracil, S. Liuzzi, P. Stefanizzi, F. Martellotta, Wool waste used as sustainable nonwoven for building applications, *Journal of Cleaner Production* 278 (2021) 123905. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2020.123905>

- [11] C. Rubino, S. Liuzzi, P. Stefanizzi, F. Martellotta, Characterization of sustainable building materials obtained from textile waste: From laboratory prototypes to real-world manufacturing processes, *Journal of Cleaner Production* 390 (2023) 136098. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2023.136098>
- [12] S. Liuzzi, C. Rubino, P. Stefanizzi, F. Martellotta, Performance characterization of broad band sustainable sound absorbers made of almond skins. *Materials*, 13 (2020) 5474. <https://doi.org/10.3390/ma13235474>.
- [13] L. Shtrepi, A. Astolfi, E. Badino, G. Volpatti, D. Zampini, More than just concrete: Acoustically efficient porous concrete with different aggregate shape and gradation. *Applied Sciences* 11 (2021) 4835. <https://doi.org/10.3390/app11114835>.
- [14] S. Liuzzi, C. Rubino, F. Martellotta, P. Stefanizzi, C. Casavola, G. Pappalettera, Characterization of biomass-based materials for building applications: The case of straw and olive tree waste. *Industrial Crops and Products* 147 (2020) 112229. <https://doi.org/10.1016/j.indcrop.2020.112229>.
- [15] A. Santoni, P. Bonfiglio, P. Fausti, C. Marescotti, V. Mazzanti, F. Mollica, F. Pompoli, Improving the sound absorption performance of sustainable thermal insulation materials: Natural hemp fibres. *Applied Acoustics* 150 (2019) 279-289. <https://doi.org/10.1016/j.apacoust.2019.02.022>.
- [16] G. Iannace, G. Ciaburro, A. Trematerra, Modelling sound absorption properties of broom fibers using artificial neural networks. *Applied Acoustics* 163 (2020) 107239. <https://doi.org/10.1016/j.apacoust.2020.107239>.
- [17] M. Ali, A. Alabdulkarem, A. Nuhait, K. Al-Salem, G. Iannace, R. Almuzaiker, Characteristics of agro waste fibers as new thermal insulation and sound absorbing materials: hybrid of date palm tree leaves and wheat straw fibers. *Journal of Natural Fibers* 19 (2022) 6576-6594. <https://doi.org/10.1080/15440478.2021.1929647>.
- [18] H. Lenormand, P. Glé, N. Leblanc, Investigation of the acoustical and thermal properties of sunflower particleboards. *Acta Acustica united with Acustica* 103 (2017) 149-157. <https://doi.org/10.3813/AAA.919040>.
- [19] F. Martellotta, A. Cannavale, V. De Matteis, U. Ayr, Sustainable sound absorbers obtained from olive pruning wastes and chitosan binder. *Applied Acoustics* 141 (2018) 71-78. <https://doi.org/10.1016/j.apacoust.2018.06.022>.
- [20] J. P. Arenas, J. Rebolledo, R. del Rey, J. Alba, Sound Absorption Properties of Unbleached Cellulose Loose-Fill Insulation Material. *Bio Resources* 9 (2014). <https://doi.org/10.15376/biores.9.4.6227-6240>.
- [21] S. Liuzzi, C. Rubino, P. Stefanizzi, F. Martellotta, Sustainable materials from waste paper: Thermal and acoustical characterization. *Applied Sciences* 13 (2023) 4710. <https://doi.org/10.3390/app13084710>.
- [22] ISO 10534-2, 1998. *Acoustics e Determination of Sound Absorption Coefficient and Impedance in Impedance Tubes e Part 2: Transfer-Function Method*, Geneva, Switzerland.
- [23] ISO 9053: 2018. *Acoustics – Determination of airflow resistance – Part 1: static airflow method*. Geneva, Switzerland.
- [24] D.L. Johnson, J. Koplik, R. Dashen, Theory of dynamic permeability and tortuosity in fluid-saturated porous media, *Journal of Fluid Mechanics* 176 (1987) 379e402. <https://doi.org/10.1017/S0022112087000727>.
- [25] J.F. Allard, Y. Champoux, New empirical equation for sound propagation in rigid frame fibrous material. *Journal of the Acoustical Society of America* 91 (1992) 3346e3353. <https://doi.org/10.1121/1.402824>.
- [26] D. Lafarge, P. Lemarinier, J.F. Allard, V. Tarnow, Dynamic compressibility of air in porous structures at audible frequencies, *Journal of the Acoustical Society of America* 102 (1997) 1995-2006. <https://doi.org/10.1121/1.419690>
- [27] T.J. Cox, P.K. D'Antonio, *Acoustic Absorbers and Diffusers, Theory, Design and Application*. Spon Press, London, pp. 141-145, 2004.
- [28] Y. Atalla, R. Panneton, Inverse acoustical characterization of open cell porous media using impedance tube measurements. *Canadian Acoustics* 33 (2005) 11-24. [//jcaa.caa-aca.ca/index.php/jcaa/article/view/1711](http://jcaa.caa-aca.ca/index.php/jcaa/article/view/1711).

Development and acoustic optimisation of sustainable fibrous materials*

Andrea Santoni^{a*} | Francesco Pompoli^a | Patrizio Fausti^a

^a Dipartimento di Ingegneria,
Università degli studi di Ferrara,
Via Saragat, 1, 44122 Ferrara

* Corresponding author:
andrea.santoni@unife.it

Ricevuto: 9/9/2025

Accettato: 2/10/2025

DOI: 10.3280/ria2-2025oa20975

ISSN: 2385-2615

The urgent need for sustainable solutions in different industrial sectors has led to a growing interest in using natural and recycled fibrous materials for acoustic and thermal insulation. While these materials offer significant environmental benefits, their commercial production is still limited also due to a lack of standardised characterization and design methods. This paper addresses this gap by presenting a comprehensive methodology to develop and acoustically optimise sustainable fibrous materials. The approach combines small-scale experimental characterisation with an analytical framework that models acoustic performance as a function of material density. The effectiveness of this method is demonstrated through case studies involving a variety of sustainable materials, including hemp, jute, posidonia, and recycled fibre mixtures. The results validate the methodology's ability to accurately predict the sound-absorbing properties of these materials, enabling the design of high-performance solutions capable of achieving acoustic ratings comparable to traditional materials. This article, invited by the RIA editorial board, is not an original study. Instead, it synthesizes existing research by reanalysing and integrating the data from multiple studies using a single, unified methodology.

Keywords: fibrous materials, sustainability, acoustic modelling, JCA, optimisation, sound absorption

Sviluppo e ottimizzazione acustica di materiali fibrosi sostenibili

L'impellente necessità di trovare soluzioni sostenibili in diversi settori industriali ha portato a un crescente interesse per l'utilizzo di materiali fibrosi naturali e riciclati per l'isolamento acustico e termico. Sebbene questi materiali offrano significativi vantaggi ambientali, la loro produzione commerciale è ancora limitata anche a causa della mancanza di metodi standardizzati per la loro caratterizzazione e progettazione. Questo articolo affronta tale lacuna presentando una metodologia completa per sviluppare e ottimizzare acusticamente i materiali fibrosi sostenibili. L'approccio integra la caratterizzazione sperimentale su piccola scala con un modello analitico per stimare le prestazioni acustiche di un materiale in funzione della sua densità. L'efficacia di questo metodo è dimostrata attraverso casi di studio che coinvolgono una varietà di materiali sostenibili, tra cui canapa, iuta, posidonia e miscele di fibre riciclate. I risultati validano l'affidabilità della metodologia per la stima delle prestazioni fonoassorbenti di questi materiali, consentendo la progettazione di soluzioni sostenibili in grado di raggiungere prestazioni paragonabili ai materiali tradizionali. Questo articolo, su invito del comitato editoriale RIA, non è uno studio originale. Si tratta invece di una raccolta di ricerche esistenti, i cui dati sono stati rianalizzati e integrati attraverso una metodologia unificata.

Parole chiave: materiali fibrosi, sostenibilità, modellazione acustica, JCA, ottimizzazione, assorbimento acustico

1 | Introduction

The development of sustainable solutions in various sectors has become a top priority due to global challenges associated with climate change. The construction industry, in particular, is

a major contributor to global energy and resource consumption [1-4]. Traditionally, building acoustic and thermal insulation relies on materials derived from petrochemicals, such as polystyrene, or from mineral sources processed with high energy consumption, like mineral wools. While effective, these conventional materials pose significant environmental impacts throughout their life cycle, including the use of non-renewable resources, high embodied energy consumption, and difficulties in recycling and disposal [5, 6]. In alignment with inter-

* Invited paper following the oral presentation at the AIA International Symposium "Innovative Materials in Acoustics: Between Sustainability and Technology" held in Bologna on January 30, 2025.

national imperatives, such as the United Nations Sustainable Development Goals (SDGs), particularly SDG 12 on Responsible Consumption and Production, and the ambitious targets of the European Green Deal, there is an urgent need for innovative solutions that promote resource efficiency and circularity. This has led to a growing interest in the research and development of alternative materials that offer performance comparable to conventional ones but with a significantly reduced environmental footprint. Sustainable fibrous materials for acoustic and thermal applications can be broadly classified into two main categories: natural (bio-based) materials and recycled materials. Natural materials include agricultural and forest by-products, such as hemp, jute, reeds, sugarcane bagasse, straw, and oil palm fibres, which can be processed into panels or loose fibres [7-13]. Recycled materials, on the other hand, originate from industrial and post-consumer waste, such as recycled textile fibres (e.g., cotton, polyester, denim, wool, acrylic) and recycled glass. Their ability to sequester carbon during growth (in the case of bio-based materials) or to reduce landfill waste (for recycled materials) makes them an ideal choice for boosting the circular economy and achieving decarbonization goals. Fibrous (and porous) materials are effective at absorbing sound waves by converting acoustic energy into heat through visco-thermal effects. Their acoustic performance, generally expressed in terms of sound absorption coefficients, depends on their micro-structural characteristics and is strongly influenced by their density. Even though various studies have shown that bio-based or recycled porous materials can achieve acoustic performance comparable to traditional solutions, many of these unconventional materials remain in a research or prototyping phase with limited commercial diffusion. While several studies have analysed the acoustic properties of different kinds of sustainable fibrous materials, there is a notable lack of comprehensive characterization of their physical properties and a systematic approach to design optimization to achieve acoustic performance comparable to traditional sound-absorbing materials.

This paper addresses this need by presenting a comprehensive methodology to develop and acoustically optimise sustainable fibrous materials, focusing on both bio-based and recycled alternatives. Such materials offer a promising pathway to significantly reduce the embodied carbon and operational energy of buildings, directly contributing to a circular economy in the construction sector and fostering a more sustainable urban future. Section 2 provides the theoretical framework and describes an inverse characterization approach suitable for a wide range of acoustic fibrous materials. Section 3 illustrates different case studies, demonstrating how the proposed methodology can be employed to develop sustainable sound-absorbing materials, including bio-based solutions that can achieve Class A acoustic performance like traditional materials, and to design mixtures of recycled fibres by predicting their acoustic performance. Finally, Section 4 discusses the key challenges for the real-world application and commercialization of bio-based sustainable fibrous panels.

This article, invited by the RIA editorial board following the oral presentation at the AIA International Symposium “Innovative Materials in Acoustics: Between Sustainability and Technology”, does not present on a novel study. Instead, it is a comprehensive synthesis of several existing studies whose results were partially presented in various journals and at scientific conferences. To ensure consistency and coherence across all data, the findings from these studies have been thoroughly reanalysed and integrated using a single, unified methodology, which is described in the next section. All original sources are thoroughly referenced.

2 | Materials and methods

Optimizing the acoustic performance of porous materials necessitates the integration of experimental techniques and analytical models. This combined approach significantly reduces the time and cost associated with developing new materials. The following sections outline the various phases of the optimization process developed at the Acoustics Laboratory within the Department of Engineering at the University of Ferrara. While this discussion primarily focuses on fibrous materials, the methodology can be extended, with appropriate modifications, to include cellular materials (open-cell foams) and aggregates of recycled materials.

2.1 | Experimental characterisation

The first phase of experimental characterization aims to determine the acoustic descriptors and physical macrostructural properties (also defined transport parameters) of the fibrous material under analysis. This involves testing small material samples using laboratory equipment. The primary instrument used in this phase is the impedance tube (or plane wave tube), for measuring the surface acoustic impedance and normal incidence acoustic absorption. This technique, standardized by ISO 10534-2 [14], allows us to test very small quantities of material under controlled and well-known conditions, yielding acoustic information across a wide frequency range. For the specific equipment we use, samples have a 45 mm diameter, and measurements cover a frequency range from 100 Hz to 4300 Hz, as shown in Fig. 1. This initial experimental phase, especially for fibrous materials, can generally be applied to loose fibres, from which optimised panels will be made of a small quantity of loose fibres (approx. 10 grams) is progressively compressed inside the sample holder. This allows us to obtain a series of measurements at decreasing thickness and increasing density. This process is very fast, does not require prototypes of samples at varying densities while can provide information about the acoustic behaviour of the materials as a function of density changes.

Besides impedance tube acoustic measurements, additional experimental tests can be performed on small samples to evaluate the transport parameters that influence the

acoustic performance of porous material, which require specialised experimental equipment. Examples include devices for measuring airflow resistivity σ (ISO 9053-1 [15], or ISO 9053-2 [16]), porosity φ , tortuosity α_∞ , viscous Λ and thermal Λ' characteristic lengths. While there aren't specific standards for porosity, tortuosity, and characteristic lengths, several methods are described in the literature (e.g., [17-24]). Moreover, indirect and inversion characterisation methods have been proposed by several authors [25-30]. Numerical approaches are also commonly used to characterise the transport parameters of a porous medium, by geometrically modelling its micro-structure in a Representative Volume Element (RVE) [31-34]. A comprehensive review of direct, indirect, and inverse measurement techniques used to assess the transport parameters of acoustic porous materials have been recently published by Di Giulio et al. [35]. Additionally, for fibrous materials, whose structure is relatively simple and changes predictably with compression, Santoni et al. [36] developed an optimization process that doesn't require these direct measurements. The transport parameters are determined as a function of the material density through an inversion method based on the measured normal incidence sound absorption coefficient. This method is further described in Section 2.2.

The final product validation requires the experimental characterization of its acoustic performance. Sound absorbing panels have to be tested by measuring samples with a surface area between 10 m^2 and 12 m^2 in a reverberation chamber (Fig. 2), according to the standard ISO 354 [37]. The experimental evaluation of the diffuse sound field absorption coefficient is essential for certifying the final product and the rate its acoustic performance according to the standard ISO 11654 [38]. The main limitation of this technique is that it requires a significant material surface area, which comes with associated production or prototyping costs. Furthermore, the diffuse sound field sound absorption coefficients results, measured according to this standard, strongly depend on the reverberation chamber's characteristics, especially for materials with high sound absorption. For these reasons, within the product optimization process, we aim to minimize the use of this technique, reserving it primarily for the final validation of the finished product and its acoustic certification.

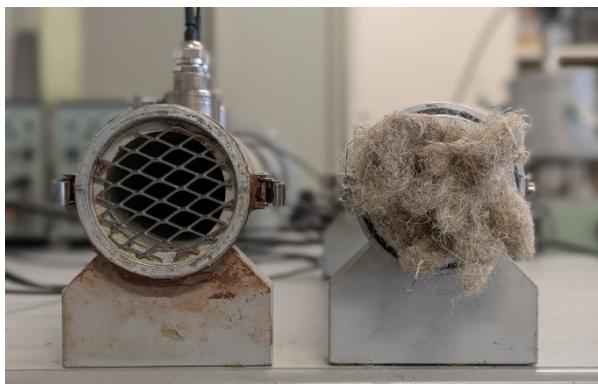


Fig. 1 – Impedance tube test ring and fibrous material mounting
Tubo ad impedenza e montaggio del materiale fibroso



Fig. 2 – Testing sample installed into the reverberant chamber
Camera riverberante con campione di prova installato

2.2 | Acoustic analytical model

The analytical modelling of acoustic wave propagation in fibrous materials, as a first approximation, focuses on the viscous and thermal effects introduced by the material's structure, which is considered rigid and motionless. The material, comprising a fluid phase and a solid phase, is thus modelled as an equivalent dissipative fluid. Its acoustic properties are described by either the characteristic acoustic impedance (Z_c) and propagation constant (k_c), or by the effective density (ρ_e) and effective compressibility (K_e). These acoustic properties are expressed as functions of frequency (f), the parameters of the fluid saturating the material structure (air), and physical parameters that describe the material's structure and its viscous and thermal effects on acoustic wave propagation within the medium: the transport parameters.

There is extensive literature on analytical models for porous materials, primarily distinguished by the number of physical parameters required to describe the acoustic field within the medium. For fibrous materials, notable examples include the Delany-Bazley empirical model [39], which uses airflow resistivity as its sole parameter, and the Miki model [40] which adds porosity and tortuosity to the previous model. Semi-phenomenological multi-parametric models have also been proposed, such as the 5-parameter model based on the works of Johnson et al. [41] and of Champoux and Allard [42], known as the JCA model. This widely used method was further extended by Lafarge et al. [43] (JCAL, a 6-parameter model) and by Pride et al. [44] (JCAPL, a 8-parameter model). These multi-parametric models offer the advantage of better describing acoustic propagation in media with more complex structures (like foams or aggregates). They also effectively model the acoustic field in highly compacted fibrous materials (i.e., those with reduced porosities, $\varphi < 0.95$).

For the studies on sustainable fibrous materials, detailed in Section 3, it is preferable to use multi-parametric models like JCA. This is because the characteristic fibre dimension is often quite large, and to achieve high acoustic performance, these fibres must be significantly compressed, resulting in reduced porosities. Within the JCA framework, the frequency-dependent complex effective density ρ_e , which accounts

for inertial and viscous forces, is expressed by the following equation:

$$\rho_e = \frac{\alpha_\infty \rho_0}{\phi} \left[1 + \frac{\sigma \phi}{j\omega \alpha_\infty \rho_0} \sqrt{1 + j \frac{4\eta \alpha_\infty^2 \rho_0 \omega}{\sigma^2 \Lambda^2 \phi^2}} \right] \quad (1)$$

Simultaneously, the complex frequency-dependent dynamic bulk modulus K_e , which incorporates thermal exchanges between the material's frame and the fluid, is determined as:

$$K_e = \frac{\gamma P_0 / \phi}{\gamma - (\gamma - 1) \left[1 - j \frac{8\eta}{\rho_0 \omega P_r \Lambda'^2} \sqrt{1 + \frac{j\rho_0 \omega P_r \Lambda'^2}{16\eta}} \right]^{-1}} \quad (2)$$

In these equations, $\omega = 2\pi f$ is the angular frequency, ρ_0 represents the density of air, γ is the heat capacity ratio, P_r is the Prandtl number, η is the dynamic viscosity of air, and P_0 is the ambient pressure.

From the complex effective density and dynamic bulk modulus given in Eqs. (1) and (2), we can compute the characteristic impedance Z_c and the complex wavenumber k_c of the equivalent fluid medium as follows:

$$Z_c = \sqrt{\rho_e K_e} \quad (3)$$

$$k_c = \omega \sqrt{\frac{\rho_e}{K_e}} \quad (4)$$

For a porous material of thickness h placed on a rigid, reflecting boundary, the surface impedance for normal incidence (Z_s) is given by:

$$Z_s = -j Z_c \cot(k_c h) \quad (5)$$

Finally, the normal incidence sound absorption coefficient (α_n) is evaluated as:

$$\alpha_n = \frac{4 \operatorname{Re} \left\{ \frac{Z_s}{\rho_0 c_0} \right\}}{\left| \frac{Z_s}{\rho_0 c_0} \right|^2 + 2 \operatorname{Re} \left\{ \frac{Z_s}{\rho_0 c_0} \right\} + 1} \quad (6)$$

Here, c_0 represents the speed of sound in air.

2.3 | Acoustic fibrous material optimisation

The inverse characterisation approach described in reference [36] can be applied to optimise the acoustic performance of fibrous materials. The transport parameters are expressed through a set of analytical equations. The open-cell porosity φ , is evaluated from the fibre's density ρ_s and the apparent density of the material ρ as:

$$\varphi = 1 - \frac{\rho}{\rho_s} \quad (7)$$

The material's airflow resistivity σ can be approximated as a function of porosity φ and the effective radius r_e of an equivalent 2D monodisperse fibrous medium [45,33]:

$$\sigma = \frac{\eta}{(2r_e)^2} \frac{\sqrt{1 - (1 - \varphi)}}{0.21 \left(\frac{0.71}{1 - \varphi} - 3 \sqrt{\frac{0.71}{1 - \varphi}} + 3 - \sqrt{\frac{1 - \varphi}{0.71}} \right)} \quad (8)$$

The remaining transport parameters used in the JCA model can be expressed analytically as functions of porosity φ or the effective radius r_e . The latter is one of the design parameters of the multi-variable function to be optimized. The high-frequency limit of tortuosity α_∞ , is computed using Archie's empirical law based on the material's porosity φ [46]:

$$\alpha_\infty = \left(\frac{1}{\varphi} \right)^\beta = \left(\frac{1}{\varphi} \right)^{0.9574} \quad (9)$$

Although the constant β could be generally considered a variable depending on the microstructure of the fibrous medium, a constant value $\beta = 0.9574$ was assumed, as proven to be suitable for a wide range of fibres independently of their effective radius r_e [36]. The scale-of-pores geometrical quantities representing viscous Λ and thermal Λ' characteristic lengths are determined using empirical equations proposed by Pompoli [13].

$$\Lambda = A_1 r_e (1 - \varphi)^{-A_2} \quad (10)$$

$$\Lambda' = A_3 r_e (1 - \varphi)^{-A_4} \quad (11)$$

The unknown coefficients, denoted as A_i (with $i = 1, 2, 3, 4$) along with the effective radius r_e , serve as the optimization design variables to be determined by a minimization algorithm. This algorithm calculates the normal incidence sound absorption coefficient using the JCA model, with the transport parameters expressed through Eqs. (7) to (11). The primary goal of this optimization is to determine this set of design variables $x = \{r_e, A_1, A_2, A_3, A_4\}$, that minimizes an objective function, $F(x)$. This function is defined based on the normalised difference between the experimentally measured normal incidence sound absorption coefficients $\alpha_{n,exp}$ and those predicted by the JCA model $\alpha_{n,JCA}$, averaged over m frequency lines and n investigated densities.

$$F(x) = \sum_{i=1}^n \frac{1}{m} \sum_{l=1}^m \frac{1}{m} |\alpha_{n,exp,i,l} - \alpha_{n,JCA,i,l}| \quad (12)$$

The minimisation of the objective function given in Eq. (12) defines the design variable x and thus the transport parameters required as input data by the JCA model, expressed as a function of the material density.

Using the transport parameter density functions determined through this inverse characterization approach, we can predict the acoustic performance of porous materials. Through the Transfer Matrix Method (TMM) [47], the sound absorption coefficient can be evaluated whether the material is standalone or integrated within a multilayer system, such as with an air cavity or a screed layer. TMM is a widely used approach for investigating plane wave propagation in laterally infinite multilayer structures. These structures can encompass various media, including equivalent fluid, elastic, and poro-

lastic materials, as well as porous or impervious screens and resonators. The TMM framework considers an acoustic plane wave incident at an angle θ on the system being investigated, with the system backed by a rigid, reflective wall termination. The sound absorption coefficient is then computed as:

$$\alpha(\theta) = 1 - \left| \frac{Z_s(\theta) \cos \theta - \rho_0 c_0}{Z_s(\theta) \cos \theta + \rho_0 c_0} \right|^2 \quad (13)$$

As expressed by Eq. (13), the surface impedance Z_s , thus the sound absorption coefficient α , depend upon the angle of incidence θ of the impinging plane wave. The diffuse field sound absorption coefficient can be approximated as:

$$\alpha_d = \frac{\int_0^{\pi/2} \alpha(\theta) \cos \theta \sin \theta d\theta}{\int_0^{\pi/2} \cos \theta \sin \theta d\theta} \quad (14)$$

The TMM assumes laterally infinite media, leading to potential deviations when comparing predicted results with experimental sound absorption coefficients (measured according to ISO 354). However, the accuracy of the TMM approach can be improved by introducing the finite-size radiation impedance to airborne excitation $Z_R(\theta)$ [48–51] when computing the diffuse field incidence sound absorption coefficient:

$$\alpha_{d,f} = \frac{\int_0^{\pi/2} \frac{4\Re\{Z_s(\theta)\}}{|Z_s(\theta) + Z_R(\theta)|^2} \sin \theta d\theta}{\int_0^{\pi/2} \cos \theta \sin \theta d\theta} \quad (15)$$

3 | Optimisation examples

3.1 | Jute fibre

This study focused on developing two sound-absorbing panels made from jute fibre for indoor applications. The first is a 40 mm thick panel for wall-mounting applications, and the second is a thinner panel (20 mm) designed for false suspended ceilings with an air cavity. These panels were manufactured in India using jute fibres and natural latex as a binder.

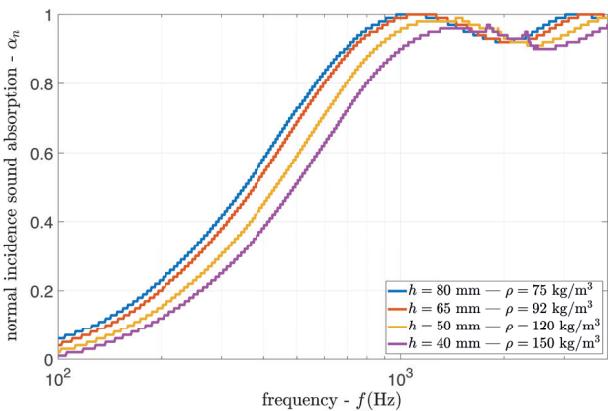


Fig. 3 – Normal incidence sound absorption coefficient: experimental measurement on various combinations of thickness and density

Coefficiente di assorbimento acustico per incidenza normale: misure sperimentale su diverse combinazioni di spessore e densità

Jute fibres are sourced from *Corchorus Capsularis* plants, a species of the Malvaceae family, abundant in the eastern monsoon regions. The production process, which utilizes natural latex as a binder, results in a 100% biodegradable panel. The acoustic design process for both panels started from the experimental characterisation of a small quantity of loose fibres. We used an impedance tube to measure the normal incidence sound absorption as the material was progressively compressed, as described in Section 2.1. The experimental results obtained for different combinations of density and thickness are shown in Fig. 3.

From the experimental results, we derived the transport parameters required by the JCA equivalent dissipative fluid model, expressed as density functions, using the inverse characterisation approach detailed in Section 2.3. Table 1 presents the calculated physical parameters for densities ranging from 120 to 240 kg/m³.

Tab. 1 – Transport parameters obtained from jute loose fibres as a function of the sample density though inversion characterization

Parametri di trasporto ricavati con metodo di inversione dalle misure sulle fibre sciolte di juta in funzione della densità

ρ [kg/m ³]	φ [-]	σ [kNs/m ⁴]	α_∞ [-]	Λ [μm]	Λ' [μm]
120	0.91	15.9	1.10	65	133
140	0.89	21.1	1.12	50	123
160	0.88	27.3	1.13	39	115
180	0.86	34.8	1.15	32	108
200	0.85	43.7	1.17	27	102
220	0.83	54.3	1.19	23	97
240	0.82	66.8	1.22	19	93

Using the TMM approach, including the diffuse field assumption and the finite-size correction proposed by Rhazi et al. [49] (as described in Section 2.3), we estimated the diffuse incidence sound absorption performance of the two systems, for various combinations of panel thickness, density (and optional air cavity). The estimation directly correlates with results experimentally obtainable in a reverberation chamber. The primary objective of this optimisation, requested by Hubub ApS, was to develop the two systems capable of achieving Class A performance ($\alpha_w \geq 0.90$) according to ISO 11654. The entire optimization procedure was rigorously validated through experimental tests performed on 10.8 m² panels in a reverberation chamber in accordance with ISO 354. Table 2 presents the computed α_w values at different densities, for both analysed systems. The optimisation goal was to identify the optimal density that would enable the target acoustic performance ($\alpha_w \geq 0.90$), while meeting the client's specified panel thickness requirements (driven by commercial and production requirements).

As shown in Table 2, achieving Class A performance requires specific minimum densities for each panel configuration. For the 40 mm wall-mounted solution, a minimum density of 220 kg/m³ is necessary. Conversely, the 20 mm panel

combined with a 200 mm air cavity demands a lower minimum density of 160 kg/m³.

Tab. 2 – Predicted α_w as a function of the fibrous panel density in the wall-flush mounting and suspended ceiling configurations: jute fibres

Valori calcolati di α_w in funzione della densità dei pannelli per configurazione a parete e controsoffitto: fibre di juta

ρ [kg/m ³]	$\alpha_{w,40\text{mm}}$ (wall-panel)	ρ [kg/m ³]	$\alpha_{w,20/200\text{mm}}$ (false ceiling)
160	0.80	120	0.80
180	0.85	140	0.85
200	0.85	160	0.90
220	0.90	180	0.90
240	0.90	200	0.90

Fig. 4 presents the computed diffuse incidence sound absorption coefficient in octave band spectra, for the 40 mm panel at different densities. This figure also details the α_w calculation reference curves (dotted black lines), specified in ISO 11652.

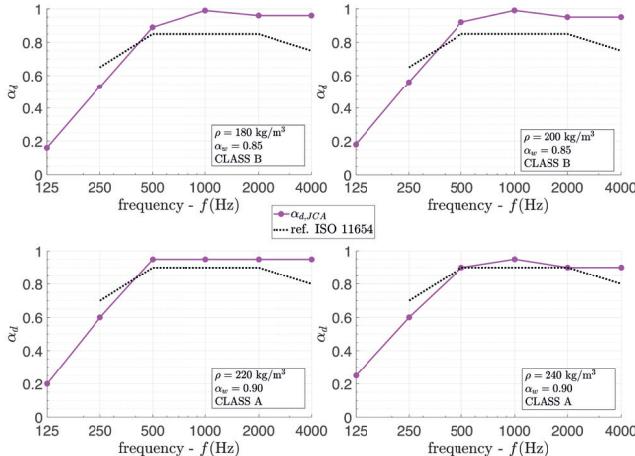


Fig. 4 – Evaluation of α_w for wall-flush mounted 40 mm panels of different densities from the octave band sound absorption coefficient computed through the analytical model.

Calcolo di α_w per pannelli di 40 mm di diverse densità dalle curve in bande di ottava del coefficiente di assorbimento acustico stimato con metodo analitico

For the investigated systems, the weighted sound absorption coefficient α_w is primarily governed by the acoustic performance at frequencies below 250 Hz, as clearly illustrated in Fig. 4 for the 40 mm panel across various densities. Consequently, increasing the panel's density while keeping its thickness constant effectively enhances low-frequency absorption, allowing an $\alpha_w \geq 0.90$ value to be achieved. Based on these findings, we selected densities of 220 kg/m³ for the 40 mm wall-mounted solution and 160 kg/m³ for the 20 mm panel with a 200 mm air cavity in the suspended ceiling configuration.

Panels manufactured according to these specifications were subsequently tested in a reverberation chamber. Fig. 5 presents the experimental results for diffuse incidence sound absorption (in one-third octave bands), comparing them di-

rectly with the TMM calculated results. This comparison reveals a remarkable agreement between our computed results and the experimental sound absorption coefficient. Minor differences at high frequencies are attributed to the experimental approach outlined in ISO 354.

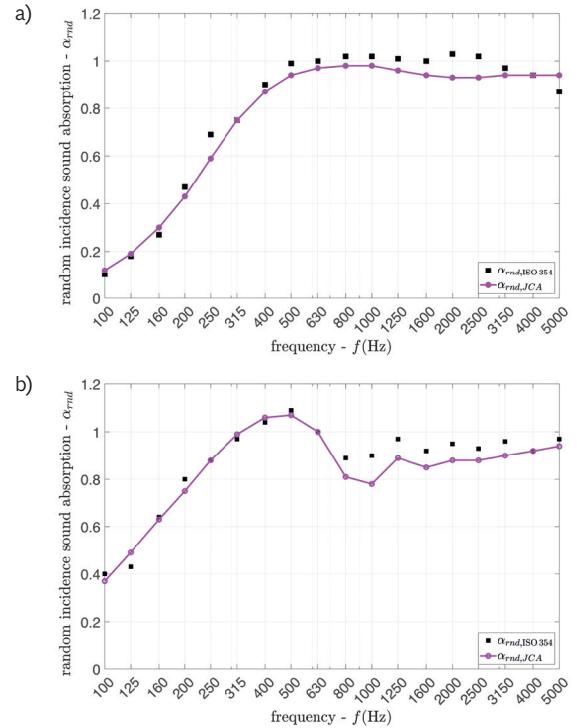


Fig. 5 – Diffuse incidence sound transmission coefficient: comparison between experimental and predicted results – a) 40 mm panels (wall configuration, density 220 kg/m³); b) 20 mm panels with 200 mm air cavity (suspended ceiling configuration, density 160 kg/m³)

Coefficiente di assorbimento acustico per incidenza diffusa: confronto tra i risultati sperimentali e quelli previsionali – a) pannelli da 40 mm (soluzione a parete, densità 220 kg/m³); b) pannelli da 20 mm (con intercapedine da 200 mm, densità 160 kg/m³)

3.2 | Posidonia fibre

This study on Posidonia fibres stems from the urgent need to find a sustainable use for a material currently classified as special waste, with disposal incurring significant costs for coastal municipalities. These materials, scientifically known as aegagropiles, appear as ellipsoidal agglomerations of fibres, shown in Fig. 6 (a). They are formed from the fraying leaves of Posidonia oceanica, which macerate in seawater until the fibres are released and then aggregated by wave action. Posidonia oceanica is an aquatic plant, endemic to the Mediterranean Sea, belonging to the Posidoniaceae family (monocotyledon angiosperms). It forms extensive meadows on sandy seabed near coastlines. This research [13] aimed to investigate the feasibility of using loose fibres obtained from Posidonia agglomerations to create sound-absorbing panels. To this end, we extracted loose fibres from the aegagropiles and evaluated their physical and acoustic characteristics across a range of densities (as described in Section 2.1). The Posidonia fibres investigated in this research were

collected from aegagropiles harvested on sandy beaches of Southern Sardinia. To ensure the removal of any residual moisture, they were left to sun-dry for several days. The fibres were manually separated from the aegagropiles, with any internal sand meticulously removed via sieving. Cylindrical samples, obtained from clean fibres were experimentally tested, as shown in Fig. 6 (b), measuring the normal incidence sound absorption coefficient, in accordance with the ISO 10534-2, by progressively compressing the sample to investigate a range of densities.



Fig. 6 – Posidonia oceanica fibres: a) Aegagropiles deposited on the beach by the sea; b) Fibrous sample tested in the laboratory
Fibre di Posidonia oceanica: a) Egagropili depositate dal mare sulla spiaggia; b) campione fibroso testato in laboratorio

The transport parameters required by the JCA model to analyse Posidonia fibres as a function of the material density were obtained from the experimental normal incidence sound absorption coefficient, as described in Section 2.3. Moreover, to further validate the inverse characterisation approach open porosity φ and airflow resistivity σ were experimentally measured, respectively according to the air volume compression method [17] and to the standard ISO 10534-2. The porosity was experimentally evaluated only for a given apparent density ρ and then extended across the considered range using Eq. (7) by knowing the fibre density $\rho_s = 1518 \text{ kg/m}^3$. On the other hand, the airflow resistivity was measured for different densities obtained by progressively compressing the tested sample of loose fibres, to further validate the approach described in Section 2.3. The other physical parameters, namely the tortuosity α_∞ and the viscous and thermal characteristic lengths Λ and Λ' were obtained for each investigated density through a well-known inversion approach [29].

Fig. 7 presents a comparison of the density-dependent curves for the transport parameters evaluated using JCA modelling, alongside values obtained either experimentally or through other well-established inversion methodologies. In both cases, a good consistency among the different analysed methods is observed.

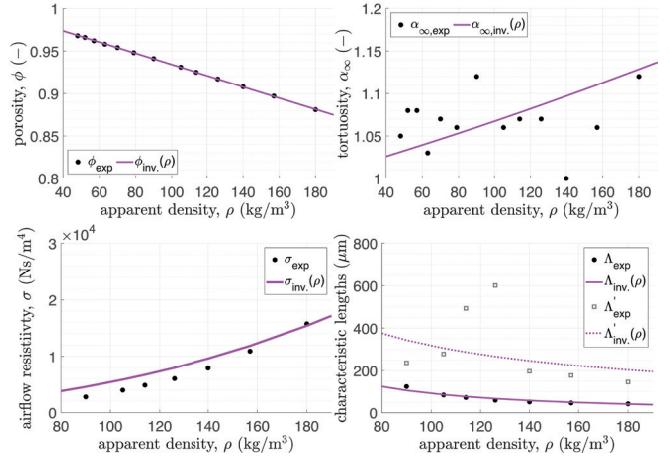


Fig. 7 – Posidonia oceanica fibres: transport parameters used by the JCA model as a function of the material density
Fibre di Posidonia oceanica: parametri di trasporto del modello JCA al variare della densità del materiale.

Fig. 8 further illustrates our findings by providing a comparison, in one-third octave bands, between experimental measurements of normal incidence acoustic absorption performed on samples at different compression ratios and results obtained from the JCA analytical model. Moreover, Table 3 compares the simulated weighted sound absorption coefficients α_w of Posidonia oceanica panels, with a thickness of 40 mm and 50 mm, at different densities. This comparison clearly demonstrates that Posidonia oceanica, a sustainable material, when compressed to an adequate density, can be effectively employed as a sound-absorbing material in its loose fibre form, offering acoustic performance able to reach a Class A rating comparable to traditional solutions.

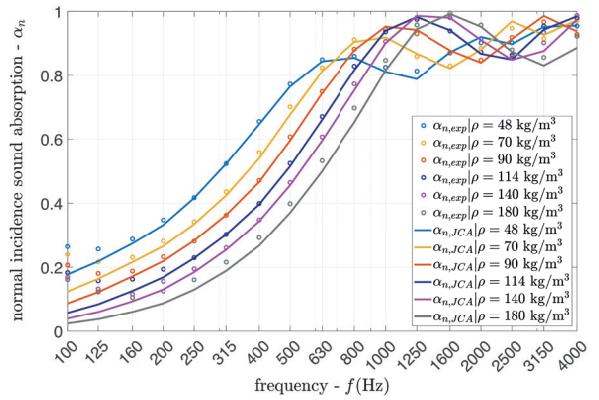


Fig. 8 – Posidonia acoustic performance, comparison between predicted and experimental results
Prestazioni acustiche fibre di Posidonia, confronto tra dati previsionali e sperimentali

Tab. 3 – Predicted α_w as a function of the fibrous panel density computed from TMM predictions: Posidonia fibres

Valori calcolati di α_w in funzione della densità dei pannelli: valori calcolati con TMM: fibre di posidonia

ρ [kg/m ³]	50	100	150	200	250
$\alpha_{w,40mm}$	0.65	0.75	0.75	0.8	0.85
Class	C	C	C	B	B
$\alpha_{w,50mm}$	0.70	0.85	0.90	0.95	1.00
Class	C	B	A	A	A

3.3 | Hemp fibre

Although several studies exist regarding the acoustic characterization of natural fibres, as detailed in the introduction of this paper, there is a notable lack of correlation with fibre type or geometry, and limited detail on the specific processing and chemical treatments involved in their production. This motivated a study investigating how different production processes can affect the acoustic properties of hemp fibres [11], ultimately aiming for their optimization. The experimental analysis was conducted on loose, binder-free hemp fibres (*Cannabis Sativa* var. 'Lipko') obtained through four consecutive processes: mechanical carding (1.CAR), alkaline treatment with NaOH (5% 1h) (2.NaOH), mechanical wide-tooth combing (3.WTC), mechanical fine-tooth combing (4.FTC). As an example, Fig. 9 shows Scanning Electron Microscope (SEM) images of the hemp fibres after different processing treatments.

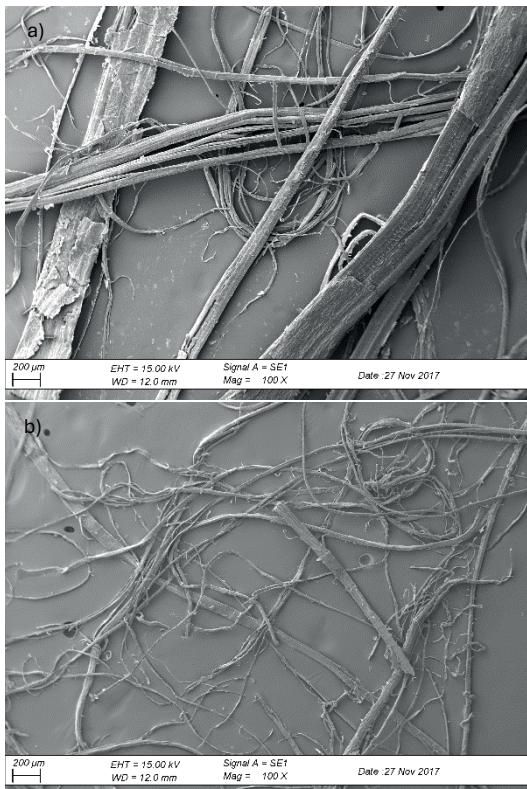


Fig. 9 – SEM images of the hemp fibers at different processing stages: a) first processing stage (1.CAR); b) Final processing stage (4.FTC)

Immagine al SEM delle fibre di canapa: a) primo processo di lavorazione (1.CAR); b) ultimo processo di lavorazione (4.FTC)

While SEM images are typically used to determine fibre diameter distribution, natural fibres, like hemp, often show high variability, as demonstrated in Fig. 9. For this reason, an alternative approach to characterise the size of hemp fibres obtained after each process is through the effective radius r_e introduced in Eq. (8). To this purpose, for each processing stage, we tested loose hemp fibres in an impedance tube to measure their normal incidence sound absorption. We did this by progressively increasing their compression ratios, following the methodology described in Section 2.1. Fig. 10 illustrates the normal incidence sound absorption coefficient as a function of the apparent density of the fibrous samples after the different processes. This shows that, regardless of the process, compressing the samples significantly influences the measured sound absorption. However, the acoustic performance also heavily depends on the fibre's characteristics, which are directly related to the specific treatment each material underwent. To highlight this, Fig. 11 compares the normal incidence sound transmission coefficients measured on samples from each process at the same density.

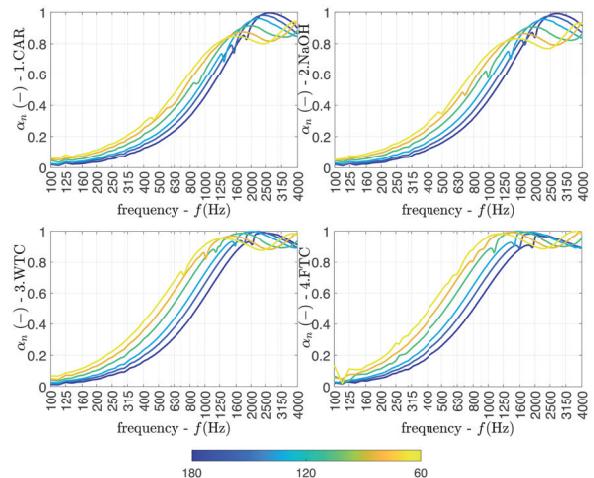


Fig. 10 – Hemp acoustic performance: experimental normal incidence sound absorption coefficient after different processes as a function of the material density

Prestazioni acustiche fibre di Canapa: coefficiente di assorbimento acustico per incidenza normale misurato a varie densità dopo i diversi trattamenti

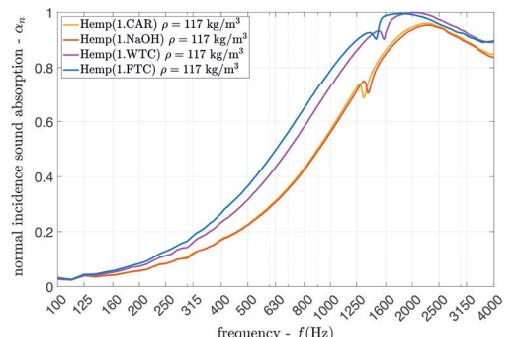


Fig. 11 – Hemp acoustic performance: experimental normal incidence sound absorption coefficient after the different processes on samples with density 117 kg/m³

Prestazioni acustiche fibre di Canapa: coefficiente di assorbimento acustico per incidenza normale misurato dopo i diversi trattamenti su provini con densità apparenza pari a 117 kg/m³

Based on these experimental datasets, we estimated the transport parameters for each type of hemp fibre as a function of material density by applying the inverse characterization approach described in Section 2.3. As Fig. 12, illustrates, the physical parameters vary according to density consistently with our experimental sound absorption coefficient observations. Fig. 12 displays only the airflow resistivity and the viscous and thermal characteristic lengths. Porosity and tortuosity are not shown as they are not significantly influenced by the processing method; they primarily depend on fibre density and the sample's compression ratio, as expressed in Eqs. (7) and (9). It is noteworthy that the alkaline treatment (2.NaOH), which follows the carding process (1.CAR), has a limited influence on both acoustic performance and the physical parameters. Conversely, the mechanical combing treatments (both 3.WTC and 4.FTC) significantly improve the fibrous material's acoustic performance. This behaviour is consistently reflected in the physical parameters, showing an increase in airflow resistivity (due to a reduction in fibre diameter) and a corresponding reduction in the characteristic lengths. These density-dependent transport parameters, evaluated for different hemp fibre types, can be used to optimize panel density to meet specific acoustic requirements, as illustrated in Section 3.1.

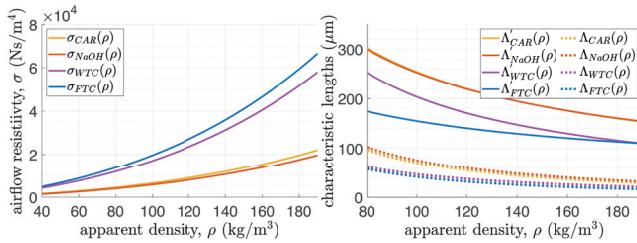


Fig. 12 – Physical parameters obtained for Hemp fibres as a function of the density: a) airflow resistivity; b) viscous and thermal characteristic lengths

Parametri fisici ottenuti per le fibre di Canapa in funzione della densità: a) resistenza al flusso; b) lunghezze caratteristiche termica e viscosa

Table 4 compares the computed weighted sound absorption coefficients α_w of 40 mm thick hemp fibre panels, at different densities, after each processing stage: 1.CAR, 2.NaOH,

Tab. 4 – Predicted α_w as a function of the fibrous panel density computed from TMM predictions: hemp fibres

Valori calcolati di α_w in funzione della densità dei pannelli: valori calcolati con TMM: fibre di canapa

ρ [kg/m³]	50	100	150	200
$\alpha_{w,40mm,1.CAR}$	0.65	0.75	0.75	0.80
Class	C	C	C	B
$\alpha_{w,40mm,2.NaOH}$	0.65	0.75	0.75	0.80
Class	C	C	C	B
$\alpha_{w,40mm,3.WTC}$	0.75	0.80	0.85	0.90
Class	C	B	B	A
$\alpha_{w,40mm,4.FTC}$	0.75	0.80	0.90	0.90
Class	C	B	A	A

3.WTC, and 4.FTC. This comparison clearly demonstrates that hemp fibres are a valuable alternative to traditional sound-absorbing materials, offering acoustic performance that can achieve a Class A rating when processed and compressed adequately.

3.4 | Recycled fibre mixture

The automotive industry is increasingly using sound-absorbing components made from recycled fibre mixtures; a shift is driven by a need to cut costs and reduce the environmental footprint of vehicle production. These fibres often come from various industrial waste streams, such as recycled PET plastics or textile industry scraps. By varying percentages of coarser and finer fibres it is possible to optimise the acoustic and structural properties of the final component, tailored for specific applications. For instance, using larger diameter fibres results in stiffer components with enhanced load-bearing capacity. Conversely, incorporating finer fibres significantly improves the component's acoustic absorption performance. Typically, fibre mixtures are bound together by a specific type of fibre that, when heat-treated, undergoes localized fusion. This process creates mechanical connections between the fibres, forming a cohesive panel. The characteristics of each single type of fibre involved in the mixture and its percentage significantly affect the acoustic performance of the final product.

As presented in ref. [52], to accurately assess the acoustic properties of a fibre mixture from its composition and the characteristics of its loose constituent fibres, the equivalent density of the mixture (ρ_{mix}) is calculated as the weighted average of the density of each i^{th} individual fibre type ($\rho_{f,i}$), based on its percentage by weight (X_i):

$$\rho_{mix} = \frac{1}{\sum_{i=1}^n X_i \rho_{f,i}} \quad (16)$$

Similarly, an equivalent effective radius for the mixture $r_{e,mix}$ can be computed from the effective radius of each fibre type $r_{e,i}$ within the blend.

$$r_{e,mix} = \sqrt{\frac{1}{\rho_{mix} \sum_{i=1}^n X_i \rho_{f,i} r_{e,i}^2}} \quad (17)$$

From Eq. (7), the open porosity of the fibre mixture φ_{mix} can be determined using its density ($\rho_s = \rho_{mix}$). The airflow resistivity of the fibre mixture σ_{mix} depends on the mixture's effective radius $r_{e,mix}$ and its porosity φ_{mix} , as expressed in Eq. (8). The tortuosity $\alpha_{\infty,mix}$ only depends on the latter parameter, as given in Eq. (9). Consistently, equivalent values of the viscous and thermal characteristic lengths must be determined. While the most straightforward approach would suggest computing the arithmetic average of the values obtained for each fibre, this method has proven to be inaccurate. Therefore, the coefficients $A_{i,mix}$ required to determine the viscous characteristic

length Λ_{mix} and thermal characteristics lengths Λ'_{mix} of the mixture, given in Eqs. (10) and (11), are evaluated from the coefficients of the loose fibres involved in the mixture, considering their percentage weight w_i :

$$A_{i,mix} = \frac{\sum_{i=1}^n w_i A_i}{\sum_{i=1}^n w_i} \quad (18)$$

As an example, the proposed methodology is applied to three different kind of fibres mixtures, taken from the work presented by Santoni et al. [52]. It should be noted that in the original work the loose fibres were modelled through the JCAL equivalent fluid model, and a different approach was adopted to characterise the required transport parameters, based on the experimental evaluation of the airflow resistivity at different compression ratios. The results presented in this paper, are obtained by characterising the loose fibres through the method described in Section 2, based on the experimental normal incidence sound absorption coefficient measured at different compression ratios and the JCA equivalent fluid model. The three considered mixtures m_a , m_b , and m_c are composed by six different recycled fibres which can be grouped in three different categories:

- PES (polyester) synthetic fibres, obtained from the made by recycling post-consumer plastic. PET (polyethylene terephthalate) is the most common polyester resin, primarily recycled from water bottles melted and re-extruded with different diameters. Loose fibres lf_A , lf_B (PES) lf_C , lf_D (PET).
- Cotton fibres (Cot), obtained from the mechanical recycling of textiles to be reused, coming from different supply chains (e.g., used clothing or industrial processes). In this case, the variability in the origin of the materials results in a wide variability in fibre size. Loose fibre lf_E .
- Bicomponent fibres (BiCo), used for the thermal bonding of fibres thanks to the presence of two coaxial layers of material with different melting points. When an intermediate temperature is reached during the thermal treatment of the mixture, the outer part of the fibre melts and bonds all the fibres together, providing mechanical stability to the component. Typically, this component can vary between 15% and 50%, depending on the mechanical properties desired for the panel. Loose fibre lf_F .

Table 5 provides the characteristics of the different loose fibres, including the nominal dtex (a commonly used unit expressing the fibre mass in grams per 10.000 meters of yarn),

Tab. 5 – Loose fibres characteristics and mixtures composition
Caratteristiche delle fibre sciolte e composizione delle miscele

Loose fibre		dtex	ρ_f	r_e	Fibre Mixture		
Id	type	g/10km	kg/m ³	μm	W_{m_a}	W_{m_b}	W_{m_c}
lf_A	PES ₁₁	1.1	1370	7	–	35%	–
lf_B	PES ₂₈	28.0	1370	35	–	10%	–
lf_C	PET ₁₅	1.5	1370	9	20%	–	–
lf_D	PET ₂₅	25.0	1370	37	30%	–	–
lf_E	Cot	2.0	1500	12	5%	35%	83%
lf_F	BiCo	4.4	1370	16	45%	20%	17%

the density ρ_f provided by the producer, and the effective radius r_e determined through the inversion characterisation approach described in Section 2.

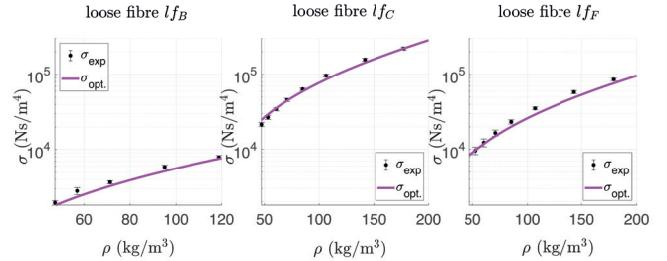


Fig. 13 – Comparison between experimental airflow resistivity measured on loose fibre at different density and the optimised density-function computed from Eq. (8)

Confronto tra la resistività al flusso sperimentale misurata su fibre sciolte a diverse densità e la curva funzione della densità calcolata con l'Eq. (8)

To evaluate the accuracy of this approach in characterizing these kinds of fibres, Fig. 13 compares the airflow resistivity density-function, computed according to Eq. (8), with the experimental results measured according to the standard ISO 9053-2 [16]. The experimental results, provided with error bars representing the associated standard deviation, were averaged over ten measurements at different compression rates. A generally good agreement can be observed between the experimental airflow resistivity values and the analytical curves. The slight underestimation of the airflow resistivity obtained from the analytical model can be associated with an overestimate of the effective radius due to the model's assumptions.

Additionally, Fig. 14 compares the experimental normal incidence sound absorption coefficient with the analytical results computed with the JCA model for different densities.

This comparison highlights a good approximation of the experimental results even though the investigated loose fibre samples exhibited a resonance that cannot be accounted for by the JCA model. To overcome this issue, the frequency range affected by the resonance was excluded from the optimization used to evaluate the fibres' transport parameters.

Finally, in Fig. 15 the experimental normal incidence sound absorption coefficients of three different fibre mixtures are compared to the analytical results computed using the JCA equivalent fluid model. The transport parameters used as input data in the JCA model are estimated from the parameters associated with the loose fibres employed in the mixture, as expressed in Eqs. (16) to (18). The results are plotted as a shaded area, representing the uncertainty associated with either the experimental measurements or the analytical results, related to the variation in sample density and thickness. A good approximation can generally be achieved by the adopted model, although it should be noted that accuracy decreases at higher densities, where the computed sound absorption slightly underestimates the experimental values. Nevertheless, this approach might represent a handy tool to design fibre mixtures, even in the automotive industry, where recycled

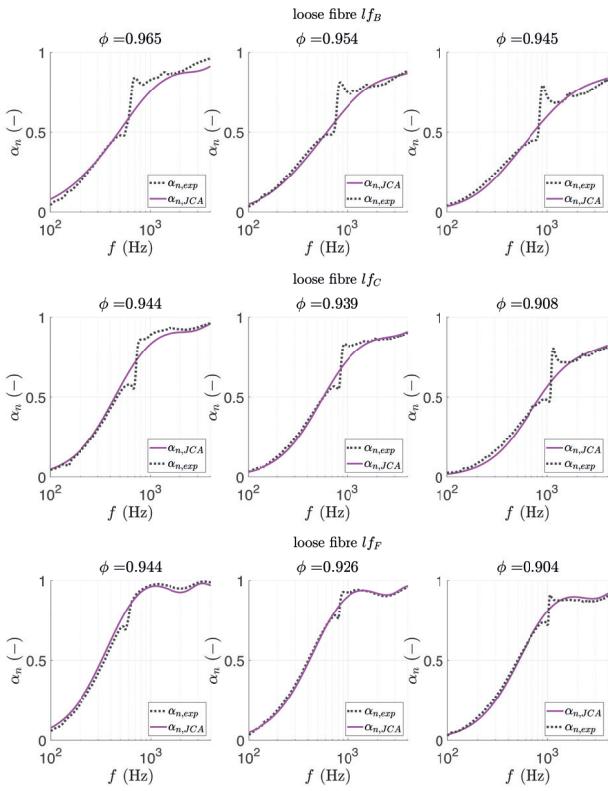


Fig. 14 – Comparison between experimental and analytical normal incidence sound absorption coefficient for different types of recycled loose fibres at various densities

Confronto tra il coefficiente di assorbimento acustico per incidenza normale sperimentale e calcolato analiticamente per diversi tipi di fibre sciolte riciclate a varie densità

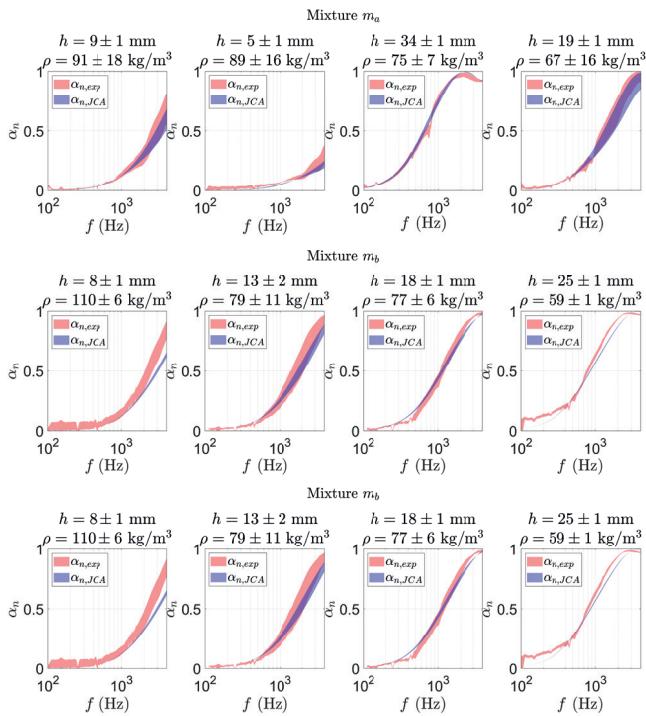


Fig. 15 – Comparison between experimental and analytical normal incidence sound absorption coefficient for different mixtures of recycled fibres at various densities

Confronto tra il coefficiente di assorbimento acustico per incidenza normale sperimentale e calcolato analiticamente per diverse miscele di fibre riciclate a varie densità

fibres are generally employed in fibre mixtures for acoustic treatments at high compression ratios. Although predictions might slightly underestimate the mixture's sound-absorbing performance, they predict the trend of the sound absorption coefficient with satisfying accuracy, as demonstrated by the results provided in Fig. 15.

3.5 | Discussion

Table 6 summarises and compares the acoustic properties of the different presented fibres, providing the key characteristics, such as fibre density, effective radius, and optimized coefficients for seven distinct fibres.

Tab. 6 – Density, effective radius and optimised coefficients of different types of sustainable fibres

Densità, raggio effettivo e coefficienti ottenuti dall'ottimizzazione per diverse tipologie di fibre sostenibili

Fibre	ρ_f kg/m ³	r_e μm	A_1	A_2	A_3	A_4
Jute	1300	26.2	0.039	1.739	1.481	0.518
Posidonia	1518	33.6	0.065	1.372	1.209	0.755
Hemp _{FTC}	1300	20.1	0.050	1.449	1.965	0.533
PES ₂₈	1370	34.9	0.274	0.993	0.630	0.919
PET ₁₅	1370	9.4	0.252	0.963	1.484	0.459
Cot	1500	12.0	0.237	0.995	0.418	0.839
BiCo	1370	16.2	0.212	0.993	1.937	0.469

To better illustrate the effect of these physical characteristics on transport parameters, the airflow resistivity density functions for the seven fibres are compared in Fig. 16. This comparison reveals that synthetic and textile fibres (i.e., PET₁₅, Cot, and BiCo) generally have a higher airflow resistivity than natural fibres (e.g., Posidonia and Jute) at a given density, due to their smaller radii. However, there are some exceptions. When synthetic fibres are designed with a larger diameter (i.e., PES₂₈), their airflow resistivity becomes comparable to that of natural fibres. Furthermore, while the dimensions of natural

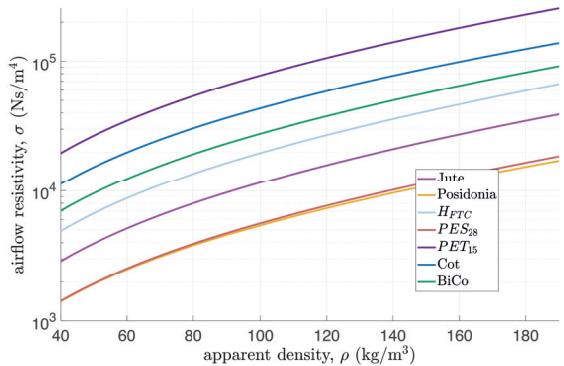


Fig. 16 – Density-dependent airflow resistivity evaluated for different kind of fibres

Resistività al flusso determinata in funzione della densità per diverse tipologie di fibre

fibres cannot be precisely designed, their acoustic properties can be optimized through specific manufacturing processes, as demonstrated by the Hemp_{CAR} sample, which achieved an airflow resistivity similar to traditional fibrous materials after various treatments.

It is important to note that a higher airflow resistivity does not always translate to better acoustic performance. On the contrary, an excessive increase in material resistivity can lead to a reduction in sound absorption. Therefore, optimal acoustic performance can be achieved with materials having coarser fibres by adjusting their apparent density to modify the transport parameters.

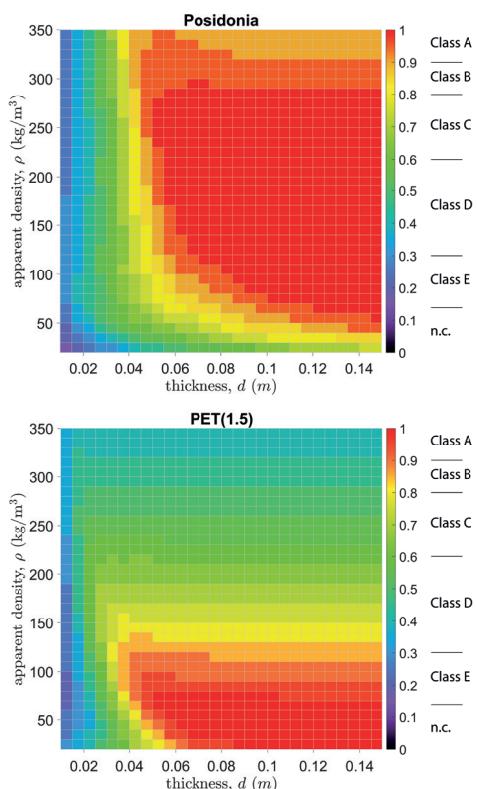


Fig. 17 – Heat map represent the weighted sound absorption coefficient calculated as a function of the density and the thickness for two kinds of fibres: a) Posidonia; b) PET₁₅

Grafico a mappa di calore che rappresenta il coefficiente di assorbimento acustico ponderato calcolato in funzione della densità e dello spessore per due diverse fibre: a) Posidonia; b) PET₁₅

This optimization process is graphically illustrated in Fig. 17, which compares the heat maps of the weighted sound absorption coefficient (α_w) computed as a function of the density and the thickness for Posidonia and PET₁₅ fibres. This comparison clearly shows that both materials can achieve a Class A sound absorption rating with an adequate combination of thickness and apparent density. While the finer PET₁₅ fibres, can achieve a performance $\alpha_w \geq 0.9$ at lower density, they are less suitable for denser panels. In contrast, natural fibres like Posidonia exhibit better performance in denser panels. The graphs in Fig. 17 serve as a useful tool for quickly optimizing the density of sound-absorbing panels for a specific material and thickness.

4 | Applicability considerations

This final section discusses the practical applicability of sustainable fibrous sound-absorbing panels in real-world scenarios. While previous sections have demonstrated that these materials can be engineered to match the acoustic performance of traditional products, their market viability is contingent upon meeting stringent certification requirements. Key among these are fire safety, durability, and low chemical emissions.

A primary challenge is the inherent combustibility of untreated natural fibres. Achieving the necessary fire safety classifications, such as those defined by EN 13501-1 standard [53], requires the integration of fire-retardant treatments. However, common retardants, including halogenated, phosphorus-based, or inorganic compounds, are often synthetic chemicals that pose significant health and environmental risks. Their addition can also alter the fibre's porous structure, potentially affecting acoustic performance, and fundamentally compromise the material's end-of-life advantages by hindering biodegradability and complicating recycling. Nevertheless, industrial and academic research is very active in study solutions to overcome these issues, guaranteeing fire safety without undermining sustainability and acoustic performance of bio-based fibrous materials.

Furthermore, the long-term durability of bio-based panels must be ensured. They are susceptible to degradation from moisture, fungi, and microorganisms, often necessitating additional protective treatments. As mandated by certifications like the CE marking, products must be assessed not only for durability but also for their impact on indoor air quality, particularly the emission of Volatile Organic Compounds (VOCs). Ultimately, the successful commercialisation of sustainable acoustic solutions demands a holistic engineering approach that balances acoustic efficacy with these essential safety, health, and durability standards.

5 | Conclusions

This study successfully demonstrated the effectiveness and efficiency of a combined experimental and analytical methodology for optimizing the acoustic performance of sustainable fibrous materials. By integrating impedance tube measurements on a small amount of loose fibres with an inverse characterisation approach based on the JCA equivalent fluid model, we developed an easily implementable tool that significantly reduces the effort required to characterize the physical properties of fibrous materials.

Four case studies, involving different fibrous materials — jute, posidonia oceanica, hemp, and recycled fibre mixtures — are presented to illustrate the potential of this approach and assess its accuracy and reliability, even when applied to natural or recycled fibres. The results consistently showed that the approach provides a satisfyingly accurate prediction of a material's acoustic behaviour. For jute and hemp fibres, the optimization process successfully identified the ideal den-

sities and processing methods needed to achieve a Class A sound absorption rating, showcasing these sustainable materials as viable alternatives to traditional solutions. Specifically, the study revealed that mechanical combing significantly improves hemp fibre performance. Similarly, the research on posidonia oceanica proved that this material, currently classified as special waste, can be repurposed into an effective and sustainable sound-absorbing product. Finally, the analysis of recycled fibre mixtures demonstrated that the methodology could serve as a valuable design tool for accurately predicting the acoustic properties of complex fibre blends, widely used in the automotive industry, from the knowledge of the physical parameters of their individual components.

This research provides a practical and efficient tool for advancing the use of sustainable materials, fostering a more circular economy. While the model generally provides a good approximation of experimental results, a slight underestimation of sound absorption was noted at higher densities. Future work should focus on further extending the methodology by including a poro-elastic model, ensuring greater accuracy for a wider range of fibrous materials and densities.

Conclusioni

Questo studio ha dimostrato con successo l'efficacia e l'efficienza di una metodologia ibrida, sperimentale e analitica, per l'ottimizzazione delle prestazioni acustiche di materiali fibrosi sostenibili. Integrando le misurazioni nel tubo a impedenza su una piccola quantità di fibre sciolte con un approccio di caratterizzazione inversa basato sul modello a fluido equivalente JCA, abbiamo sviluppato uno strumento di facile implementazione che riduce significativamente lo sforzo richiesto per caratterizzare le proprietà fisiche dei materiali fibrosi.

Vengono presentati quattro casi di studio, che coinvolgono diversi materiali fibrosi –iuta, posidonia oceanica, canapa e miscele di fibre riciclate – per illustrare il potenziale di questo approccio e valutarne l'accuratezza e l'affidabilità, anche se applicato a fibre naturali o riciclate. I risultati hanno mostrato che l'approccio fornisce una previsione sufficientemente accurata del comportamento acustico di un materiale. Per le fibre di iuta e canapa, il processo di ottimizzazione ha identificato con successo le densità ideali e i metodi di lavorazione necessari per raggiungere un coefficiente di assorbimento acustico di Classe A, dimostrando che questi materiali sostenibili sono valide alternative alle soluzioni tradizionali. Nello specifico, lo studio ha rivelato che il processo di pettinatura meccanica migliora significativamente le prestazioni delle fibre di canapa. Allo stesso modo, la ricerca sulla posidonia oceanica ha dimostrato che questo materiale, attualmente classificato come rifiuto speciale, può essere riutilizzato in un prodotto fonoassorbente efficace e sostenibile. Infine, l'analisi delle miscele di fibre riciclate ha evidenziato che la metodologia può essere impiegata come strumento di progettazione per prevedere le proprietà acustiche di miscele di fibre complesse, ampiamente utilizzate nell'industria automobilistica, partendo dalla conoscenza dei parametri fisici dei loro singoli componenti.

Questa ricerca fornisce uno strumento pratico ed efficiente per promuovere l'uso di materiali sostenibili, favorendo l'economia più circolare. Sebbene il modello fornisca generalmente una buona approssimazione dei risultati sperimentali, è stata notata una leggera sotto- stima dell'assorbimento acustico nei materiali a densità più elevate.

Lo sviluppo futuro dovrebbe concentrarsi sull'ulteriore estensione della metodologia includendo un modello poro-elastico, garantendo una maggiore precisione per una più ampia gamma di materiali fibrosi e densità considerate.

Bibliography

- [1] F. Asdrubali, S. Schiavoni, K.V. Horoshenkov, A Review of Sustainable Materials for Acoustic Applications, *Building Acoustics* 19 (2012) 283–311. <https://doi.org/10.1260/1351-010X.19.4.283>.
- [2] F. Asdrubali, F. D'Alessandro, S. Schiavoni, A review of unconventional sustainable building insulation materials, *Sustainable Materials and Technologies* 4 (2015) 1–17. <https://doi.org/10.1016/j.susmat.2015.05.002>.
- [3] J. Zach, J. Hroudová, A. Korjenic, Environmentally efficient thermal and acoustic insulation based on natural and waste fibers: Environmentally efficient insulations based on natural and waste fibers, *J. Chem. Technol. Biotechnol.* 91 (2016) 2156–2161. <https://doi.org/10.1002/jctb.4940>.
- [4] D. Kumar, M. Alam, P.X.W. Zou, J.G. Sanjayan, R.A. Memon, Comparative analysis of building insulation material properties and performance, *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 131 (2020) 110038. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2020.110038>.
- [5] S. Islam, G. Bhat, Environmentally-friendly thermal and acoustic insulation materials from recycled textiles, *Journal of Environmental Management* 251 (2019) 109536. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2019.109536>.
- [6] F. Ye, H. Wei, Y. Xiao, U. Berardi, G. Quaranta, C. Demartino, Bio-based insulation materials in sustainable constructions: A review of environmental, thermal and acoustic insulation, durability, and mechanical performances, *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 223 (2020) 115872. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2020.115872>.
- [7] P. Glé, E. Gourdon, L. Arnaud, Acoustical properties of materials made of vegetable particles with several scales of porosity, *Applied Acoustics* 72 (2011) 249–259. <https://doi.org/10.1016/j.apacoust.2010.11.003>.
- [8] U. Berardi, G. Iannace, Acoustic characterization of natural fibers for sound absorption applications, *Building and Environment* 94 (2015) 840–852. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2015.05.029>.
- [9] K.H. Or, A. Putra, M.Z. Selamat, Oil palm empty fruit bunch fibres as sustainable acoustic absorber, *Applied Acoustics* 119 (2017) 9–16. <https://doi.org/10.1016/j.apacoust.2016.12.002>.
- [10] A. Putra, K.H. Or, M.Z. Selamat, M.J.M. Nor, M.H. Hassan, I. Prasetyo, Sound absorption of extracted pineapple-leaf fibres, *Applied Acoustics* 136 (2018) 9–15. <https://doi.org/10.1016/j.apacoust.2018.01.029>.
- [11] A. Santoni, P. Bonfiglio, P. Fausti, C. Marescotti, V. Mazzanti, F. Mollica, F. Pompoli, Improving the sound absorption performance of sustainable thermal insulation materials: Natural hemp fibres, *Applied Acoustics* 150 (2019) 279–289. <https://doi.org/10.1016/j.apacoust.2019.02.022>.
- [12] P. Soltani, E. Taban, M. Faridan, S.E. Samaei, S. Amininasab, Experimental and computational investigation of sound absorption performance of sustainable porous material: Yucca Gloriosa fiber, *Applied Acoustics* 157 (2020) 106999. <https://doi.org/10.1016/j.apacoust.2019.106999>.

- [13] F. Pompoli, Acoustical Characterization and Modeling of Sustainable Posidonia Fibers, *Applied Sciences* 13 (2023) 4562. <https://doi.org/10.3390/app13074562>.
- [14] ISO 10534-2: Acoustics — Determination of acoustic properties in impedance tubes Part 2: Two-microphone technique for normal sound absorption coefficient and normal surface impedance, (2023).
- [15] ISO 9053-1: Acoustics — Determination of airflow resistance Part 1: Static airflow method, (2018).
- [16] ISO 9053-2: Acoustics — Determination of airflow resistance. Part 2: Alternating airflow method, (2020).
- [17] Y. Champoux, M.R. Stinson, G.A. Daigle, Air-based system for the measurement of porosity, *The Journal of the Acoustical Society of America* 89 (1991) 910–916. <https://doi.org/10.1121/1.1894653>.
- [18] P. Leclaire, O. Umnova, K.V. Horoshenkov, L. Maillet, Porosity measurement by comparison of air volumes, *Review of Scientific Instruments* 74 (2003) 1366–1370. <https://doi.org/10.1063/1.1542666>.
- [19] Y. Salissou, R. Panneton, Pressure/mass method to measure open porosity of porous solids, *Journal of Applied Physics* 101 (2007) 124913. <https://doi.org/10.1063/1.2749486>.
- [20] R.J.S. Brown, Connection between formation factor for electrical resistivity and fluid – solid coupling factor in Biot's equations for acoustic waves in fluid – filled porous media, *GEOPHYSICS* 45 (1980) 1269–1275. <https://doi.org/10.1190/1.1441123>.
- [21] D.L. Johnson, T.J. Plona, C. Scala, F. Pasierb, H. Kojima, Tortuosity and Acoustic Slow Waves, *Phys. Rev. Lett.* 49 (1982) 1840–1844. <https://doi.org/10.1103/PhysRevLett.49.1840>.
- [22] J.F. Allard, B. Castagnede, M. Henry, W. Lauriks, Evaluation of tortuosity in acoustic porous materials saturated by air, *Review of Scientific Instruments* 65 (1994) 754–755. <https://doi.org/10.1063/1.1145097>.
- [23] Ph. Leclaire, L. Kelders, W. Lauriks, M. Melon, N. Brown, B. Castagnède, Determination of the viscous and thermal characteristic lengths of plastic foams by ultrasonic measurements in helium and air, *Journal of Applied Physics* 80 (1996) 2009–2012. <https://doi.org/10.1063/1.363817>.
- [24] Z.E.A. Fellah, S. Berger, W. Lauriks, C. Depollier, C. Aristégui, J.-Y. Chapelon, Measuring the porosity and the tortuosity of porous materials via reflected waves at oblique incidence, *The Journal of the Acoustical Society of America* 113 (2003) 2424–2433. <https://doi.org/10.1121/1.1567275>.
- [25] O. Umnova, K. Attenborough, H.-C. Shin, A. Cummings, Deduction of tortuosity and porosity from acoustic reflection and transmission measurements on thick samples of rigid-porous materials, *Applied Acoustics* 66 (2005) 607–624. <https://doi.org/10.1016/j.apacoust.2004.02.005>.
- [26] R. Panneton, X. Olny, Acoustical determination of the parameters governing viscous dissipation in porous media, *The Journal of the Acoustical Society of America* 119 (2006) 2027–2040. <https://doi.org/10.1121/1.2169923>.
- [27] X. Olny, R. Panneton, Acoustical determination of the parameters governing thermal dissipation in porous media, *The Journal of the Acoustical Society of America* 123 (2008) 814–824. <https://doi.org/10.1121/1.2828066>.
- [28] J.-P. Groby, E. Ogam, L. De Ryck, N. Sebaa, W. Lauriks, Analytical method for the ultrasonic characterization of homogeneous rigid porous materials from transmitted and reflected coefficients, *The Journal of the Acoustical Society of America* 127 (2010) 764–772. <https://doi.org/10.1121/1.3283043>.
- [29] P. Bonfiglio, F. Pompoli, Inversion Problems for Determining Physical Parameters of Porous Materials: Overview and Comparison Between Different Methods, *Acta Acustica United with Acustica* 99 (2013) 341–351. <https://doi.org/10.3813/AAA.918616>.
- [30] L. Jaouen, E. Gourdon, P. Glé, Estimation of all six parameters of Johnson-Champoux-Allard-Lafarge model for acoustical porous materials from impedance tube measurements, *The Journal of the Acoustical Society of America* 148 (2020) 1998–2005. <https://doi.org/10.1121/10.0002162>.
- [31] F. Chevillotte, C. Perrot, R. Panneton, Microstructure based model for sound absorption predictions of perforated closed-cell metallic foams, *The Journal of the Acoustical Society of America* 128 (2010) 1766–1776. <https://doi.org/10.1121/1.3473696>.
- [32] M. He, C. Perrot, J. Guilleminot, P. Leroy, G. Jacqus, Multiscale prediction of acoustic properties for glass wools: Computational study and experimental validation, *The Journal of the Acoustical Society of America* 143 (2018) 3283–3299. <https://doi.org/10.1121/1.5040479>.
- [33] F. Pompoli, P. Bonfiglio, Definition of analytical models of non-acoustical parameters for randomly-assembled symmetric and asymmetric radii distribution in parallel fiber structures, *Applied Acoustics* 159 (2020) 107091. <https://doi.org/10.1016/j.apacoust.2019.107091>.
- [34] T.G. Zieliński, R. Venegas, C. Perrot, M. Červenka, F. Chevillotte, K. Attenborough, Benchmarks for microstructure-based modelling of sound absorbing rigid-frame porous media, *Journal of Sound and Vibration* 483 (2020) 115441. <https://doi.org/10.1016/j.jsv.2020.115441>.
- [35] E. Di Giulio, C. Perrot, R. Dragonetti, Transport parameters for sound propagation in air saturated motionless porous materials: A review, *International Journal of Heat and Fluid Flow* 108 (2024) 109426. <https://doi.org/10.1016/j.ijheatfluidflow.2024.109426>.
- [36] A. Santoni, F. Pompoli, C. Marescotti, P. Fausti, Characterization of fibrous media transport parameters from multi-compression-ratio measurements of normal incidence sound absorption, *The Journal of the Acoustical Society of America* 157 (2025) 1185–1201. <https://doi.org/10.1121/10.0035847>.
- [37] ISO 354: Acoustics — Measurement of sound absorption in a reverberation room, (2003).
- [38] ISO 11654: Acoustics — Sound absorbers for use in buildings — Rating of sound absorption, (1997).
- [39] M.E. Delany, E.N. Bazley, Acoustical properties of fibrous absorbent materials, *Applied Acoustics* 3 (1970) 105–116. [https://doi.org/10.1016/0003-682X\(70\)90031-9](https://doi.org/10.1016/0003-682X(70)90031-9).
- [40] Y. Miki, Acoustical properties of porous materials. Modifications of Delany-Bazley models., *J. Acoust. Soc. Jpn. (E)*, *J. Acoust Soc Jpn E* 11 (1990) 19–24. <https://doi.org/10.1250/ast.11.19>.
- [41] D.L. Johnson, J. Koplik, R. Dashen, Theory of dynamic permeability and tortuosity in fluid-saturated porous media, *J. Fluid Mech.* 176 (1987) 379–402. <https://doi.org/10.1017/S0022112087000727>.
- [42] Y. Champoux, J.-F. Allard, Dynamic tortuosity and bulk modulus in air-saturated porous media, *Journal of Applied Physics* 70 (1991) 1975–1979. <https://doi.org/10.1063/1.349482>.
- [43] D. Lafarge, P. Lemarinier, J.F. Allard, V. Tarnow, Dynamic compressibility of air in porous structures at audible frequencies, *The Journal of the Acoustical Society of America* 102 (1997) 1995–2006. <https://doi.org/10.1121/1.419690>.

- [44] S.R. Pride, F.D. Morgan, A.F. Gangi, Drag forces of porous-medium acoustics, *Phys. Rev. B* 47 (1993) 4964–4978. <https://doi.org/10.1103/PhysRevB.47.4964>.
- [45] A. Tamayol, M. Bahrami, Transverse permeability of fibrous porous media, *Phys. Rev. E* 83 (2011) 046314. <https://doi.org/10.1103/PhysRevE.83.046314>.
- [46] G.E. Archie, The Electrical Resistivity Log as an Aid in Determining Some Reservoir Characteristics, *Transactions of the AIME* 146 (1942) 54–62. <https://doi.org/10.2118/942054-G>.
- [47] J.-F. Allard, N. Atalla, Propagation of sound in porous media: modelling sound absorbing materials, 2nd ed, Wiley, Hoboken, N.J, 2009.
- [48] M. Villot, C. Guigou, L. Gagliardini, Predicting the acoustical radiation of finite size multi-layered structures by applying spatial windowing on infinite structures, *Journal of Sound and Vibration* 245 (2001) 433–455. <https://doi.org/10.1006/jsvi.2001.3592>.
- [49] D. Rhazi, N. Atalla, A simple method to account for size effects in the transfer matrix method, *The Journal of the Acoustical Society of America* 127 (2010) EL30–EL36. <https://doi.org/10.1121/1.3280237>.
- [50] P. Bonfiglio, F. Pompoli, R. Lonti, A reduced-order integral formulation to account for the finite size effect of isotropic square panels using the transfer matrix method, *The Journal of the Acoustical Society of America* 139 (2016) 1773–1783. <https://doi.org/10.1121/1.4945717>.
- [51] A. Santoni, P. Bonfiglio, P. Fausti, F. Pompoli, Computation of the Alpha Cabin Sound Absorption Coefficient by Using the Finite Transfer Matrix Method (FTMM): Inter-Laboratory Test on Porous Media, *Journal of Vibration and Acoustics* 143 (2021). <https://doi.org/10.1115/1.4048395>.
- [52] A. Santoni, P. Bonfiglio, A. Magnani, C. Marescotti, F. Pompoli, P. Fausti, A hybrid approach for modelling the acoustic properties of recycled fibre mixtures for automotive applications, *Applied Acoustics* 182 (2021) 108272. <https://doi.org/10.1016/j.apacoust.2021.108272>.
- [53] EN 13501-1 Fire classification of construction products and building elements – Part 1: Classification using data from reaction to fire tests, (2018).

Enhancement of the acoustic design workflow through VR technology: the case study of conference room in a historical building

Davide Cetani^{a*} | Louena Shtrepi^a | Angela Guastamacchia^a | Arianna Astolfi^a

^a Dipartimento di Energia,
Politecnico di Torino,

Corso Duca degli Abruzzi, 24, 10129 Torino

* Corresponding author:
davide.cetani@polito.it

Ricevuto: 28/2/2025

Accettato: 17/9/2025

DOI: 10.3280/ria2-2025oa19529

ISSN: 2385-2615

Speech intelligibility is a key factor in conference room acoustics, affecting the listener's experience and communication effectiveness. Traditional acoustic design relies on objective parameters, often neglecting perceptual validation of both acoustic and aesthetic features. This study explores how virtual reality technologies can support the acoustic design process. Two acoustic treatment solutions for the conference room of the Museo Egizio di Torino were compared: a (1) seamless plaster-based system and (2) parametric felt baffles. Geometrical Acoustic software Ramsete was used to predict their effectiveness, and to generate third-order Ambisonics auralisations. A photogrammetric 3D model was used for visual renderings. Both were used for speech intelligibility tests conducted in the Audio Space Lab of Politecnico di Torino, a small listening environment equipped with a High-Order Ambisonics sound reproduction system and an Oculus Meta Quest 2. Listeners were also asked to express their preference on the visual scenarios obtained with the two treatment solutions. The results showed a preference for the second solution, despite no significant acoustic differences.

Keywords: audiovisual integration, auralisation, immersive experience, speech intelligibility, design tool

Miglioramento del workflow di progettazione acustica attraverso le tecnologie VR: il caso studio di una sala conferenza in un edificio storico

L'intelligenza del parlato è un aspetto chiave dell'acustica delle sale conferenza, poiché influenza sulla comunicazione. La progettazione acustica normalmente si basa su parametri oggettivi, trascurando la validazione percettiva dell'acustica e dell'estetica. Questo studio indaga l'uso della realtà virtuale a supporto della progettazione acustica. Sono state confrontate due soluzioni di trattamento acustico per la sala conferenze del Museo Egizio di Torino: (1) una soluzione con intonaco multistrato e (2) baffle parametrici in feltro. Per valutarne l'efficacia e generare le auralizzazioni in Ambisonics, è stato impiegato il software Ramsete. Un modello 3D fotogrammetrico ha permesso di realizzare i rendering 3D. Entrambi sono stati utilizzati nei test di intelligenza del parlato condotti nell'Audio Space Lab del Politecnico di Torino, dotato di sistema Ambisonics e Oculus Meta Quest 2. Ai partecipanti è stato anche chiesto di esprimere la loro preferenza tra gli scenari visivi ottenuti con le due soluzioni di trattamento. I risultati hanno mostrato una preferenza per la seconda soluzione, nonostante non siano state riscontrate differenze acustiche significative.

Parole chiave: integrazione audiovisiva, auralizzazione, esperienza immersiva, intelligenza del parlato, strumento di progettazione

1 | Introduction

Ensuring adequate Speech Intelligibility (SI) in environments designed for verbal communication, such as conference halls, is a crucial goal of acoustic design, as it directly influences both communication effectiveness and the overall listening experience [1]. This task becomes even more complex in existing spaces, particularly within historical buildings, where any acoustic intervention must carefully balance performance enhancement with the preservation of architectural value and heritage constraints. Conventional design methods are based on objective acoustic parameters and numerical simulations to estimate the impact of various interventions, providing a reliable but partial perspective [2]. While such methods are essential for

evaluating acoustic performance, they frequently neglect the perceptual aspects of intelligibility, which are fundamental in actual listening situations. Recent advances in immersive tools, including virtual reality (VR) and auralisation, provide novel possibilities to enhance evaluation methods and to narrow the gap between numerical simulations and perceptual experience [3,4]. The present work investigates how these technologies can be incorporated into the design process through the comparison of two corrective solutions for the conference room of the Museo Egizio di Torino, with the dual objective of enhancing prediction reliability and supporting perceptual validation. Recent studies have investigated the integration of VR in architectural acoustics to improve design evaluation [5-9]. The possibility of previewing an architectural project together with an accurate reproduction of its expected acoustics allows users to experience

the environment prior to construction, minimizing the need for design changes or post-construction repairs to address issues [5,6]. VR can be integrated into acoustic design through different strategies. A real-time approach offers flexibility by enabling the movement of sound sources, though with lower precision compared to pre-calculated wave-based simulations. Nonetheless, both methods contribute positively to the design process [7]. Such an approach necessarily involves collaboration across multiple disciplines, with each area of expertise contributing to achieve a faithful reproduction that enhances the realism and immersive quality of the virtual environment. Accurately modelling historical buildings is particularly challenging, as geometric detail plays a crucial role. Simplification techniques can be applied to reduce computational load while preserving an adequate level of visual fidelity [8]. Equally important is the accurate reproduction of the room's acoustic response. A robust strategy consists in calibrating the Geometrical Acoustic (GA) model on the basis of in-situ measurements, using them as a benchmark for the subsequent simulations [9].

In this framework, the article explores the role of VR techniques as a supporting tool in the acoustic design workflow. A central aspect of the study is to examine whether alternative visual configurations, under identical acoustic conditions, can affect user preferences.

A preliminary version of this research was presented at the International Symposium on Musical and Room Acoustics (ISMRA 2025). Compared to that contribution, the present work expands on several methodological aspects: the iterative calibration process is described in greater detail, the simulation parameters are explicitly reported to ensure reproducibility, and additional information is provided on the perceptual test protocol and statistical analysis.

2 | Methodology

The present study aims to integrate audio-visual (AV) VR techniques into architectural design using acoustic simulations with the GA Ramsete software. Third-Order Ambisonics (3OA) auralisations of two design proposals were realised and then compared in perceptual tests combining different AV conditions in five scenarios. Specifically, SI tests were carried out on normal hearing subjects. The experiment took place within the Audio Space Lab (ASL) of the Politecnico di Torino.

2.1 | The case study

The study focused on the conference room of the Museo Egizio di Torino. It is a room with essential furnishings for dissemination: a stage with a desk and projection screen at the back, rows of movable seats with two side benches, and a control desk positioned opposite the stage, used to manage the lighting system installed on the central elliptical structure. The measurements setup used within this room was in accordance with the Italian standard UNI 11532-2 [10] (Fig. 1).

These measures highlighted various criticalities affecting SI, a fundamental requirement in conference halls. In particular, the objective parameters T_{30} and C_{50} showed deviations from the optimal ranges established by current regulations (see Fig. 2).

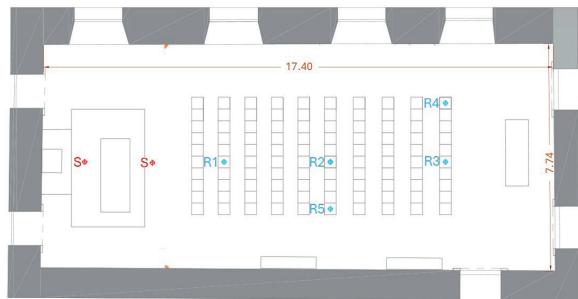


Fig. 1 – Set up measurement inside the conference room
Configurazione utilizzata nelle misurazioni della sala conferenze

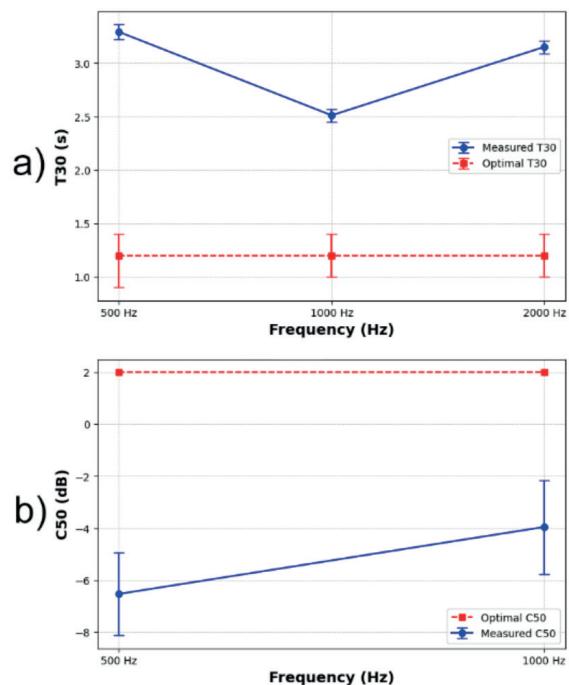


Fig. 2 – Measured vs. Optimal T_{30} (a) and C_{50} (b) within the conference room
Confronto tra i valori misurati e ottimali di T_{30} (a) e C_{50} (b) all'interno della sala conferenze

To address these shortcomings, an acoustic correction project was developed, resulting in two alternative proposals: one focused solely on acoustic treatment, while the other one introduced parametric baffles designed to improve SI and simultaneously enrich the visual quality of the space. The first design uses two types of fibrous sound absorbing panels covered with plaster arranged along three walls of the room (Fig. 3). In contrast, the second solution (Fig. 4) integrates fewer sound-absorbing panels with acoustic baffles, arranged parametrically in a horseshoe shape on three sides of the room. The two solutions are acoustically equivalent. Both are designed to improve SI by bringing objective parameters within the optimal ranges established by regulations.



Fig. 3 – First designed solution with plastered absorbing panels

Prima proposta progettuale con pannelli fonoassorbenti rivestiti d'intonaco



Fig. 4 – Second designed solution with parametric baffles

Seconda proposta progettuale parametrica con pannelli fonoassorbenti sospesi

2.2 | Simulations

The performance of the two corrective strategies was assessed through simulations carried out with the GA software Ramsete. This tool employs a pyramid-tracing approach, which reduces the risk of multiple-detection artefacts compared to traditional cone-tracing [11]. An additional capability of Ramsete is the generation of Ambisonics impulse responses (IRs), a key element for producing the auralisations employed in the perceptual tests. The software, however, is compatible exclusively with 3D models composed of triangular meshes. For this reason, the original model had to be adapted by restructuring the meshes into separate layers, each associated with the specific materials present in the room (e.g. plaster, floor, glass, etc.).

The Ramsete simulations were carried out following the guidelines provided by the software developer. The main parameters were: subdivision level = 10 (corresponding to 8×2^N pyramids per source, i.e. 81920 pyramids in this case), simulation time = 4.2 s (similar to Reverberation Time of the environment), time resolution = 0.001 s, and diffraction order = 2. Unlike other ray-tracing tools, Ramsete does not allow direct control of the number of rays, which is indirectly set by the subdivision level. These parameters ensured a sufficiently detailed representation of the sound field while maintaining reasonable computation times.

2.2.1 | Calibration

The calibration was carried out through an iterative process. Starting from literature values for absorption and scattering coefficients [12] (Tab. 1 and Tab. 2), a simulation was run and the

resulting objective parameters (T_{20} , T_{30} , EDT, C_{50} , C_{80} , D_{50} , T_s) were compared against the corresponding in-situ measurements. Discrepancies guided the adjustment process (e.g., an overestimation of T_{30} at 1 kHz indicated the need to increase absorption in that band). The iteration was repeated until differences between simulated and measured values were consistently below the just noticeable difference (JND), resulting in average differences of 0.06 s for T_{30} and 1 dB for C_{50} . Only the absorption coefficients of the walls were modified (Tab. 3), since this material covers the largest surface of the hall and thus exerts the greatest influence on the overall absorption behaviour.

Tab. 1 – Absorption Coefficients from literature [12]

Coefficienti di assorbimento da letteratura

	125 Hz	250 Hz	500 Hz	1000 Hz	2000 Hz	4000 Hz	8000 Hz
Photo/canvas	0.42	0.21	0.10	0.08	0.06	0.06	0.06
Closet	0.14	0.12	0.10	0.08	0.06	0.06	0.03
Window	0.12	0.10	0.08	0.06	0.05	0.03	0.03
Wall	0.02	0.03	0.05	0.05	0.04	0.03	0.03
Black Wall	0.01	0.01	0.05	0.35	0.18	0.09	0.09
Floor	0.01	0.01	0.02	0.02	0.01	0.01	0.01
Door	0.11	0.08	0.06	0.06	0.05	0.03	0.02
Chair	0.22	0.24	0.22	0.20	0.18	0.14	0.12
Table	0.31	0.28	0.22	0.19	0.15	0.10	0.10
Stage	0.31	0.28	0.22	0.19	0.15	0.10	0.10
Projection sheet	0.14	0.12	0.10	0.08	0.06	0.06	0.03

Tab. 2 – Scattering Coefficients from literature [12]

Coefficienti di diffusione da letteratura

	125 Hz	250 Hz	500 Hz	1000 Hz	2000 Hz	4000 Hz	8000 Hz
Photo/canvas	0.02	0.03	0.06	0.15	0.26	0.32	0.36
Closet	0.02	0.03	0.06	0.15	0.26	0.32	0.36
Window	0.02	0.03	0.06	0.15	0.26	0.32	0.36
Wall	0.02	0.03	0.06	0.15	0.26	0.32	0.36
Black Wall	0.02	0.03	0.06	0.15	0.26	0.32	0.36
Floor	0.02	0.03	0.06	0.15	0.26	0.32	0.36
Door	0.02	0.03	0.06	0.15	0.26	0.32	0.36
Chair	0.01	0.05	0.21	0.39	0.50	0.56	0.58
Table	0.01	0.05	0.21	0.39	0.50	0.56	0.58
Stage	0.02	0.03	0.06	0.15	0.26	0.32	0.36
Projection sheet	0.02	0.03	0.06	0.15	0.26	0.32	0.36

Tab. 3 – Walls' absorption coefficients before and after calibration

Coefficienti di assorbimento delle pareti prima e dopo la calibrazione

	125 Hz	250 Hz	500 Hz	1000 Hz	2000 Hz	4000 Hz	8000 Hz
Before calibration	0.02	0.03	0.05	0.05	0.04	0.03	0.03
After calibration	0.02	0.04	0.05	0.06	0.06	0.08	0.12

2.2.2 | Comparison between the two designed proposals

The subsequent phase of the workflow consisted in virtually applying the two corrective solutions. For the first design, it was enough to modify the wall material properties and insert the absorption coefficients provided by manufacturer. The second design, instead, required integrating the parametric baffle system into the room model. This configuration envisaged the installation of 164 baffles, distributed with variable spacing between 10cm and 24 cm. Furthermore, each baffle is characterised by two different depths: when divided vertically into two sections, the upper section is twice as deep as the lower one (as can be seen in Fig. 5 [13]). Due to its geometric intricacy, this design would have generated an overly detailed model, rendering it impractical for processing within the GA software. To overcome this limitation, a simplified version of the model was developed, preserving the appropriate absorption and scattering coefficients so as to remain consistent with the original design intent. The simplified model was produced in Rhinoceros and was composed of a set of parallelepipeds, used to approximate the geometry of the panels. Additionally, due to the thickness difference between the upper and the lower sections, each part was modelled as a halved-thickness parallelepiped enclosing the lower sections of the baffles. These simplified geometrical elements were acoustically characterized using the absorption and scattering data obtained from reverberation chamber measurements on the panels' material [13], and such properties were subsequently implemented in the simulations (Tab. 4).

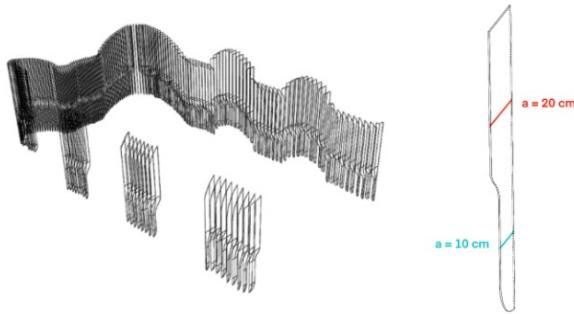


Fig. 5 – Parametric baffles structure

Struttura parametrica dei pannelli fonoassorbenti sospesi

Tab. 4: Baffles' Absorption (α) and Scattering (s) coefficients

Coefficienti di assorbimento e di diffusione dei pannelli fonoassorbenti sospesi

Hz	63	125	250	500	1000	2000	4000	8000
α	0.21	0.62	0.98	0.99	0.98	0.97	0.96	0.96
s	0.01	0.02	0.10	0.40	0.60	0.70	0.77	0.80

The simulation outcomes for the two redesigned configurations validated the effectiveness of both corrective interventions. Moreover, the results showed that the two solutions produced comparable effects, as illustrated in Fig. 6 for T_{30} .

2.2.3 | Visualisation

At the same time, the 3D environment was created. Using a photogrammetric model of the conference room [8], visual renderings were produced on Blender in an equirectangular format for visualization through a head-mounted display (HMD). Since the study also aimed to assess whether the visual component influenced the test results, two versions of the room were rendered: one with baffles and one without. Fig. 3 and Fig. 4 represent the previews, rendered with Blender, of the room in the two configurations.

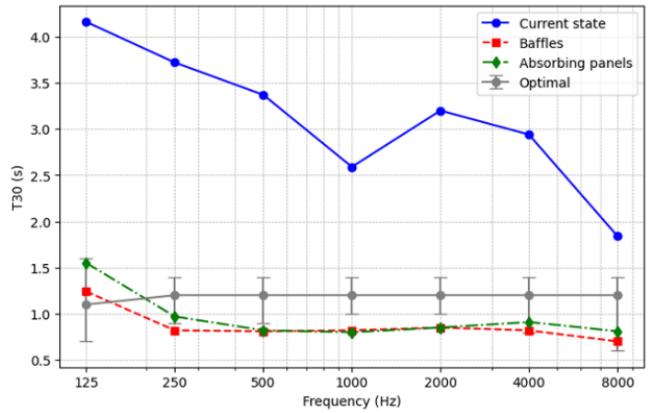


Fig. 6 – T_{30} - Comparison between the current state and the two correction strategies

T_{30} - Confronto tra lo stato di fatto e le due proposte progettuali

2.3 | Subjective Investigation

A perceptual study was carried out to assess how the proposed acoustic treatments were experienced by listeners. The decision to include visual cues was inspired by previous research [14,15], which demonstrated that both contextual and source-related visual information can influence sound localization [14] and acceptance of the auditory illusion [15].

In designing the experiment, five audiovisual scenarios were defined by combining two visual conditions (room without baffles and room with baffles) with three acoustic ones (untreated room and the two corrective interventions).

The combination of these AV conditions resulted in the creation of five scenarios used during the testing phase:

1. VNT + ANT - Visually Not Treated, Acoustically Not Treated.
2. VNT + ATP - Visually Not Treated, Acoustically Treated with Panels.
3. VNT + ATB - Visually Not Treated, Acoustically Treated with Baffles.
4. VT + ATP - Visually Treated, Acoustically Treated with Panels.
5. VT + ATB - Visually Treated, Acoustically Treated with Baffles.

This structure allowed us to examine not only the efficiency of the acoustic treatments but also the potential impact of visual immersion on SI.

2.3.1 | Experimental Environment and Test Subjects



Fig. 7 – A picture of the Audio Space Lab at Politecnico di Torino
Fotografia dell'Audio Space Lab al Politecnico di Torino

The experiment took place within the ASL of Politecnico di Torino, a compact listening environment treated for acoustics and designed for immersive reproduction (Fig. 7). The ASL complies with the ITU-R BS.1116-3 recommendation [16] and supports spatial playback up to 30A. Synchronisation with an HMD enable the creation of a AV VR scenario. The reproduction system consists of 16 Genelec 8030B two-way active monitors, arranged on a spherical structure with 1.2-meters radius. The system is calibrated to achieve a sweet spot equalized in time, amplitude, and phase in the 90Hz-20kHz range. Loudspeakers are distributed across three rings, defined by the intersection of three parallel planes and a sphere:

- The central ring is at ear height and consists of eight equally spaced speakers, with the first one positioned directly in front of the listener.
- The upper and lower rings each contain four speakers, positioned at $\pm 45^\circ$ elevation relative to the central ring.

Additionally, the ASL features two Genelec 8531A three-way active monitors, positioned on the floor in the front, acting as subwoofers to extend the frequency range down to 30Hz. All loudspeakers are connected to a 32-channels sound card linked to a high-end desktop PC. Immersive video playback is managed through an Oculus Meta Quest 2. The AV synchronization is maintained with a MATLAB routing using Open-Source Control (OSC) protocol, integrating two different software: Bidule, and Unreal Engine.

The preliminary listening test involved ten normal hearing participants, six men and four women, aged 24-30 years. All participants were familiar with AV VR environments and HMDs, and 30% had previously participated in similar perceptual tests. Participants were recruited on a voluntary basis. Inclusion criteria required normal hearing and no uncorrected vision problems; participants who normally wore glasses were allowed to keep them during the test.

2.3.2 | Speech Intelligibility Test

Participants were positioned at the centre of the reproduction system and, while wearing an HMD, were exposed to each

of the five AV scenarios. Their task consisted of repeating out loud the sentences uttered by the target source. In order to raise the level of difficulty, a competing noise source was added, which made the understanding of the sentences more demanding. The Signal-to-Noise Ratio (SNR) was set to -5dB, corresponding to a medium difficulty level.

Across all scenarios, the spatial arrangement was maintained unchanged, reflecting the layout commonly found in a conference room. The target speaker was located 4 meters away, placed behind the desk and oriented towards the listener. The interfering source was positioned 1.8 meters away from the listener, forming an angle of 120° relative to the frontal axis (as can be seen in Fig. 8). Moreover, no amplification system was employed during the experiment, and the speech material was reproduced at a “raised” vocal effort (70 dB SPL). For each scenario, participants listened to a set of 20 sentences randomly selected from the validated extended version of the Italian Matrix Sentence Test. The masking signal consisted of a phonetically balanced female voice, in line with common practice in SI assessments.

- The experiment was divided into three main phases:
- Training Phase – A progressively more challenging demo to familiarise participants with the test procedure.
- Testing Phase – Randomized exposure to the five AV scenarios, collecting SI scores (percentage of correctly understood words). Randomisation was applied at two levels: (i) the order of the audiovisual scenarios was changed for each subject, and (ii) the order of the sentences within each scenario was also varied. This approach ensured that neither learning effects nor presentation bias could systematically affect the results.
- Ranking Phase - Participants ranked their scenario preferences.

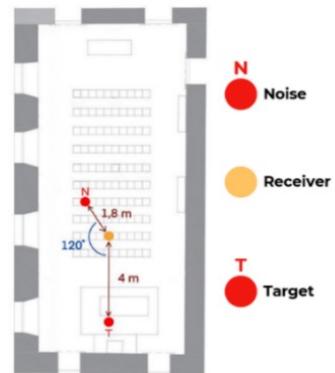


Fig. 8 – Spatial configuration used during the testing phase
Configurazione spaziale usata in fase di test

In summary, the adopted workflow combines acoustic simulation, auralisation, and 3D visual rendering to deliver an immersive and perceptually reliable assessment of alternative acoustic treatments. The workflow begins with the calibration of the RAMSETE acoustic model, carried out by assigning absorption and scattering coefficients from the literature and refining them through in-situ measurements performed

in compliance with UNI 11532-2. The two design alternatives – parametric felt baffles and plaster-based acoustic panels – were assessed by producing 3OA IRs, later convolved with anechoic recordings to create spatialised auralisations. To accompany the auditory dimension with a faithful visual representation, a photogrammetric 3D model of the hall was processed and optimised in Blender, then imported into Unreal Engine for interactive real-time rendering. The virtual scene was configured to run on an Oculus Meta Quest 2 headset, enabling participants to explore the simulated acoustic environment. Furthermore, the auralisation chain was routed through the ASL playback system using Bidule, guaranteeing a precise reproduction of the spatial audio scene. MATLAB facilitates real-time interaction between the acoustic and visual domains through Open Sound Control (OSC) communication.

This methodology allows for an integrated evaluation of acoustic design options, merging the objective acoustic analyses with perceptual assessments within a controlled virtual framework. The combined use of numerical simulation, immersive auralisation and interactive 3D visualisation provides a robust framework for investigating the perceptual impact of different acoustic solutions.

3 | Results

3.1 | Objective Results

Tab. 5 – Speech Intelligibility Test Results
Risultati del test di intelligenza del parlato

SCENARIOS	VNT		VT		
	ANT	ATP	ATB	ATP	ATB
Mean (%)	ALL	52.2	89.3	91.2	91.4
Std. Dev	ALL mean	11.38	3.83	6.12	3.44
					3.65

In the Testing Phase, the number of words correctly recognised by each participant was collected, and the outcomes across scenarios are summarised in Tab. 5.

For each scenario, the mean number of correctly identified words per five-word sentence was computed. The findings revealed a substantial gain in intelligibility: in the untreated condition of the conference room, only 52.2% of the words were correctly perceived, whereas in the treated configurations comprehension rates rose to values between 89.3% and 92.7%. Because SI scores are bounded proportions, they were first converted into rationalized arcsine units (RAU) to stabilize variance and reduce ceiling effects. Statistical analysis was then conducted using a Linear Mixed Effects Model (LMM), with Scenario as a fixed effect and Subject as a random effect to account for repeated measures. Type III – F [17] tests were applied to assess the significance of Scenario, as

they provide robust inference in the presence of unbalanced data and correlated observations. This approach is standard in perceptual studies where each listener is exposed to all conditions [18]. Fig. 9 presents the five scenarios ordered from the highest to the lowest intelligibility scores. Planned pairwise comparisons were then carried out between adjacent scenarios, under the directional hypothesis that intelligibility should not decrease when moving from worse to better conditions.

The following hypothesis was tested four times:

$$H_0: \text{median}(X1) \geq \text{median}(X2)$$

where X1 and X2 represent the scenario with the lower and higher intelligibility scores, respectively. For each comparison, the p-value was computed using a MATLAB routine (Tab. 6).

Tab. 6 – p-values for each hypothesis
Valori di p-value per ogni ipotesi

Hypothesis	X1	X2	p-value
1	VT + ATP	VT + ATB	0.17
2	VNT + ATB	VT + ATP	0.52
3	VNT + ATP	VNT + ATB	0.08
4	VNT + ANT	VNT + ATP	3.29×10^{-41}

The analysis of the calculated p-values indicates that only the last hypothesis (VNT+ANT vs. VNT+ATP) reached statistical significance, confirming that both acoustic treatments improved intelligibility compared to baseline. No significant differences emerged between the two designs, indicating that they are statistically equivalent within the variability of the sample.

3.2 | Subjective Results

During the Ranking Phase, the scenarios were ordered by the participants according to their preference, from the most to the last favoured. As reported in Tab. 7, the scenarios including baffles were generally preferred, while no appreciable subjective differences emerged between the two acoustic treatment strategies. A consistent outcome across all participants was the placement of the untreated room in the lowest rank. From an aesthetic standpoint, 90% of participants expressed a preference for the configuration with baffles, considering it as visually improving the environment. Additionally, the juxtaposition of the historic architecture with the contemporary aesthetic of the baffles was positively valued.

Tab. 7 – Ranking of the five tested scenarios by the participants
Classifica di gradimento dei cinque scenari testati dai partecipanti

SCENARIOS	VNT		VT		
	ANT	ATP	ATB	ATP	ATB
Overall	5 th	3 rd	3 rd	1 st	1 st

4 | Discussion

The outcomes of this investigation support the feasibility of the two alternative corrective strategies, both capable of producing a marked improvement in SI. Objective simulations indicated that both interventions – panels alone and panels combined with felt baffles – yielded comparable results in terms of T_{30} and SI and complied with regulatory targets. Nevertheless, the perceptual evaluation highlighted a preference towards the baffle-based design, which was appreciated not only for its acoustic effectiveness but also for its visual qualities and the resulting sense of environmental comfort.

These results are consistent with the observations of Bradley [2], who underlined that conventional acoustic parameter should be complemented by subjective assessments to obtain a comprehensive evaluation of an environment. Indeed, the results indicate that while the two corrective strategies achieved equivalent measurable performance, the visual component – particularly the aesthetic contribution of the baffles – exerted a positive influence on the overall user experience. In this sense, the results also confirm the observations of Defays et al. [6] that visual information can modulate acoustic perception.

Furthermore, the study aligns with the work of Pind et al. [7], which demonstrated that VR can enhance the accuracy of acoustic predictions while integrating effectively within the overall design workflow. The investigation also underlines the value of combining diverse areas of expertise, leading to a workflow that merges acoustic simulation with visual design, in line with approaches proposed in the literature [8,9]. The adopted AV approach, integrating simulations calibrated on in-situ measurements with photogrammetry-based visual renderings, produced simulations that proved both realistic and reliable.

The results obtained in the ASL confirmed that both corrective strategies produced a significant enhancement of the SI score. A substantial contrast emerged between the untreated and the treated conditions, with intelligibility rising from 52.2% in the baseline scenario to 92.7% in the corrected configurations. The findings indicate that both corrective strategies were effective in enhancing speech intelligibility, with the statistical analysis confirming that their outcomes can be regarded as essentially equivalent.

It is noteworthy that a higher aesthetic evaluation was assigned exclusively to the baffle-based intervention. This outcome implies that beyond the acoustic enhancement, the visual aspect plays a crucial role in the overall perception of environmental quality. It should be underlined, however, that the intelligibility gains were not homogeneous among all participants. Such variability in performance may be attributed to individual factors, including prior familiarity with VR systems or previous exposure to similar perceptual tests. On average, the results point to an overall positive reception of the proposed corrective strategies.

It was also observed that the addition of visual stimuli affected the overall perception, with the visually enriched treatment contributing to a greater acceptance of the intervention.

However, the role of visual factors in sound perception and overall acoustic behaviour in VR environments may require further study for a more in-depth understanding.

Although the outcomes of the simulations and laboratory trials were encouraging, the real-world applicability of the proposed solutions may be constrained by aspects such as cost, installation time, and visual impact. Baffled-based solutions might be more expensive and require a more complex design than acoustic panel solutions, which are likely to be easier to implement in existing environments. It is therefore important to consider the feasibility of these solutions within their architectural and practical context, particularly in a historic museum environment. In addition, the peculiar features of the museum – its geometry and furnishings in particular – played a decisive role in shaping the proposed acoustic solutions. The results obtained may not be directly transferable to other environments without further adaptation and specific analysis.

The findings indicate that numerical simulations benefit from being complemented with immersive evaluations, in order to obtain a more robust and reliable design process. Employing VR within the design workflow has the potential to streamline decision-making, minimise post-construction adjustments, and reduce overall project costs.

Future work foresees an expansion of the testing phase, with the introduction of new perceptual experiments designed to enable direct pairwise comparisons between alternative design configurations. As the present tests were carried out sequentially on an individual basis, it was not possible to clearly isolate the potential influence of the visual component on SI. Future studies should develop appropriate tests for use in acoustic design research.

5 | Conclusions

The investigation showed that embedding immersive VR technologies within the acoustic design workflow enables a more comprehensive assessment of corrective strategies in historic settings. Both corrective approaches were found to be effective in markedly enhancing SI, as confirmed by the outcomes of the acoustic simulations. Nevertheless, the perceptual evaluation highlighted a distinct aesthetic preference for the baffle-based solution, underlining the relevance of visual factors in shaping the overall perception of acoustic quality. These findings suggest that, although conventional acoustic parameters remain fundamental, their integration with immersive and experience-based assessments yields a more complete evaluation. The combined use of high-order Ambisonics auralisations and a photogrammetric 3D model provided a realistic reproduction of the conference hall, reducing the likelihood of costly post-construction modifications. Moreover, the multidisciplinary workflow adopted here illustrates how numerical simulation and subjective testing can complement each other, offering a more nuanced understanding of acoustic performance and user experience. Despite the limitations of the present study, the results provide

a solid foundation for future research, particularly for direct pairwise comparisons aimed at better isolating the role of visual cues in auditory perception.

Overall, the proposed methodology represents a promising step towards a more reliable and user-centred acoustic design process in complex and heritage-sensitive environments, paving the way for further innovation in the field.

Conclusioni

L'indagine ha mostrato che l'integrazione delle tecnologie di realtà virtuale immersiva all'interno del flusso di lavoro di progettazione acustica consente una valutazione più completa delle strategie correttive in contesti storici. Entrambi gli approcci di intervento si sono rivelati efficaci nel migliorare in modo significativo l'intelligibilità del parlato, come confermato dai risultati delle simulazioni acustiche. Tuttavia, la valutazione percettiva ha evidenziato una chiara preferenza estetica per la soluzione con pannelli fonoassorbenti sospesi, sottolineando l'importanza dei fattori visivi nella percezione complessiva della qualità acustica. Tali evidenze suggeriscono che, sebbene i parametri acustici convenzionali rimangano fondamentali, la loro integrazione con valutazioni immersive ed esperienziali consente un'analisi più completa. L'impiego combinato di auralizzazioni Ambisonics di ordine elevato e di un modello fotogrammetrico 3D ha permesso una riproduzione realistica della sala conferenze, riducendo la probabilità di costose modifiche successive alla realizzazione. Inoltre, il flusso di lavoro multidisciplinare adottato dimostra come simulazioni numeriche e test soggettivi possano integrarsi in maniera complementare, offrendo una comprensione più approfondita sia delle prestazioni acustiche sia dell'esperienza dell'utente. Nonostante i limiti del presente studio, i risultati costituiscono una base solida per sviluppi futuri, in particolare per test di confronto diretto volti a isolare meglio il ruolo dei fattori visivi nella percezione uditiva.

In conclusione, la metodologia proposta rappresenta un passo promettente verso un processo di progettazione acustica più affidabile e orientato all'utente in ambienti complessi e sensibili dal punto di vista storico, apre la strada ad ulteriori innovazioni nel settore.

6 | Acknowledgement

The authors thank the Museo Egizio di Torino for the availability and support during the measurements in the case study and Filiberto Chiabrandi, Lorenzo Teppati Losè (Department of Architecture and Design, Politecnico di Torino) and Stefano Rovera for their contribution to the construction of the model.

Bibliography

- [1] R. Pisani, VALUTAZIONE DELLA QUALITA' ACUSTICA PER SALE ADIBITE ALL'ASCOLTO DEL PARLATO, (2010).
- [2] J.S. Bradley, Review of objective room acoustics measures and future needs, *Appl. Acoust.* 72 (2011) 713–720. <https://doi.org/10.1016/j.apacoust.2011.04.004>.
- [3] M. Ottley, Y. Chen, Use of Virtual Reality and auralization as a training tool for acoustic practitioners, in: Sydney, Australia, 2023: p. 015003. <https://doi.org/10.1121/2.0001814>.
- [4] V. Hohmann, R. Paluch, M. Krueger, M. Meis, G. Grimm, The Virtual Reality Lab: Realization and Application of Virtual Sound Environments, *Ear & Hearing* 41 (2020) 31S–38S. <https://doi.org/10.1097/AUD.0000000000000945>.
- [5] M. Azevedo, J. Sacks, Auralization as an Architectural Design Tool, (2014). <https://doi.org/10.14279/depositonce-27>.
- [6] A. Defays, S. Safin, A. Billon, C. Decaestecker, N. Warzée, P. Leclercq, A.-S. Nyssen, Bimodal Interaction: The Role of Visual Information in Performing Acoustic Assessment in Architecture, *TOERGJ* 7 (2015) 13–20. <https://doi.org/10.2174/1875934301407010013>.
- [7] F. Pind, C.-H. Jeong, H.S. Llopis, K. Kosikowski, J. Strømann-Andersen, Acoustic Virtual Reality – Methods and challenges, (2018).
- [8] L. Shtrepi, S. Rovera, L.T. Lose', F. Chiabrandi, A. Guastamacchia, A. Astolfi, ELABORAZIONE DI MODELLI 3D ACUSTICO-VISIVI PER LA PERCEZIONE DEL SUONO IN SPAZI STORICI, (2024).
- [9] B.N.J. Postma, B.F.G. Katz, Creation and calibration method of acoustical models for historic virtual reality auralizations, *Virtual Reality* 19 (2015) 161–180. <https://doi.org/10.1007/s10055-015-0275-3>.
- [10] UNI 11532-2, Caratteristiche acustiche interne di ambienti confinati - Metodi di progettazione e tecniche di valutazione - Parte 2: Settore scolastico (Internal acoustical characteristics of confined spaces - Design methods and evaluation techniques - Part 2: Educational sector), (2015).
- [11] H. Hossam Eldien, The influence of an inclined line source close to building facades with balconies, *Noise Cont Engng* 60 (2012) 363–373. <https://doi.org/10.3397/1.3701016>.
- [12] T.J. Cox, P. D'Antonio, Acoustic absorbers and diffusers: theory, design, and application, 2. ed, Taylor & Francis, London, 2009.
- [13] S. Rovera, L. Shtrepi, A. Astolfi, L.T. Lose', Application of the Performance-Based Design and Parametric Design Approach to the Acoustic Correction of Spaces Intended for Speech Listening: The Case Study of the Conference Hall at the Museo Egizio in Turin., Politecnico di Torino, 2024.
- [14] A. Ahrens, K.D. Lund, M. Marschall, T. Dau, Sound source localization with varying amount of visual information in virtual reality, *PLoS ONE* 14 (2019) e0214603. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0214603>.
- [15] A. Neidhardt, C. Schneiderwind, F. Klein, Perceptual Matching of Room Acoustics for Auditory Augmented Reality in Small Rooms - Literature Review and Theoretical Framework, *Trends in Hearing* 26 (2022) 23312165221092919. <https://doi.org/10.1177/23312165221092919>.
- [16] ITU BS.1116-3, Methods for the Subjective Assessment of Small Impairments in Audio Systems Including Multichannel Sound Systems, (2015).
- [17] B.T. West, K.B. Welch, A.T. Gałecki, B.W. Gillespie, Linear Mixed Models: A Practical Guide Using Statistical Software, 3rd ed., Chapman and Hall/CRC, Boca Raton, 2022. <https://doi.org/10.1201/9781003181064>.
- [18] A. Guastamacchia, F. Riente, L. Shtrepi, G.E. Puglisi, F. Pellerey, A. Astolfi, Speech intelligibility in reverberation based on audio-visual scenes recordings reproduced in a 3D virtual environment, *Building and Environment* 258 (2024) 111554. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2024.111554>.

Protocollo sperimentale per la valutazione dell'intelligibilità del parlato nelle aule, dotate di impianto elettroacustico, del patrimonio edilizio dell'Università di Bologna

Matteo Spinelli^{a*} | Luca Barbaresi^a | Alessia Nora^a | Virginia Tardini^a

^a Dipartimento di Ingegneria Industriale,
Università di Bologna,
Viale del Risorgimento, 2, 40136 Bologna

* Autore di riferimento:
matteo.spinelli5@unibo.it

Ricevuto: 27/2/2025

Accettato: 22/5/2025

On line first: 18/9/2025

DOI: 10.3280/riaof-2025oa19516

ISSN: 2385-2615

Vi è una consolidata letteratura scientifica sui parametri e sugli indicatori acustici idonei a descrivere la qualità di un ambiente scolastico ed in particolare di aule universitarie. L'acustica di una sala dipende dalle caratteristiche geometriche, architettoniche, dalla disposizione di materiali e, se presente, dall'impianto di amplificazione. Raramente quest'ultimo componente viene considerato in fase progettuale, ma risulta fondamentale per garantire il comfort acustico in aule di grandi dimensioni. Il lavoro presenta l'elaborazione di un protocollo, sviluppato in itinere dalla misura di 17 aule dell'università di Bologna. Lo scopo è l'analisi degli impianti elettroacustici presenti all'interno delle aule dell'ateneo. Dai risultati si evince che solo una minoranza delle stesse siano conformi ai requisiti di intelligibilità. Il protocollo risulta un utile strumento per la valutazione di grandi plessi didattici, in un'ottica di programmazione degli interventi di ammodernamento degli impianti elettroacustici.

Parole chiave: intelligibilità del parlato, impianti elettroacustici, acustica delle aule universitarie

Experimental protocol for the evaluation of speech intelligibility in classrooms, equipped with PA systems, of the University of Bologna heritage buildings

There is well-established scientific literature on acoustic parameters and indicators suitable for describing the quality of educational environments and in particular university classrooms. The acoustics of a room depends on geometric and architectural features, the arrangement of materials, and, if present, the amplification system. The latter component is rarely considered in the design phase, but it is crucial to ensure acoustic comfort in large classrooms. The paper presents the elaboration of a protocol, developed during the measurement of 17 classrooms at the University of Bologna. The purpose is the analysis of the electroacoustic systems present within the university's classrooms. The results show that only a minority of them comply with speech intelligibility requirements. The protocol turns out to be a useful tool for the evaluation of large teaching halls, with respect to the planning of electroacoustic system upgrades.

Keywords: speech intelligibility, public address systems, acoustic of university classrooms

1 | Introduzione

La corretta valutazione dell'intelligibilità del parlato nelle aule scolastiche è un'esigenza di primaria importanza, specialmente in un contesto in cui la diversità linguistica degli studenti richiede condizioni acustiche ottimali per l'apprendimento. Un'aula con una scarsa intelligibilità del parlato favorisce l'incremento della *Student Activity*, il rumore prodotto dagli studenti durante le lezioni [1]. Ciò comporta un incremento dello sforzo vocale da parte del docente [2, 3] e una maggiore difficoltà di comprensione per gli studenti, in particolare per quelli non madrelingua [4]. Pertanto, la progettazione dell'acustica di tali ambienti risulta fondamentale per garantire un'esperienza didattica inclusiva ed efficace.

Il presente articolo descrive le fasi di sviluppo e validazione di un protocollo sperimentale per la valutazione dell'intelligibilità del parlato nelle aule. L'idea è quella di fornire un metodo sistematico e replicabile per valutare le caratteristiche degli impianti elettroacustici presenti all'interno di un consistente

numero di aule del patrimonio edilizio dell'Alma Mater Studiorum Università di Bologna. Per fare ciò si è partiti dal misurare 17 aule della facoltà di Ingegneria, suddivise nei plessi Bertalia e Risorgimento. Queste aule presentano differenze sia nelle caratteristiche geometriche, sia nella disposizione e tipologia degli impianti elettroacustici installati.

La valutazione delle aule è stata effettuata attraverso una campagna di misure, il più possibile in linea con le norme vigenti internazionali, come la ISO 3382-2 [5], la IEC 60268-16 [6] e nazionali, ovvero la UNI 11532-2 [7]. Tuttavia, le aule misurate sono aule in uso, attualmente utilizzate per la didattica universitaria; questo riduce notevolmente il tempo a disposizione per svolgere le misure. Si è reso necessario individuare una metodologia di misura più snella rispetto a quelle delineate nelle normative sopracitate. L'intenzione è quella di creare uno strumento che possa affiancarsi a quelli già presenti nel panorama normativo, fornendo una metodologia per la valutazione degli impianti elettroacustici installati in aule in uso.

Il protocollo sperimentale descritto in questo lavoro di tesi si basa su una serie di rilievi in opera per acquisire le caratteristiche geometriche delle aule, fornire una descrizione degli impianti tecnologici installati, individuare i trattamenti acustici presenti all'interno dell'aula ed infine concentrarsi sulla caratterizzazione dell'impianto elettroacustico.

L'introduzione di questo protocollo sperimentale si colloca in un contesto più ampio di sensibilizzazione verso l'importanza della qualità acustica negli ambienti educativi [8,9]. In un periodo in cui l'innovazione tecnologica sta trasformando la didattica, con l'introduzione di strumenti digitali e multimediali è fondamentale garantire che tali dispositivi siano progettati e installati in modo corretto per migliorare l'intelligibilità del parlato. A questo proposito, il lavoro approfondisce le problematiche legate alla corretta installazione degli impianti elettroacustici, un aspetto cruciale per ottimizzare il comfort acustico di un'aula [10, 11].

La finalità del protocollo, una volta applicato su larga scala all'interno dell'Ateneo, è quella di identificare le aule che hanno necessità di un intervento prioritario rendendo possibile la stesura di un cronoprogramma e una corretta pianificazione economica degli interventi stessi.

2 | Cenni teorici

Lo Speech Transmission Index o indice di trasmissione del parlato, STI, è una grandezza fisica che rappresenta la qualità della trasmissione del parlato, il percorso acustico o elettroacustico tra oratore ed ascoltatore, in relazione all'intelligibilità. Esso varia tra un valore minimo di 0 ad un massimo di 1. La normativa internazionale di riferimento per l'applicazione di questo parametro è la IEC 60268-16 [6]. La normativa italiana UNI 11532-2 [7] prescrive, per aule con un volume superiore ai 250 m³, la verifica dell'indice di trasmissione del parlato, in particolare il limite inferiore di accettabilità per aule con impianto di amplificazione elettroacustico è 0.6.

Lo *Speech Transmission Index* rappresenta un modello idealizzato di comunicazione verbale, in cui l'oratore utilizza un profilo vocale standardizzato basato su uno spettro tipico del parlato maschile, caratterizzato da un'articolazione chiara e da una velocità nominale compresa tra 3 e 4 sillabe al secondo. L'impiego della voce maschile nel modello è motivato dal fatto che essa è mediamente meno intellegibile della voce femminile. Si assume inoltre che l'ascoltatore e l'oratore siano madrelingua con capacità uditive normali. Il parlato presenta rapide variazioni temporali, dette modulazioni, che si manifestano come fluttuazioni dell'inviluppo dell'intensità del segnale. Le modulazioni lente sono associate a strutture linguistiche maggiori, come parole e frasi, mentre quelle rapide corrispondono ai singoli fonemi. Lo STI si fonda su evidenze empiriche che attribuiscono a tali modulazioni il trasporto delle informazioni più rilevanti per l'intelligibilità del parlato [12-14].

Le distorsioni introdotte al canale di trasmissione vocale, quali riverbero, eco, auto-gain, compressione e *limiting*, unitamente al rumore di fondo, alterano il segnale vocale originale,

compromettendone l'intelligibilità. Il degrado delle modulazioni è direttamente correlato alla potenziale intelligibilità del parlato, ed è proprio su questa relazione che si basa il modello STI, il quale valuta quanto efficacemente tali modulazioni vengano preservate. L'effetto del canale sull'inviluppo di intensità del segnale vocale è descritto dalla *Modulation Transfer Function*, MTF, (eq. 1), che quantifica la capacità del sistema di trasmettere le fluttuazioni di ampiezza del segnale.

$$m(f) = \frac{1}{\sqrt{1 + \left(2\pi f_m \frac{T}{13.8}\right)^2}} \cdot \frac{1}{1 + 10^{\frac{-\rho}{10}}} \quad (1)$$

Dove:

- f è la frequenza di centro banda;
- f_m è la frequenza di modulazione;
- T è il tempo di riverberazione (s);
- ρ è il rapporto segnale rumore SNR (dB).

Il segnale di test STI completo, *full STI*, è composto da segnali di rumore rosa distribuiti su sette bande di ottava, che vanno da 125 Hz a 8 kHz. Questi segnali, chiamati portanti di rumore, *noise carriers*, sono modulati con una o più frequenze di modulazione, da 0.63 Hz a 12.5 Hz. In totale, si ottengono 98 valori, che corrispondono alle 14 frequenze di modulazione e alle sette bande di ottava. Ogni banda di frequenza contribuisce all'intelligibilità del parlato con un peso specifico. L'indice STI complessivo viene calcolato come somma ponderata degli indici di trasmissione delle singole bande [15].

La Modulation Transfer Function (MTF, eq. 1) descrive la riduzione delle modulazioni del parlato originale in funzione della frequenza di modulazione. Tali modulazioni sono definite dall'inviluppo di intensità del segnale, poiché è in questo dominio che fenomeni come il rumore di fondo e la riverberazione agiscono riducendo l'ampiezza della modulazione sinusoidale, senza alterarne la forma [16].

Il segnale di test per la misura dello STI può essere semplificato escludendo le bande di ottava correlate tra loro. Questa semplificazione consente la modulazione simultanea e l'elaborazione parallela delle bande, riducendo significativamente i tempi di misura, ma limitando al contempo la capacità del sistema di rilevare alcune forme di distorsione non lineare [17].

Il metodo STIPA, *Speech Transmission Index for Public Address systems*, è validato solo per lo spettro vocale maschile, esso risulta adatto per la misurazione parlato sia naturale in ambiente che con l'ausilio di impianti elettroacustici. La durata della misurazione deve essere di circa 18 secondi, con un intervallo raccomandato tra 15 e 25 secondi, questo permette di ridurre notevolmente i tempi di misura rispetto al *full STI* che richiede circa 15 minuti.

3 | La metodologia di campionamento

La difficoltà principale riscontrata durante la campagna di misure è stata la disponibilità ridotta delle aule. Infatti, in condizioni di aula attiva, raramente è possibile avere le suddette

a disposizione per più di 45 minuti effettivi. Tale esigenza ha posto la base per la valutazione di un protocollo di misure più speditivo che potesse essere in linea con il calendario didattico dell'ateneo, senza interferire con le attività.

In base alla superficie calpestabile dell'aula da campionare si è scelto di utilizzare una griglia 3x3 o una 4x3, per creare la mappa delle posizioni di misura. Si ottengono quindi 9 o 12 acquisizioni distinte, rappresentanti una soluzione intermedia tra i requisiti della UNI 11532-2 che ne prevede almeno 5 e la ISO 3382-2 che ne prevede 12 per le misure effettuate seguendo lo standard *precision*. In aule irregolari o con le posizioni centrali come zona di passaggio si è sfalsata la griglia in modo da avere comunque una certa regolarità, mantenendo le posizioni di misura nei punti effettivi in cui gli studenti siedono. Si sono utilizzati più punti di misura dell'indice di trasmissione del parlato rispetto a quelli prescritti dalla normativa italiana con l'intento di verificare l'uniformità, in termini di scarto tipo, del valore misurato.

Si è incluso nella griglia di misura anche la posizione con più alto rumore di fondo, spesso locata vicino al proiettore o in prossimità degli impianti di climatizzazione.



Fig. 1 – Esempio di un'aula con campionamento sfalsato, in rosso le posizioni di misura, in blu i diffusori acustici
An example of a classroom with staggered sampling is in red, and the measurement positions and the acoustic speakers are in blue

La capsula del microfono è stata posta ad una distanza di 1.2 metri da terra che corrisponde all'altezza dell'orecchio di un uomo medio in posizione seduta.

Prima di procedere con le misure dei parametri acustici è necessario rilevare alcune caratteristiche geometriche fondamentali all'indagine, quali, l'altezza media della stanza e la superficie calpestabile.

La strumentazione utilizzata durante le misure è composta da:

- Fonometro analizzatore NTI XL2;
- Generatore di segnale NTI Minirator;
- Calibratore classe 1.

Il generatore di segnale è collegato all'impianto elettroacustico installato nell'aula in uno degli ingressi del centro di regolazione dei livelli (mixer o preamplificatore a seconda del caso).

È stata rilevata una evidente non standardizzazione delle tipologie dei canali di input e controllo dei sistemi di amplificazione.

Si è poi controllato che il guadagno del preamplificatore non fosse troppo elevato, questo infatti, comporterebbe una distorsione del segnale in ingresso e invaliderebbe la misura. Si è poi passati alla verifica e all'eliminazione, ove possibile, dei controlli di tono, in quanto anche questi influenzano negativamente la prova [6]. Infine, si è regolato il volume dell'amplificatore integrato per raggiungere il livello di segnale scelto per l'esecuzione della misura.

Ogni giornata di misura, ed a ogni cambio di edificio si è proceduto alla calibrazione della catena fonometrica.

Per ogni posizione di misura si è campionato il tempo di riverberazione e lo STIPA. Il livello target del segnale STIPA è stato fissato a 70 dB(A) alla distanza di 1 metro dalla sorgente, o ad una di esse nel caso di diffusori multipli. Questo livello corrisponde alle normali condizioni d'uso dell'impianto secondo la normativa UNI 11532-2. Qualora l'impianto non fosse in grado di ottenere quel livello, si è utilizzato il livello massimo permesso dall'impianto.

Si sono effettuate due misure di L_{amb} per ogni aula; si è scelta la posizione con rumore più alto, valutata aula per aula e la posizione più centrale alla stanza. Le misurazioni con una deviazione massima, rilevata durante il periodo di misura, non superiore a 0,5 dB sono state ritenute accettabili; in caso contrario, la misurazione è stata ripetuta.

Per la misura del tempo di riverberazione è stata utilizzata la tecnica del rumore stazionario interrotto, con un minimo di tre decadimenti per ogni singola posizione; è stato utilizzato il livello massimo permesso dalla sorgente, evitando eventuali distorsioni. La risposta in frequenza dell'impianto elettroacustico installato influenza la misura del decadimento, in quanto alcuni degli impianti testati non hanno sufficiente energia a 125Hz per ottenere un decadimento utile. Inoltre, in diverse aule non è stato possibile ottenere il risultato per tutte le posizioni di misura. La direttività e il posizionamento della sorgente precludono la misura secondo gli standard *precision* e *engineering* della ISO 3382-2, tuttavia, la misura fornisce comunque un'indicazione di massima sul tempo di riverberazione.

Come strumentazione di misura è stato utilizzato il NTI modello XL2 conforme alle IEC 61672 [18] e che permette l'acquisizione di tutti i parametri sopra descritti.

3.1 | La campagna di misure

Durante la campagna di misura sono state campionate un totale di 17 aule, 9 alla Facoltà di Ingegneria plesso Risorgimento, una nella facoltà di Chimica Industriale e 7 al plesso Bertalia. Sono aule con un volume superiore ai 250 m³ che presentano un impianto elettroacustico la cui installazione non era però legata alle direttive della UNI 11532. Gli ambienti hanno diversa conformazione geometrica, vi sono aule rettangolari, a gradoni e ad anfiteatro.

Per il plesso Risorgimento si sono campionati le aule: 0.2, 0.5, 0.6, 1.3, 2.4, 2.7B, 2.9, 3.3 e AULA I a chimica industriale.

Per il plesso Bertalia si sono misurate tutte le aule che dispongono di un impianto elettroacustico per la trasmissione del parlato, ovvero: TA01, TA02, TA03, TA04, TA05, TA06 e TA11.

L'eterogeneità della forma delle aule, della disposizione delle sedute e della tipologia degli impianti elettroacustici è stata utile al fine di proporre un protocollo sperimentale che sia sufficientemente robusto e testato in diverse condizioni operative.

3.2 | Costruzione del report di prova

Lo sviluppo del protocollo è avvenuto in itinere durante le misure delle 17 aule oggetto di studio. L'obiettivo primario è stato quello di individuare una procedura di misura che si attenesse il più possibile alle normative, ma, che permettesse di completare la misura di un'aula in circa 30-40 minuti. Una volta definito il protocollo sono state rifatte le misure seguendo la procedura delineata dallo stesso, questo per verificare che il protocollo sia effettivamente applicabile alle aule già misurate e che i risultati siano comparabili.

Si è cercato di rendere il contenuto del report sintetico mediante l'utilizzo di schede precompilate.

Di seguito si elencano sinteticamente i contenuti del report:

- Caratteristiche geometriche delle aule;
- Tipologia di impianto termico;
- Tipologia di impianto elettroacustico;
- Problemi audio riscontrati per ispezione diretta;
- Trattamenti acustici presenti all'interno dell'aula;
- Indice di trasmissione del parlato STI;
- Tempo di riverberazione T_{20} ;
- Livello di rumore in ambiente L_{amb} .

I primi dati elencati nella scheda sono le caratteristiche geometriche come l'altezza della stanza, l'area calpestabile, il volume e la capienza. Sono dati fondamentali per la corretta classificazione dimensionale dell'aula. Altro fattore non trascurabile è la forma dell'aula, infatti, aule a gradoni o ad anfiteatro hanno, in media, performance acustiche migliori rispetto alle stanze/ambienti rettangolari [19].

Gli impianti termici in funzione all'interno della stanza sono molto importanti in quanto, se non sufficientemente silenziosi, incrementano il livello di rumore globale indotto dagli impianti a funzionamento continuo nell'ambiente. Influenzano, quindi, sia il rumore di fondo che l'intelligibilità del parlato [20]. Nella scheda sono elencate tutte le principali tipologie di impianti termici.

L'impianto elettroacustico presente all'interno dell'aula svolge un ruolo chiave all'interno di un'aula di grandi dimensioni. Oltre al numero di diffusori, la tipologia di configurazione (mono, stereo o con più diffusori), anche la tipologia costruttiva del diffusore è uno dei parametri importanti per la caratterizzazione della performance.

Nella scheda si è tenuto conto delle tre tipologie di impianto acustico principali, i diffusori tradizionali, i diffusori caricati a tromba e i *line array*. Solo le prime due tipologie di diffusore sono state riscontrate nelle prove in campo; tuttavia, anche in ottica di *future proofing* del protocollo si è scelto di includere i sistemi di diffusione più innovativi.

Nome aula	Fotografia della stanza	
Caratteristiche Geometriche		
Tipologia di impianto termico		
Tipologia di impianto elettroacustico		
Direttività sorgente	Pianta con posizioni di misura e disposizione dei diffusori	
Alimentazione sorgente		
Posizione		
Problemi audio riscontrati	Tempo di riverberazione	STI
Forma dell'aula		

Fig. 2 – Schema strutturale della prima pagina del report. I valori di STI sono misurati per ogni posizione, con valore medio STI_m e scarto tipo. Infine, si riportano i valori di tempo di riverberazione alle frequenze di 500 e 1000 Hz, sia per singola posizione, sia per il valor medio corredata da scarto tipo

Structural diagram of the first page of the report. STI values are measured for each position, with mean STI_m value and type deviation. Finally, reverberation time values at 500 and 1000 Hz frequencies are reported, both for individual positions and for mean values accompanied by standard deviation

Trattamenti acustici presenti: Controsifitto	Grafico livello di rumore in ambiente in bande di ottava
Appesi Parete	Tabella livello di rumore in ambiente

Fig. 3 – Schema strutturale della seconda pagina del report
Structural outline of the second page of the report

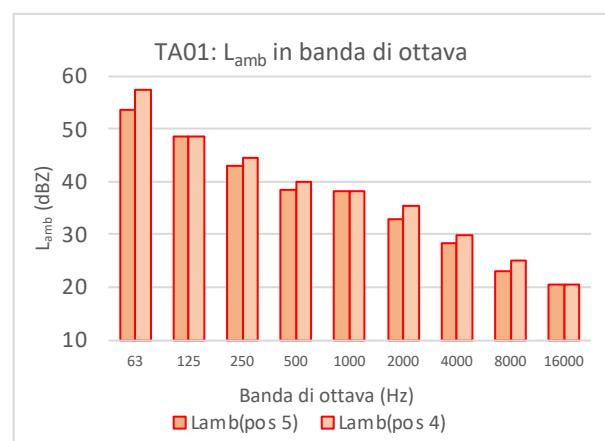


Fig. 4 – Esempio di grafico contenente il livello di rumore in ambiente, non ponderato, in bande di ottava
Example of a graph containing the ambient, unweighted noise level in octave bands

Tab. 1 – Esempio di valori di indice di trasmissione del parlato misurati all'interno di un'aula

Example of speech transmission index values measured inside a classroom

STI		
Media Aritmetica		0.48
Scarto tipo		0.03
Valore minimo		0.42
Valore massimo		0.53
Risultato: STIm- σ		0.45
Posizione	LAeq	Valore STI
1	69.3	0.53
2	69.3	0.49
3	69.1	0.50
4	69.0	0.49
5	68.6	0.47
6	68.7	0.46
7	67.4	0.47
8	68.8	0.48
9	67.2	0.42

Tab. 2 – Esempio di tabella riassuntiva per il livello di rumore in ambiente

Example of a summary table for ambient noise level

TA01 Rumore di fondo		
Posizione	L _{amb} (dBA)	Durata Misurazione (min)
4	46.1	2.00
5	46.9	2.00

Dalla definizione di funzione di trasferimento della modulazione (eq. 1) è possibile identificare le due grandezze che influenzano l'entità delle riduzioni delle modulazioni del discorso originale, in funzione della frequenza di modulazione.

Essendo p il rapporto segnale-rumore esso è direttamente influenzato dal livello di rumore in ambiente, mentre T è il tempo di riverberazione. Ciò giustifica l'inserimento nel report di prova di questi due parametri.

Il primo dei descrittori che si è campionato all'interno di ogni aula è il livello di rumore in ambiente L_{amb} . Questo parametro è espresso come media energetica spaziale dei valori ottenuti nelle posizioni di misura, rilevati come livello continuo equivalente di pressione sonora ponderato A.

La normativa specifica un tempo di misura pari a 30 minuti, tuttavia, non potendo fermare le attività didattiche, si è optato per un tempo di campionamento di 2 minuti, in quanto, si tratta principalmente di rumore derivato da impianti a funzionamento continuo che non presentano fluttuazioni temporali rilevanti. Il requisito risulta verificato in opera secondo la norma UNI 11532-2 [7] se il descrittore non supera i 41 dBA per le aule con un volume maggiore di 250 m³.

Il tempo di riverberazione è un descrittore importante per la valutazione del comfort acustico all'interno dell'ambiente, ed è il secondo parametro che influenza la funzione di trasfe-

rimento della modulazione. Anche se non si è effettuata una misura conforme alla normativa sopracitata, risulta comunque utile per valutare il contesto acustico in cui è installato l'impianto elettroacustico. Per contesto acustico si vuole intendere tutti quei fattori che, direttamente o indirettamente, influenzano il comportamento di un impianto elettroacustico installato all'interno di un ambiente confinato.

4 | Risultati

Lo scopo di questo capitolo sarà quello di analizzare le aule in funzione delle loro caratteristiche geometriche e della tipologia degli impianti tecnologici presenti. Saranno analizzati i dati raccolti durante la campagna di misure organizzati in tabelle e grafici che illustrino la situazione complessiva delle Facoltà. I confronti si basano sull'analisi dell'indice di intelligenza del parlato, del tempo di riverberazione e del livello di rumore in ambiente.

Il protocollo delineato durante la campagna di misure ha permesso di caratterizzare la performance, in termini di indice di trasmissione del parlato, dell'impianto elettroacustico di 17 aule universitarie e di raccogliere tutta una serie di dati utili a capire il contesto in cui esso opera. Si è rispettato il tempo massimo di misura, 30-40 minuti, prefissato tra gli obiettivi del protocollo. Il protocollo risulta utile se si vuole operare una indagine, survey, sulla qualità degli impianti elettroacustici presenti all'interno di grandi plessi didattici. È possibile, infatti, effettuare le misure delineate nel protocollo senza interrompere le attività didattiche del plesso oggetto di indagine. È quindi uno strumento utile per pianificare lavori di adeguamento acustico degli impianti esistenti, intervento spesso di più facile esecuzione rispetto ai trattamenti acustici passivi, soprattutto in edifici storici o vincolati.

Da una prima analisi è evidente che le caratteristiche geometriche delle aule sono particolarmente eterogenee. La maggior parte hanno una geometria rettangolare, ma si segnala la presenza di quattro aule a gradoni nel plesso e quattro aule ad anfiteatro (Tab. 3).

Si riscontra una eterogeneità anche nel volume, si passa infatti da un minimo di 330 m³ a un massimo di oltre 1100 m³ e nella capienza nominale da un minimo di 80 persone ad un massimo di 250 (Tab. 3).

Per quel che riguarda la tipologia di impianto termico al plesso Bertalia tutte le aule sono servite da impianti di ventilazione centralizzata collegati ad una unica UTA. Nel plesso Risorgimento invece sono presenti diverse soluzioni (radiatori, ventilconvettori, impianti ad aria) probabilmente dovute a migliorie e opere di ammodernamento che hanno interessato solo alcune porzioni del plesso storico.

Dal punto di vista quantitativo si è rilevato che le aule del plesso storico sono dotate di sistemi di amplificazione elettroacustica con due o quattro diffusori, fatta eccezione dell'aula 2.7B in cui ne sono installati sei. La situazione del plesso Bertalia è differente, infatti sono utilizzati da 6 a 8 diffusori a soffitto per ciascuna aula.

Nonostante le diverse tipologie di impianti elettroacustici, la Tab. 3 evidenzia come ancora la quasi totalità dei diffusori sia con direttività tradizionale puntiforme, solo tre aule presentano altoparlanti caricati a tromba. Non sono stati rilevati

diffusori di nuova generazione del tipo *Line array* o a guida d'onda. Relativamente al posizionamento dei diffusori è possibile notare come la maggior parte degli stessi siano installati o a soffitto o sulle pareti laterali.

Tab. 3 – Tabella riassuntiva con identificazione delle aule misurate, capienza, caratteristiche geometriche e descrizione dell'impianto termico ed elettroacustico

Summary table with identification of measured classrooms, capacity, geometric characteristics and thermal and electro-acoustic system

Aula	Plesso	Capienza (PAX)	Volume (m ³)	Geometria	Impianto termico	Configurazione altoparlanti	Tipologia altoparlanti	Posizione altoparlanti
I	Risorgimento	150	683	Ad Anfiteatro	Fancoil	Multipli	Tradizionale	Laterale
0.2	Risorgimento	142	456	Ad Anfiteatro	Radiatori	Stereo	Tromba	Laterale
0.5	Risorgimento	118	460	Rettangolare	Fancoil	Multipli	Tradizionale	Laterale
0.6	Risorgimento	97	427	Rettangolare	Fancoil	Stereo	Tradizionale	Laterale
1.3	Risorgimento	130	320	Ad Anfiteatro	Radiatori	Stereo	Tradizionale	Frontale
2.4	Risorgimento	190	799	Rettangolare	Radiatori	Multipli	Tromba	Laterale
2.7B	Risorgimento	145	709	Rettangolare	Radiatori	Multipli	Tradizionale	Laterale
3.3	Risorgimento	126	1132	Rettangolare	Radiatori	Multipli	Tromba	Laterale
5.6	Risorgimento	100	570	Rettangolare	UTA	Stereo	Tradizionale	Laterale
6.2	Risorgimento	250	1007	Ad Anfiteatro	UTA	Stereo	Tradizionale	Laterale
TA01	Bertalia	182	738	A gradoni	UTA	Multipli	Tradizionale	A soffitto
TA02	Bertalia	182	738	A gradoni	UTA	Multipli	Tradizionale	A soffitto
TA03	Bertalia	126	642	A gradoni	UTA	Multipli	Tradizionale	A soffitto
TA04	Bertalia	126	642	A gradoni	UTA	Multipli	Tradizionale	A soffitto
TA05	Bertalia	110	419	Rettangolare	UTA	Multipli	Tradizionale	A soffitto
TA06	Bertalia	110	419	Rettangolare	Fancoil	Multipli	Tradizionale	A soffitto
TA11	Bertalia	89	305	Rettangolare	UTA	Stereo	Tradizionale	Frontale

Tab. 4 – Tabella riassuntiva con qualificazione acustica delle aule misurate

Summary table with acoustic qualification of measured classrooms

Aula	STI _m	T ₂₀ 500Hz (s)	T ₂₀ 1000Hz (s)	T ₂₀ 2000Hz (s)	L _{amb} (dBA)
I	0.46	1.58	1.74	1.64	46.5
0.2	0.62	0.61	0.48	0.53	49.4
0.5	0.48	1.72	1.54	1.51	40.8
0.6	0.45	2.68	1.69	1.73	48.8
1.3	0.69	0.77	0.64	0.53	50.6
2.4	0.44	1.98	2.07	1.85	39.3
2.7B	0.44	2.42	2.13	1.91	35.6
3.3	0.61	1.03	0.83	0.89	37.8
5.6	0.63	1.01	0.94	1.08	43.7
6.2	0.48	1.97	1.7	1.57	49.5
TA01	0.63	1.17	0.94	0.89	41.9
TA02	0.55	1.2	1.05	0.99	50.5
TA03	0.63	1.2	0.91	0.92	43.2
TA04	0.63	1.09	1.05	0.98	42.4
TA05	0.7	0.82	0.79	0.74	39.1
TA06	0.73	0.82	0.81	0.72	39.6
TA11	0.58	1.6	1.24	1.02	43.3

4.1 | Qualificazione acustica

La situazione della Facoltà di Ingegneria, che conta due diversi poli con edifici costruiti in periodi diversi, è complessa

ed estremamente frammentata. Si vuole ora cercare di fornire un quadro complessivo dello stato di fatto verificato durante la campagna di misure. L'intelligibilità del parlato allo stato attuale è l'indicatore più importante per rispondere alle richieste dell'Ateneo, dal momento che è funzione sia del tempo di riverberazione sia del livello di rumore in ambiente.

È possibile ottenere un'indicazione approssimativa del rumore degli impianti a funzionamento continuo, presente all'interno dell'aula, utilizzando il livello di rumore in ambiente mediano tra le due posizioni campionate in opera. In figura 5 si riporta un grafico che illustra il descrittore L_{amb} all'interno delle aule misurate. Si nota come il 60% delle aule misurate ecceda il livello massimo previsto dalla normativa attuale, misurando principalmente il livello degli impianti; questo è un indicatore di un'eccessiva rumorosità all'interno degli ambienti, riducendo così il rapporto segnale rumore all'interno delle aule.

In merito al tempo di riverberazione, circa il 35% delle aule misurate presenta, tenuto conto dell'incertezza dovuta al metodo di misura, un valore probabilmente in linea con i requisiti normativi. La situazione è più sfavorevole soprattutto nelle

aule che non hanno almeno il controsoffitto fonoassorbente, come l'aula 2.7B (paragrafo 5.1); vi è anche da sottolineare come alcune aule trattate acusticamente, un esempio è l'aula 0.2 (paragrafo 5.1), presentano un valore di tempo di riverberazione contenuto rispetto al volume e alla capienza nominale delle stesse. Questi valori, sulla base dell'accuratezza della misura svolta, potrebbero indicare un valore inferiore ai limiti minimi calcolati secondo UNI 11532-2 [7].

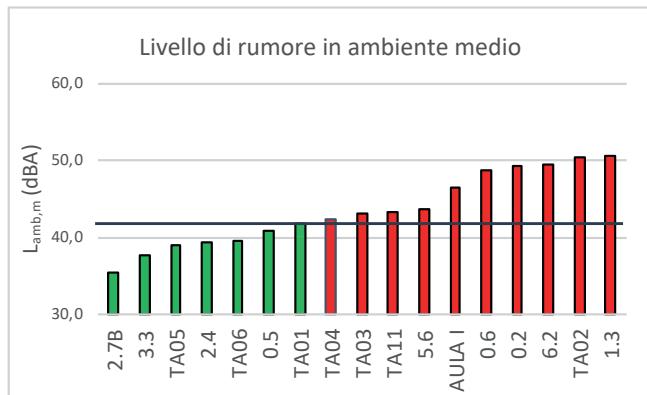


Fig. 5 – Grafico del livello di rumore in ambiente medio delle aule campionate durante la campagna di misure
Graph of the average ambient noise level of classrooms sampled during the measurement campaign

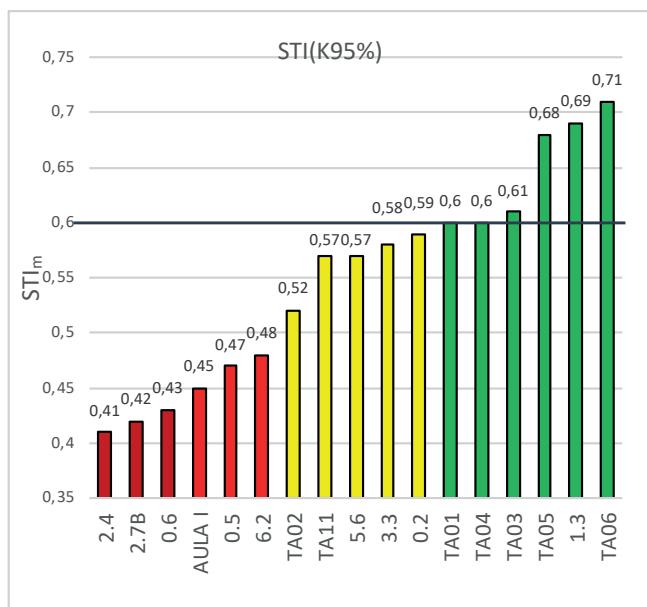


Fig. 6 – Grafico dell'indice di intelligenza del parlato nelle aule campionate durante la campagna di misure
Graph of the speech intelligibility index in classrooms sampled during the measurement campaign

5 | Considerazioni generali in merito alle aule misurate

La tabella 4 mostra come non siano stati riscontrati diffusori di tipo *line array*, ciò dimostra come gli impianti installati, almeno nella loro concezione progettuale e/o tecnologica sia-

no obsoleti, anche se di recente installazione. Per le aule più grandi sarebbe auspicabile una tecnologia con diffusori *line array*, più adatto e performante all'interno di spazi di grande dimensione in quanto permette di proiettare il suono a una maggiore distanza dalla sorgente mantenendo una risposta in frequenza più lineare [21].

Un'altra criticità che riguarda gli impianti elettroacustici è la loro installazione non ottimale: delle 17 aule oggetto di misure soltanto due hanno i diffusori installati correttamente, sulla parete frontale alle spalle del docente. Infatti, gli articoli di Massaro et al. [22-24] suggeriscono di allineare la sorgente dei compiti visivi, *visual task*, ovvero, il parlato, e dei compiti uditivi, *auditory task*. Nel caso di un'aula universitaria la *visual task* coincide con l'osservazione del docente e della lavagna da parte degli studenti, perciò, è consigliabile installare i diffusori acustici nella parete frontale conciliando il compito visivo con quello uditivo.

Anche nelle aule del plesso Bertalia, dove il requisito di indice di trasmissione del parlato è verificato con più frequenza, la disposizione dei diffusori a pioggia, (figura 14), risulta sfavorevole in termini di comfort acustico [25].

La seconda criticità rilevata in opera, del plesso Bertalia, è il rumore ambientale elevato causato principalmente dalle unità di trattamento aria. L'eccessivo livello di rumore è anche corresponsabile della diminuzione dell'indice di intelligenza del parlato nell'aula TA02 [19]. Quest'aula, infatti, è "gemella" sia per caratteristiche geometriche che per la tipologia disposizione e numero di diffusori, dell'aula TA01 che ha l'indicatore STI conforme al requisito della UNI 11532-2, tuttavia, vi è una differenza tra le due aule nell'indice di trasmissione del parlato di circa 0.1.

5.1 | Casi specifici a confronto

Si illustrano di seguito alcune aule rappresentative delle 17 totali campionate nel corso della campagna di misure. Si riporta una mappa con l'indice di intelligenza del parlato per ogni posizione.

Nel primo caso, l'aula 0.2 (figura 7 e 8) del Plesso Risorgimento, si osserva in foto (figura 8) la presenza di un controsoffitto poroso, che riduce il tempo di riverberazione. Inoltre, è possibile notare come la disposizione nelle pareti laterali di una coppia di diffusori, caricati a tromba, fornisca valori elevati di STI nelle posizioni che si trovano all'interno del campo sonoro diretto; mentre nelle zone non coperte dai diffusori si ha una diminuzione media di circa 0.1 STI. L'elevato valor medio del descrittore di intelligenza può essere giustificato in parte dalle caratteristiche geometriche della stanza, infatti, si tratta di un'aula relativamente piccola rispetto alle altre aule campionate (456 m^3) con forma ad anfiteatro ed un tempo di riverberazione contenuto, infatti, il valore, considerando i limiti di accuratezza della misura, risulta lontano dal valore minimo imposto dalla normativa. Il livello di rumore in ambiente risulta non accettabile secondo normativa, le possibili cause possono essere l'impianto

EVAC, che a causa di interferenze produce toni intermittenti, e lo scarso isolamento della facciata finestrata.

Si osservi ora la situazione dell'aula 2.7B (figura 10), si tratta di una sala con caratteristiche molto diverse dall'aula precedente, ha forma rettangolare ed un volume maggiore (709 m^3). I diffusori presentano alcune problematiche, la prima è la collocazione degli stessi sulle pareti laterali, nella stanza in questione abbiamo sei diffusori tradizionali installati a circa tre metri di altezza e direzionati parallelamente al soffitto. L'indice di intelligenza del parlato risulta non conforme ai requisiti. Possibili fattori di riduzione dell'indicatore possono essere la non corretta inclinazione dei diffusori e la tecnologia costruttiva degli altoparlanti. Il livello di rumore in ambiente risulta contenuto.

Un'altra problematica dell'aula è il tempo di riverberazione elevato, la causa è da ricercarsi nella mancanza di qualsiasi materiale atto ad aumentare l'assorbimento acustico della stessa. Infatti, l'aula non presenta alcun trattamento fonoassorbente, ha pareti in muratura intonacate, una grande facciata vetrata e sedute in legno rigide.

L'aula TAO2 è situata al plesso Bertalia, ha un volume (738 m^3) simile alla 2.7B, ma una conformazione geometrica a gradoni. Anche la disposizione dei diffusori è differente, si tratta infatti di otto diffusori installati a soffitto; osservando la planimetria (figura 10, in rosso le posizioni di misura, in blu i diffusori a soffitto) è possibile notare come le prime sedute abbiano un valore inferiore rispetto alle altre, a causa della copertura dell'impianto elettroacustico non adeguata in queste posizioni.

Il tempo di riverberazione è in linea di massima conforme ai requisiti normativi. Il significativo livello di rumore in ambiente è dovuto all'elevata rumorosità dell'unità di trattamento aria.

Infine, l'indice di trasmissione del parlato risulta non conforme ai requisiti UNI 11532-2 [7], a causa dell'elevato rumore di fondo generato dalla ventilazione e dal posizionamento dei diffusori a pioggia, che non garantiscono una copertura adeguatamente omogenea della platea.

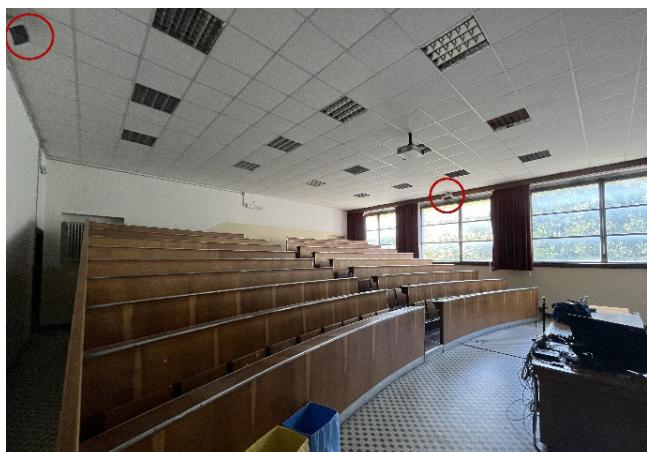


Fig. 7 – Aula 0.2, all'interno del cerchio in rosso i diffusori caricati a tromba
Classroom 0.2, inside the circle in red horn-loaded speakers

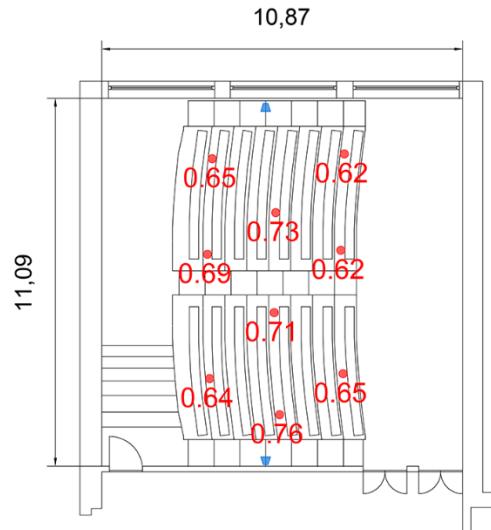


Fig. 8 – Mappa dell'indice di intelligenza del parlato, misurato in 9 posizioni, dell'aula 0.2
Map of the speech intelligibility index, measured in 9 positions, classroom 0.2

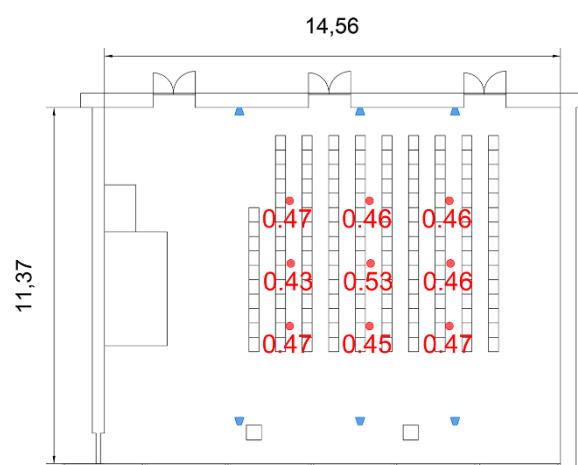


Fig. 9 – Mappa dell'indice di intelligenza del parlato, misurato in 9 posizioni, dell'aula 2.7B
Map of the speech intelligibility index, measured in 9 positions, classroom 2.7B

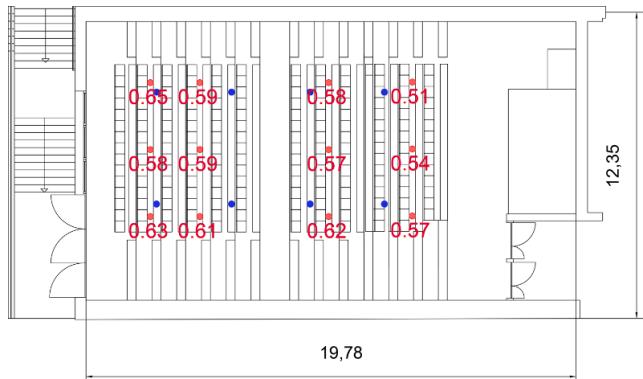


Fig. 10 – Mappa dell'indice di intelligenza del parlato, misurato in 12 posizioni, dell'aula TAO2. In rosso le posizioni di misura, in blu le sorgenti sonore
Map of the speech intelligibility index, measured in 12 positions, classroom TAO2. In red measurement locations, in blue sound sources

5.2 | L'indice di trasmissione del parlato per ascoltatori non madrelingua

Negli ultimi anni il numero degli studenti non madrelingua che frequentano l'ateneo è aumentato. Sorge quindi la necessità di porre attenzione anche a questa categoria di studenti, che spesso si trovano svantaggiati rispetto ai compagni di corso madrelingua. La normativa IEC 60268-16 [5] da indicazioni in merito nell'appendice H; per ottenere lo stesso livello di intelligenza gli ascoltatori non madrelingua necessitano di un miglioramento del rapporto segnale rumore di 4-5 dB.

Wijngaarden et al. [4] suggeriscono che, in presenza di parlante o di ascoltatori non madrelingua, sia necessario aumentare l'indice di intelligenza accettabile di circa 0.13. Questo porterebbe l'indicatore da 0.6 a 0.73 valore che non è stato riscontrato in nessuna delle aule misurate. Si tratta di un valore elevato, ma, data la ricorrenza con cui questa casistica si presenta all'interno dell'università, si rende necessario portare particolare attenzione anche a questa criticità. L'innalzamento dei requisiti dell'indice di intelligenza del parlato risulta necessario se si intende aumentare l'inclusività e l'internazionalizzazione della facoltà.

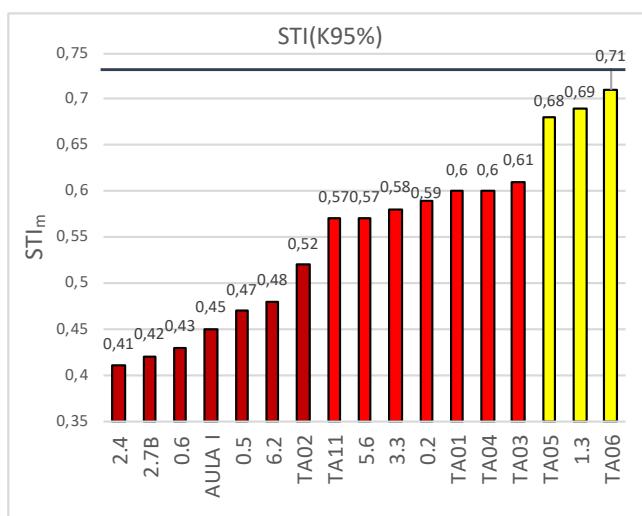


Fig. 11 – Grafico con indice di intelligenza del parlato per persone non madre lingua, il valore minimo accettabile è stato alzato da 0,6 a 0,73

Graph with speech intelligibility index for non-native speakers, the minimum acceptable value was raised from 0.6 to 0.73

6 | Conclusioni

Il presente articolo descrive la realizzazione di un protocollo sperimentale che possa permettere ad un singolo operatore l'esecuzione delle prove atte a valutare le principali grandezze acustiche presenti all'interno della normativa UNI 11532-2.

Dalla misurazione di 17 aule della facoltà di ingegneria dell'università di Bologna si è sviluppato un protocollo sperimentale. Le aule in questione presentano caratteristiche eterogenee sia in termini di geometria, sia di impianti tecnologici

presenti all'interno delle sale, questo ha permesso di ottimizzare il protocollo per molteplici scenari.

Successivamente si è realizzato un report di prova in grado di contenere tutte le informazioni necessarie a individuare le caratteristiche di una sala che influenzano il comportamento dell'impianto elettroacustico installato: descrizione geometrica della stessa, descrizione degli impianti tecnologici presenti all'interno e indice di intelligenza del parlato, tempo di riverberazione e livello di rumore in ambiente.

La seconda parte dell'articolo espone e commenta i dati raccolti durante la campagna di misure, cercando di caratterizzare le aule misurate sia in base alla geometria delle stesse, sia per gli impianti elettroacustici al loro interno. A seguire si sono messe a confronto alcune aule rappresentative dello stato di fatto all'interno dei plessi oggetto di indagine, con particolare attenzione verso gli studenti non madre lingua. Questo nell'ottica di migliorare l'internazionalizzazione e l'inclusività all'interno della facoltà.

Dall'analisi dei dati risulta che il 35% delle aule rispettano i requisiti di indice di trasmissione del parlato.

Conclusions

This paper describes the development of an experimental protocol that can allow a single operator to perform tests designed to evaluate the main acoustic quantities present within the UNI 11532-2 standard.

An experimental protocol was developed from the measurement of 17 classrooms in the faculty of engineering at the University of Bologna. The classrooms in question have heterogeneous characteristics both in terms of geometry and technological systems present within the rooms, this allowed the protocol to be optimized for multiple scenarios.

Subsequently, a test report was produced that could contain all the information necessary to identify the characteristics of a room affecting the behavior of the installed electroacoustic system: geometric description of the room, description of the technological systems present inside and speech intelligibility index, reverberation time and ambient noise level.

The second part of the article sets out and comments on the data collected during the measurement campaign, attempting to characterize the measured classrooms both by their geometry and by the electroacoustic systems within them. This was followed by comparing some representative classrooms of the actual state within the surveyed plexuses with a focus on non-native language students with a view to improving internationalization and inclusiveness within the faculty.

Data analysis shows that 35% of the classrooms comply with STI requirements.

7 | Ringraziamenti

Gli autori vogliono ringraziare Ruggero Giordano e Antonio Minerva del CESIA, area sistemi e servizi informatici dell'università di Bologna, per l'aiuto nell'organizzazione della campagna di misura e il supporto nell'interfacciarsi con gli altri organi dell'amministrazione universitaria.

Bibliografia

- [1] Hodgson, M., R. Rempel, and S. Kennedy (1999). Measurement and prediction of typical speech and background-noise levels in university classrooms during lectures. *The Journal of the Acoustical Society of America* 105 (1), 226–233. DOI: 10.1121/1.424600.
- [2] Pelegrin-Garcia, D., B. Rasmussen, and J. Brunskog (2014). Classroom acoustics design for speakers' comfort and speech intelligibility: a european perspective. In *Proceedings of Forum Acusticum 2014*.
- [3] Pelegrín-García D, Brunskog J, Lyberg-Åhlander V, Löfqvist A. Measurement and prediction of voice support and room gain in school classrooms. *J Acoust Soc Am*. 2012 Jan;131(1):194-204. DOI: 10.1121/1.3665987.
- [4] Wijngaarden, S.J., Van, Steeneken, H.J.M. and Houtgast, T. (2002). Quantifying the intelligibility of speech in noise for non-native listeners, *J. Acoust. Soc. Am*, DOI: 10.1121/1.1456928.
- [5] ISO 3382-2 Acoustic: Measurement of room acoustic parameters – Part 2 Reverberation time in ordinary rooms.
- [6] IEC 60268-16: Sound system equipment – Part 16: Objective rating of speech intelligibility by speech transmission index.
- [7] UNI 11532-2 Acustica in edilizia – Caratteristiche acustiche interne di ambienti confinati – Metodi di progettazione e tecniche di valutazione – Parte 2: Settore scolastico.
- [8] D'Orazio, D., Fratoni, G., & Tardini, V. (2025). The Italian standard on classroom acoustics UNI 11532-2: 2020 explained through case studies. *Applied Acoustics*, 231, 110498. DOI: 10.1016/j.apacoust.2024.110498.
- [9] Fratoni, G., De Salvio, D., Tardini, V., Garai, M., Valdiserri, P., Biserni, C., & D'Orazio, D. (2025). Student Activity in Suboptimal Thermal and Acoustic Conditions: An In-Field Study in Active Classrooms. *Applied Sciences*, 15(6), 3119. DOI: 10.3390/app15063119.
- [10] De Salvio, D., & D'Orazio, D. (2022). Effectiveness of acoustic treatments and PA redesign by means of student activity and speech levels. *Applied Acoustics*, 194, 108783. DOI: 10.1016/j.apacoust.2022.108783.
- [11] Fratoni, G., De Salvio, D., D'Orazio, D., & Garai, M. (2021). Acoustical comfort in university lecture halls: simulating the dynamic role of occupancy. In 17th International Conference of the International Building Performance Simulation Association (BS 2021) (pp. 3704-3711). DOI: 10.3390/app15063119.
- [12] Steeneken, H.J.M. and Houtgast, T., "Some applications of the Speech Transmission Index (STI) in auditoria", *Acustica* 51, 1982, p. 229-234.
- [13] Steeneken, H.J.M. and Houtgast, T., "A physical method for measuring speech transmission quality", *J. Acoust. Soc. Amer.* 67, 1980, 31, p.318-326.
- [14] Houtgast, T. and Steeneken, H.J.M., "The modulation transfer function in room acoustics as a predictor of speech intelligibility", *Acustica* 28, 1973, p.66-73.
- [15] Steeneken, H.J.M. and Houtgast, T., "Mutual dependency of the octave-band weights in predicting speech intelligibility," *Speech Communication* 28, 1999, p.109-123. DOI: 10.1016/S0167-6393(99)00007-2.
- [16] Houtgast, Tammo, and Herman JM Steeneken. "A review of the MTF concept in room acoustics and its use for estimating speech intelligibility in auditoria. " *The Journal of the Acoustical Society of America* 77.3: 1069-1077, 1985.
- [17] Steeneken, H.J.M., Verhave, J.A., McManus, S., and Jacob, K.D., (2001) "Development of an Accurate, Handheld, Simple-to-use Meter for the Prediction of Speech Intelligibility", *Proceedings IoA 2001, Reproduced sound* (17). Stratford-upon-Avon, UK.
- [18] CEI EN 61672-1, "Electroacoustics – Sound level meters – Part 1: Specifications", 2013.
- [19] Bradley, John S. *Acoustical design of rooms for speech*. Ottawa, ON: Institute for Research in Construction, National Research Council of Canada, 2002. DOI: 10.4224/40002824
- [20] Murray Hodgson, Case-study evaluations of the acoustical designs of renovated university classrooms, *Applied Acoustics*, Volume 65, Issue 1, 2004, Pages 69-89, DOI: 10.1016/S0003-682X(03)00108-7.
- [21] Urban, Marcel, Christian Heil, and Paul Bauman. "Wavefront sculpture technology." *Journal of the Audio Engineering Society* 51.10 (2003): 912-932.
- [22] Massaro, D.W., & Warner, D.S. (1977). Dividing attention between auditory and visual perception. *Perception & Psychophysics*, 21(6), 569-574.
- [23] Massaro, D.W., & Simpson, J.A. (2014). *Speech perception by ear and eye: A paradigm for psychological inquiry*. Psychology Press. DOI: 10.4324/9781315808253.
- [24] Massaro, D.W., & Palmer Jr, S.E. (1998). *Perceiving talking faces: From speech perception to a behavioural principle*. Mit Press.
- [25] Lalonde, K., Werner, L.A. (2019). Infants and adults use visual cues to improve detection and discrimination of speech in noise. *Journal of Speech, Language, and Hearing Research*, 62(10), 3860-3875, DOI: 10.1044/2019_JSLHR-H-19-0106.

Un'applicazione di design acustico all'interno di ambienti scolastici

Francesco Asdrubali^a | Lucia Busa^b | Cristina Carrus^c | Sergio Luzzi^b | Paola Pulella^{b*}

^a Università per Stranieri di Perugia,
Piazza Braccio Fortebraccio, 4,
06123 Perugia

^b Vie en.ro.se. Ingengeria Srl,
Viale Belfiore, 36, 50144 Firenze

^c Ecophon Saint Gobain,
Via Giovanni Bensi, 8, 20152 Milano

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

Ricevuto: 17/9/2024

Accettato: 22/8/2025

DOI: 10.3280/ria2-2025oa18517

ISSN: 2385-2615

L'esposizione al rumore in ambito scolastico può incidere sull'apprendimento e sulle capacità di ascolto e concentrazione da parte degli studenti. Tali effetti extra-uditivi da esposizione al rumore sono stati confermati da numerosi studi di settore e analizzati nell'ambito del progetto BRIC INAIL 2019 ID14. Il presente elaborato riporta i risultati dell'analisi acustica condotta in un'aula scolastica prima e dopo un intervento di riqualificazione acustica. L'intervento ha previsto l'installazione di un controsoffitto e di pannelli a parete, realizzati con materiale fonoassorbente. I parametri acustici analizzati sono stati il tempo di riverberazione e la chiarezza C_{50} . Dal confronto dei risultati delle misure effettuate nella configurazione ante-operam e post-operam è possibile osservare come l'intervento di correzione acustica abbia portato alla riduzione del tempo di riverberazione a tutte le frequenze, rientrando nell'intervallo di conformità che la norma UNI 11532-2 prevede per gli ambienti di categoria A.2, e i valori della chiarezza C_{50} , nel campo di frequenze tra 500 e 2000 Hz, risultino ampiamente conformi al valore di riferimento.

Parole chiave: aula scolastica, correzione acustica, tempo di riverberazione, chiarezza

A case study of acoustic design for school environments

Noise exposure in schools can affect students' learning, listening and concentration abilities. These extra-auditory effects from noise exposure have been confirmed by numerous studies and analysed within the framework of the INAIL 2019 BRIC project ID14. This paper reports the results of the acoustic analysis conducted in a classroom before and after acoustic refurbishment. The intervention consisted of the installation of a false ceiling and wall panels made of sound-absorbing material. The acoustic parameters analysed were reverberation time and clarity C_{50} . Comparing the results of the measurements taken in the ante-operam and post-operam configuration, it can be seen that the acoustic correction led to a reduction of reverberation time values at all frequencies, in compliance with the range required by UNI 11532-2 for category A.2 rooms, and the clarity values, in the frequency range between 500 and 2000 Hz, are in full compliance with the reference value.

Keywords: classroom, acoustic refurbishment, reverberation time, clarity

1 | Introduzione

Le aule scolastiche sono ambienti che richiedono un buon trattamento acustico al fine di facilitare l'apprendimento e la concentrazione. Nelle scuole, infatti, vengono svolte attività complesse che implicano l'elaborazione di nuove informazioni e la comprensione di lunghi ragionamenti. Un ambiente acustico adeguato è quindi essenziale per migliorare la capacità di concentrazione e di ascolto, riducendo gli sforzi aggiuntivi e promuovendo il benessere generale [1].

Il rumore causa stress e disturba la concentrazione, influenzando negativamente l'apprendimento [2-3]. Alcuni studi realizzati in scuole italiane e inglesi hanno evidenziato che una scarsa qualità acustica riduce la concentrazione causando interruzioni durante le lezioni [4-5]. A tal proposito, la progettazione acustica risulta importante e, in particolare, risulta cruciale porre attenzione alle prime riflessioni del suono, in quanto migliorano l'intelligibilità del parlato. La norma ISO

3382-2 suggerisce che una differenza di chiarezza del discorso (C_{50}) di 3 dB è necessaria per un miglioramento significativo. Inoltre, misurare diversi parametri acustici è essenziale per una valutazione accurata della qualità acustica, come indicato nello standard UNI 11532-2. Indagini oggettive e soggettive sono state condotte in realtà scolastiche di vario ordine e grado, coinvolgendo studenti e docenti [6-8].

Nell'ambito del progetto BRIC 2019 ID14, finanziato da INAIL e a cui hanno preso parte sei atenei italiani, sono state condotte alcune campagne di misure fonometriche, sia ad ambienti occupati che non occupati, in diverse realtà scolastiche nelle città di Firenze, Roma e Perugia. La ricerca ha portato a caratterizzare l'acustica degli ambienti scolastici selezionati, includendo la valutazione soggettiva degli effetti extra-uditivi dell'esposizione al rumore e la qualità acustica degli ambienti, attraverso la somministrazione di un questionario. I risultati ottenuti sono stati analizzati nell'ottica di realizzare una linea guida per la valutazione e il controllo degli effetti extra-uditivi

[9] e saranno corroborati da ulteriori dati in una seconda fase del Progetto BRIC.

Tra gli istituti selezionati come caso studio, una scuola superiore di Firenze si è resa disponibile e propensa alla realizzazione di un progetto di riqualificazione acustica dell'aula scolastica in cui erano state condotte le misure fonometriche durante il progetto BRIC 2019 ID14. L'intervento ha previsto l'installazione di panelli fonoassorbenti a parete e la realizzazione di un controsoffitto fonoassorbente. Al fine di valutare l'efficacia oggettiva di tale intervento, è stato eseguito il confronto di alcuni parametri acustici tra la condizione ante-operam e post-operam e verificato il soddisfacimento dei valori normativi di riferimento [10-11].

2 | Scenario di intervento

L'aula oggetto di studio è caratterizzata da una superficie in pianta pari a circa 47.5 m^2 ($6.5 \times 6.86 \text{ m}$), altezza 3.76 m (3.40 m sotto trave) e un volume pari a circa 165 m^3 . Si tratta di un ambiente di forma rettangolare con la parete di facciata rivolta verso il cortile interno della scuola. Sono attualmente presenti n. 17 posti a sedere per gli alunni.

L'aula, come si può vedere dalla pianta e dalle immagini fotografiche riportate in Fig. 1 e Fig. 2, è delimitata da

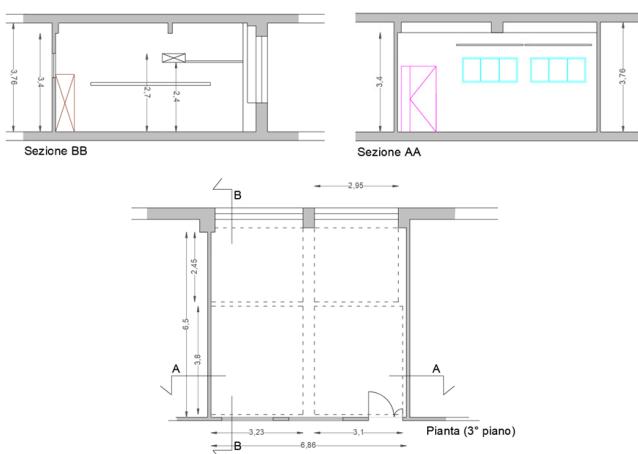


Fig. 1 – Pianta e sezioni dell'aula
Classroom floor plan and sections



Fig. 2 – Aula prima del trattamento acustico
Classroom before acoustic correction

soffitto e pareti intonacate, pavimento in graniglia e infissi finestrati anche verso il corridoio. L'aula è arredata con 17 banchi in laminato e sedie in legno, una cattedra in laminato e sedia in legno, una lavagna interattiva, una lavagna tradizionale e una libreria in legno.

3 | Metodologia e programma delle attività

Alla luce di quanto evidenziato dal campione di studenti analizzato, in riferimento ai danni extra-auditivi e alle ridotte performance in relazione all'esposizione al rumore, si è proceduto con uno studio acustico di dettaglio dell'aula didattica, al fine di migliorarne la qualità acustica.

Le misure ante-operam hanno compreso la misurazione del Tempo di Riverberazione (T_{30}) e della Chiarezza (C_{50}) in accordo con le norme tecniche UNI EN ISO 3382-2 [12]. Sono stati individuati i valori medi nelle condizioni di misura e confrontati con i valori di riferimento, per procedere poi alla progettazione e installazione delle soluzioni.

Le misure post-operam, eseguite dopo la realizzazione degli interventi, hanno previsto l'effettuazione delle stesse rilevazioni fonometriche della prima fase e la comparazione dei risultati.

Il progetto ha previsto:

- **controsoffitto** fonoassorbente tipo, da parete a parete, sui 4 quadranti del soffitto, con bass traps su 3 lati del perimetro dell'aula per un 50% di superficie (superficie totale trattata di circa $39,5 \text{ m}^2$). Il sistema del controsoffitto si compone di una superficie rinforzata in modo da resistere agli impatti e in combinazione con lo strato per le basse frequenze consente di raggiungere alti coefficienti di fonoassorbimento in particolare alle basse frequenze (Tab. 1);
- **rivestimento a parete** con pannelli fonoassorbenti e bass traps sulla parte alta del fondo dell'aula (superficie

Tab. 1 – Coefficienti di assorbimento acustico dei pannelli a parete e del controsoffitto
Sound absorption coefficients of wall panels and ceiling

Materiale SP [mm]/ o.d.s. [mm]	α_p coefficiente pratico di assorbimento acustico							Classe di assorbimento acustico
	125	250	500	1000	2000	4000	α_w	
Controsoffitto 70/200	0.7	1	1	1	1	1	1	A
Controsoffitto 80/80	0.65	1	0.95	1	1	1	1	A

trattata di circa 6,7 m²). I pannelli, realizzati in lana di vetro ad alta densità e rivestiti di un tessuto resistente, presentano nel retro uno strato per le basse frequenze, raggiungendo uno spessore totale di 80 mm (Tab. 1).

I prodotti rispondono ai requisiti previsti dai CAM.

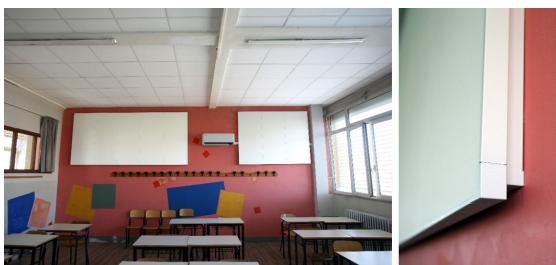


Fig. 3 – Aula dopo il trattamento acustico
Classroom after acoustic correction

4 | Analisi e comparazione dei risultati delle misure post-operam con la situazione ante-operam e con i valori di riferimento

Per valutare la qualità acustica dell'aula scolastica, sono stati analizzati il **Tempo di riverberazione** (T_{60}) e la **Chiarezza del Parlato** (C_{50}). Questi parametri sono fondamentali per comprendere come l'acustica di una stanza influisce sulla qualità del suono.

La categoria A2 di riferimento per l'aula oggetto del presente studio comprende attività che necessitano di un elevato grado di intelligenza e prevedono la presenza di un oratore frontale (aula didattiche, aule magne).

Le relazioni di calcolo dei valori ottimali del tempo di riverberazione, valide per le categorie da A1 a A5, sono riportate nel prospetto 6 della norma UNI 11532-2 e si riferiscono agli ambienti arredati e occupati all'80% della loro capienza; mentre il valore di riferimento per il descrittore C_{50} viene fornito per ambienti con volume inferiore a 250 m³ e senza impianto di amplificazione.

Per ambienti con volume inferiore a 250 m³ e di categorie A1, A2, A3 e A4, si può verificare il parametro chiarezza C_{50} in alternativa allo STI. Le condizioni di verifica sono state: ambiente arredato ma non occupato (presenza dei soli tecnici che hanno condotto le misure). I valori di riferimento riportati nella Tab. 1 sono ottenuti come media aritmetica nelle diverse postazioni di calcolo nelle bande di ottava 500, 1000 e 2000 Hz.

Come detto, sono state effettuate due campagne di misure fonometriche per determinare i parametri di comfort acustico degli ambienti interni (T_{30} e C_{50}): la prima nella configurazione ante-operam e la seconda a seguito della realizzazione degli interventi di correzione acustica.

Tab. 2 – Valori di riferimento per il tempo di riverberazione
Reference values for reverberation time

Tempo di riverberazione (cat. A1-A5)		
Categoria	Ambiente occupato all'80%	
A2	$T_{ott,A2} = (0.37\log V + 0.14)$	$50m^3 \leq V \leq 5000m^3$

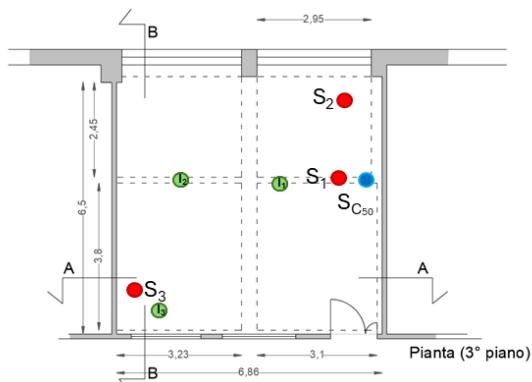
Tab. 3 – Valori di riferimento per la chiarezza C_{50}

Reference values for clarity C_{50}

Tempo di riverberazione (cat. A1-A4)

Presenza/assenza di impianto di amplificazione sonora	$V < 250m^3$
---	--------------

Senza impianto di amplificazione sonora	$\geq 2dB$
---	------------



S_{TR} Posizioni della sorgente impulsiva (Clappatore) utilizzate per le misure del tempo di riverberazione

S_{C50} Posizione della sorgente impulsiva (Clappatore) utilizzata per le misure della chiarezza C_{50}

(1) Posizioni fonometriche durante le misure con sorgente impulsiva per determinare il parametro della chiarezza C_{50}

Fig. 4 – Pianta dell'aula con indicazione delle postazioni di misura
Classroom floor plan and measurement points

La risposta acustica è stata acquisita mediante rilevazione del tempo di riverberazione, utilizzando una sorgente impulsiva (clappatore). Le posizioni di sorgenti e microfoni sono state selezionate in modo da rispettare le distanze minime stabilite dalla norma di riferimento per la misura del tempo di riverbero, la UNI EN ISO 3382.

Per quanto riguarda le misure della Chiarezza, l'indagine è stata effettuata mediante l'esecuzione delle seguenti attività:

- effettuazione delle misure di Chiarezza C_{50} ;
- correzione della Chiarezza C_{50} mediante incertezza di misura;
- confronto con i limiti di riferimento della categoria in esame.

La Chiarezza è stata misurata mediante acquisizione della risposta all'impulso in accordo alla norma UNI EN ISO 3382, nelle posizioni e condizioni indicate nella norma UNI 11532-2.

Nei grafici delle Figure 5 e 6 sono riportate le comparazioni tra i livelli del tempo di riverberazione e della chiarezza nelle configurazioni ante-operam e post-operam. Da queste si può osservare che i valori della Chiarezza nelle diverse postazioni dell'aula dove sono state effettuate le verifiche, nel campo di frequenze tra 500 e 2000 Hz, risultano ampiamente conformi al valore di riferimento della UNI 11532-2 ($C_{50} > 2$ dB).

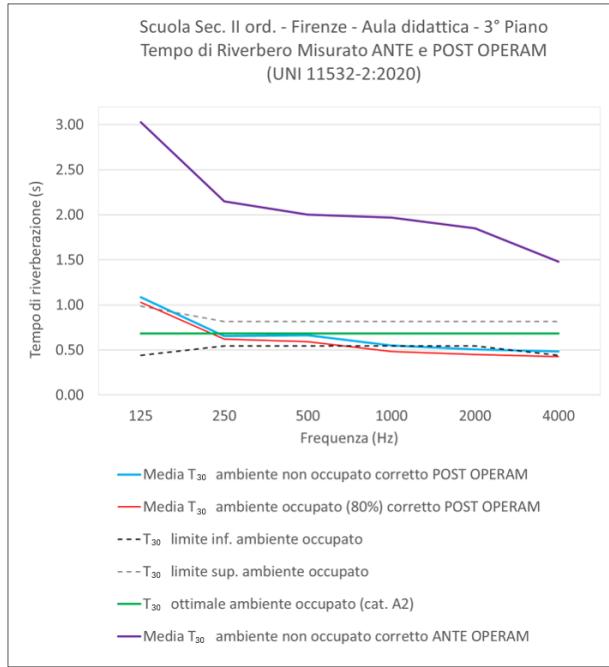


Fig. 5 – Confronto dei tempi di riverberazione
Comparison of reverberation times

Dai risultati delle misure effettuate nella configurazione post-operam si può osservare come l'intervento di correzione acustica realizzato riduca il tempo di riverberazione a tutte le frequenze, rientrando nell'intervallo di conformità che la norma UNI 11532-2 prevede per gli ambienti di categoria A.2.

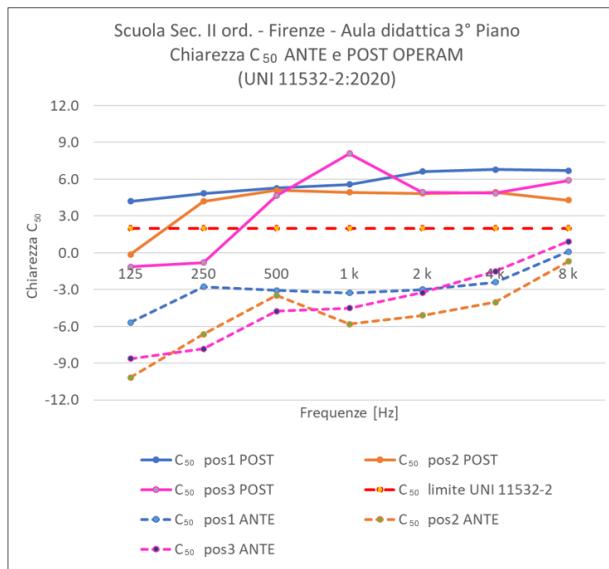


Fig. 6 – Confronto dei risultati relativi alla chiarezza del parlato
Comparison of speech clarity results

Come si può osservare nel grafico sopra riportato, i valori della Chiarezza nelle diverse postazioni dell'aula ove sono state effettuate le verifiche, nel campo di frequenze tra 500 e 2000 Hz, risulta ampiamente conforme al valore di riferimento della UNI 11532-2 ($C_{50} > 2$ dB).

5 | Risultati delle indagini soggettive

Le risposte al questionario, somministrato a studenti di vario ordine e grado, hanno evidenziato la manifestazione di danni extra-uditivi conseguenti all'esposizione al rumore nell'aula didattica. In particolare, il campione analizzato ha frequentemente rilevato, a seguito dell'esposizione al rumore, perdita di concentrazione (per il 64% degli studenti) e affaticamento (43%). Inoltre, la presenza di rumore in aula comporta, molto spesso, maggiore impegno per lo svolgimento di un compito (59%), una maggiore perdita della concentrazione (53%) e una maggiore stanchezza (52%).

6 | Conclusioni

Nella presente nota tecnica sono riportati i risultati dell'analisi acustica effettuata in un'aula caso studio. Tale ambiente è stato individuato tra le realtà scolastiche che hanno aderito al progetto BRIC e scelto per la realizzazione di interventi di riqualificazione acustica volti a rispettare i requisiti della categoria A.2 secondo la norma UNI 11532-2:2020.

Sono state effettuate due campagne di misure fonometriche dei diversi parametri che caratterizzano il comfort acustico degli ambienti interni (T_{30} e C_{50}), la prima nella configurazione ante-operam e la seconda a seguito della realizzazione degli interventi di correzione acustica.

Tale intervento è stato eseguito al fine di migliorare la qualità acustica dell'aula e intervenire sulle evidenze extrauditive rilevate dagli studenti. Ottenere una migliore qualità acustica per la comunicazione verbale è essenziale. Per supportare tutti gli aspetti della comunicazione, dal parlato all'ascolto, è necessario considerare la progettazione edilizia e acustica da diverse prospettive. Grazie agli interventi acustici realizzati, il tempo di riverberazione ha mostrato una riduzione rispetto alla fase ante-operam, mentre la chiarezza del parlato è notevolmente migliorata.

I risultati delle misurazioni post-operam hanno dimostrato che gli interventi di correzione acustica a soffitto e a parete, definiti e realizzati dal committente, rispettano i limiti di riferimento per la categoria A.2 per entrambi i parametri analizzati. Nella prosecuzione del Progetto BRIC, si prevede di verificare l'efficacia degli interventi di riqualificazione acustica attraverso la somministrazione di questionari post-operam.

Conclusions

This paper reports the results of the acoustic analysis carried out in a case study classroom. The classroom was chosen among schools which joined the Bric Project. In the case study room acoustic refurbishment were carried out aimed at meeting the requirements of category A.2 of UNI 11532-2:2020 standard.

SPL measurements were carried out in order to assess the acoustic comfort of the classroom, based on two acoustic parameters (T_{30} and C_{50}), before and after the implementation of the acoustic correction interventions.

This intervention was carried out to improve the acoustic quality of the classroom and intervene on extra-auditory damage highlighted by the students. Achieving better acoustics for verbal communication is essential. To support all aspects of communication, from speaking to listening, it is necessary to consider building and acoustic design from different perspectives. Thanks to the acoustic measures implemented, reverberation time showed a reduction compared to the pre-operam phase, whereas speech clarity improved significantly. In the follow-up of the BRIC Project, it is planned to verify the effectiveness of the acoustic upgrading measures through the administration of post-operam questionnaires.

Bibliografia

- [1] E. Arvidsson, Acoustic Design with Regard to Human Perception, *Engineering Acoustics*. (2022) [https://doi.org/10.1016/S0022-460X\(81\)80020-X](https://doi.org/10.1016/S0022-460X(81)80020-X).
- [2] B. Berglund, T. Lindvall, D.H. Schwela, Guidelines for community noise, World Health Organization. (1999)
- [3] J.L. Szalma, P. A. Hancock, Noise effects on human performance: A metanalytic synthesis, *Psychological Bulletin*. 137(4) (2011) 682-707.
- [4] A. Astolfi, F. Pellerey, Subjective and objective assessment of acoustical and overall environmental quality in secondary school classrooms, *J Acoust Soc Am*. 123 (2008) 163–173. <https://doi.org/10.1121/1.2816563>.
- [5] B. Shield, R. Conetta, J. Dockrell, D. Connolly, T. Cox, C. Mydlarz, A survey of acoustic conditions and noise levels in secondary school classrooms in England, *J Acoust Soc Am*. 137 (2015) 177–188. <https://doi.org/10.1121/1.4904528>.
- [6] A. Astolfi, F. Pellerey, Subjective and objective assessment of acoustical and overall environmental quality in secondary school classrooms, *J Acoust Soc Am*. 123 (2008), 163–173. <https://doi.org/10.1121/1.2816563>.
- [7] A. Astolfi, G. E. Puglisi, S. Murgia, G. Minelli, F. Pellerey, A. Prato, T. Sacco, Influence of Classroom Acoustics on Noise Disturbance and Well-Being for First Graders, *Front. Psychol.* 10:2736. doi: 10.3389/fpsyg.2019.02736
- [8] E. Sala, L. Rantala, Acoustics and activity noise in school classrooms in Finland, *Applied Acoustics*, vol 114 (2016) 252–259.
- [9] F. Cotana, F. Asdrubali, G. Arcangeli, F. Sanjust, L. Cerini, Extra-Auditory Effects from Noise Exposure in Schools: Results of Nine Italian Case Studies, *Acoustics*. 5(1) (2023) 216-241. <https://doi.org/10.3390/acoustics5010013>.
- [10] I. Polewczuk, M. Jarosz, "Teachers' and Students' Assessment of the Influence of School Rooms Acoustic Treatment on Their Performance and Wellbeing," *Archives of Acoustics*, vol. 45, Art. no. 3, 2020, doi: 10.24425/aoa.2020.134057.
- [11] S. Secchi, V. Amodeo, Misure comparate di Speech Transmission Index e Tempo di Riverbero in edifici scolastici ante e post interventi di miglioramento, in atti del 47° Convegno Nazionale della Associazione Italiana di Acustica, on-line, 24-28 maggio 2021.
- [12] UNI EN ISO 3382-2:2008 Acustica – Misurazione dei parametri acustici degli ambienti – Parte 2: Tempo di riverberazione negli ambienti ordinari.

Acoustic characterisation of the noise emitted by a padel court

Edoardo Piana^{a*} | Diego Tonetti^a | Jorge Garcia^a | Emanuela Milesi^b

^a University of Brescia,
Via Branze, 38, 25123 Brescia

^b Miro Ingegneria Acustica Srl,
Via Fallaci, 19, 25020 Flero

* Corresponding author:
edoardo.piana@unibs.it

Ricevuto: 15/9/2025

Accettato: 25/9/2025

DOI: 10.3280/ria2-2025oa21012

ISSN: 2385-2615

In recent years, padel has rapidly become one of the most widespread sports practices, thanks to its similarities with tennis and squash, its dynamic nature, and the small size of the playing field. This last characteristic has facilitated the proliferation of courts, which can be built both indoors and outdoors. In the latter case, the noise generated during play can freely propagate to nearby receptors and potentially cause annoyance. Therefore, a thorough study of the acoustic impact of these facilities is necessary, especially when they are built near residential areas. An accurate prediction of acoustic impact requires precise emission data as input. At present, scientific literature regarding sound power data associated with noise from padel courts is rather scarce. This study provides sound power data based on experimental measurements. Furthermore, using ambisonics techniques, the research aims to highlight possible noise mitigation measures applicable to the sources.

Keywords: padel game, acoustic emission, sound power spectrum, directivity, Ambisonics

Caratterizzazione Acustica del rumore emesso da un campo da padel

Negli ultimi anni, il gioco del padel si è velocemente introdotto fra le pratiche sportive più diffuse grazie alla sua affinità con il tennis e lo squash, la sua dinamicità e le dimensioni ridotte del campo. Questa ultima caratteristica ha favorito il proliferare di campi da gioco, che possono essere realizzati sia al chiuso che all'aperto. In questo ultimo caso, il rumore emesso durante il gioco può propagarsi liberamente fino ai ricettori limitrofi ed essere potenzialmente causa di disturbo. Si rende quindi necessario un accurato studio dell'impatto acustico di queste strutture nel caso in cui vengano realizzate in prossimità di zone abitate. Una accurata previsione di impatto acustico richiede in input dei dati di emissione accurati. In questo momento la letteratura scientifica riguardante i dati di potenza sonora da associare al rumore emesso da campi da padel è piuttosto scarsa. Il presente lavoro fornisce dati di potenza sonora basati su misurazioni sperimentali. Inoltre, attraverso l'uso della tecnica ambisonics, si è voluto evidenziare quali possono essere eventuali opere di mitigazione acustica applicabili alle sorgenti.

Parole chiave: gioco del padel, emissioni acustiche, spettro di potenza sonora, direttività, Ambisonics

1 | Introduction

Padel is a sport characterized by a high degree of dynamism and engagement. It originated in Mexico in the 1960s and began to gain recognition in Italy in 1991, thanks to Martin Calvelo. After learning about the FIGP (Italian Padel Federation) event, Calvelo organized the first friendly match in Bologna involving Spain and Argentina, marking the sport's initial introduction to the Italian public.

Although it was initially considered a niche sport, padel has experienced an explosion in popularity over the past five years, showing extraordinary growth both in terms of players and dedicated facilities. The Italian Tennis Federation (FIT) has played a crucial role in this process by officially integrating padel into its activities starting in 2014 – a key step that provided greater visibility to the sport and facilitated its development. While sharing some similarities with tennis, this sport also features distinctive characteristics that make it unique.

Padel rules are relatively simple, and the game is played on a smaller court compared to tennis, with the following main differences and specific features:

- Playing Field: The padel court is rectangular, measuring 20 meters in length and 10 meters in width, divided into two halves by a central net. It is surrounded by walls, which are an integral part of the game. Unlike tennis, which is played on an open court, padel is played within an enclosed area with glass or solid walls positioned behind and along the sides of the court.
- Racket: The padel racket is solid, without strings, and generally smaller and lighter than a tennis racket. It features holes on the surface to reduce weight and enhance control.
- Ball: The ball is similar to a tennis ball but tends to be slightly less pressurized, which reduces its speed compared to a tennis ball.
- Serve: In padel, the serve is performed underhand, whereas in tennis it is typically overhead.

- **Shots:** Padel is less focused on powerful baseline shots and more on tactical and fast-paced play, often involving the use of the walls.
- **Number of Players:** Although it can be played in singles, padel is most commonly played in doubles.

In summary, although it shares a common foundation with tennis, padel is a sport with its own rules and dynamics, where speed and strategy blend together, making it accessible and enjoyable for players of all ages and skill levels.

Beyond the technical and strategic aspects of the game, the acoustics of padel courts have attracted the interest of some studies and research, although this is not yet a widely explored field compared to others such as architectural design or the acoustics of football stadiums and indoor arenas.

However, with the growing popularity of padel, some experts and professionals have begun to focus on the acoustic impact of these spaces, considering various aspects such as "on-court" noise (running, hitting, ball rebounds against the enclosing structures), as well as the inevitable sounds produced by players during matches and mechanical noise, especially in the case of indoor courts.

The rapid expansion of padel courts in urban and suburban areas has raised concerns about their acoustic impact on nearby residential zones. Studies commissioned by national federations and acoustic consultants, such as those by the French Tennis Federation [1] and the Netherlands padel federation [2], consultants like Dale and Clarke in the UK [3,4] or National Agencies for the environmental protection [5] have shown that padel generates significantly more frequent and louder impact sounds than traditional tennis, primarily due to ball strikes on glass walls and the open structure of the courts. Technical analyses highlight the importance of sound emergence, court orientation, and ambient noise context in assessing disturbance levels. Recommendations include acoustic barriers, semi-covered structures, and strategic placement to mitigate noise, as emphasized in white papers and environmental reports. These findings underscore the need for integrated acoustic planning in padel facility development.

The article is structured as follows: Section 2 describes the main aspects related to noise generation; Section 3 deals with the description of the case study and the measurement techniques adopted in the experimental phase; Section 4 collects the main results; Section 5 discusses the results and finally Section 6 draws the conclusions.

2 | Main sources of the padel game

The noise generated by padel gameplay is a technically interesting aspect, involving several factors related to the dynamics of the game, the design and material of the racket, the structure of the ball, and the type of court surface.

We will now examine each of these aspects in detail.

Regarding the racket, as illustrated in Fig. 1, it can have different shapes: Teardrop-shaped: the hitting surface is circular with a slightly straighter lower part, suitable even for

beginners. Diamond-shaped: the upper part of the hitting surface is flattened, allowing players to impart greater power to the ball. Round-shaped: the centre of gravity is shifted toward the lower part of the racket, bringing the impact point closer to the handle. This reduces the lever effect, consequently lowering ball speed, but at the same time allows for greater control.



Fig. 1 – Different shapes of the padel racket
Diverse forme della racchetta da padel

A common feature of all padel rackets is the presence of holes on their surface, varying in size. These holes significantly affect the noise produced when the ball strikes the racket, as they contribute to energy dissipation. When the ball hits the racket, part of its kinetic energy is transferred to the racket itself, and the perforations absorb and then disperse this energy. Moreover, the material of the racket also influences the hardness and tonal quality of the sound. The most used materials are fiberglass and carbon fibre. The main difference is that fiberglass allows for greater ball output due to its lower rigidity and higher flexibility, resulting in a less sharp sound. Carbon fibre, on the other hand, tends to produce a drier noise because it is lightweight, rigid, and highly resistant. The internal part of the racket is made of rubber which plays a fundamental role in reducing noise by absorbing vibrations.

From an acoustic perspective, it is also important to consider the speed at which the ball hits the racket (a faster, more powerful impact tends to produce a sharper sound) and the angle at which the ball approaches it. A more pressurized ball tends to produce a louder and sharper sound, as it resists impact more and compresses less before releasing energy. Conversely, a less pressurized ball tends to generate a lower-frequency, less pronounced sound, as it is less reactive and deforms more upon impact, absorbing a greater portion of the energy.

The padel court (Fig. 2) is generally rectangular, and according to the official rules, its standard dimensions are 20 meters in length and 10 meters in width. The rectangle is divided in half by a net (10 meters long and 0.88 meters high at the centre), with service lines placed 6.95 meters from the net. The area between the net and the service lines is further divided in half by a perpendicular line, called the central service line, which splits this area into two equal zones. All lines must be 5 centimetres wide. The padel court is enclosed by four walls (with a minimum height of 3 meters and a maximum of 4 meters), which can be divided into back walls made of glass and side walls, which also include metal mesh structures. This metal meshes serve both as support for the glass walls and as access gates or doors to the court.



Fig. 2 – Example of a padel court
Esempio di un campo da padel

The glass used for the walls plays a fundamental role in the acoustic behaviour of padel courts since the ball striking the glass generates noise. This noise depends on the type of glass used in the construction of the court. The most commonly used material is tempered glass (UNI EN 12150-1), which is highly impact-resistant and safer, as it does not shatter and the fragments remain attached to the frame. However, this type of glass tends to produce a louder and sharper sound when hit by the ball, as its rigidity causes the sound to be released more directly. Another type of glass that can be used is laminated glass, which, due to its intermediate layer, better dampens sound by absorbing impacts and reducing noise. It is also interesting to note that the thickness of the glass affects its acoustic properties: thicker glass tends to produce a louder sound because its greater mass retains more energy, causing the ball impact to generate stronger vibrations that propagate through the glass, resulting in a sharper and more intense sound. Thinner glass, having less mass, tends to vibrate less and may reduce noise intensity, although it might be less resistant and less sound insulating.

The flooring of a padel court is designed to have a certain capacity for rebound, and it can be made from various materials, each affecting the acoustics of the court differently. The most common solution is synthetic grass, composed of synthetic fibres combined with sand to mimic the appearance of natural grass. This surface tends to have good sound absorption properties, mainly due to its porosity. Synthetic grass allows for different installation types, including monofilament, textured, and fibrillated options. When the ball bounces on synthetic grass, the sound tends to be damped, also thanks to the sand, which helps reduce vibrations and gives the ball a softer bounce. Although synthetic grass is quite durable, it requires regular maintenance to prevent wear, and this aspect limits its use. Another type of flooring is resin (cement), which, being a much more rigid surface, does not absorb vibrations effectively. As a result, the ball impact produces a louder sound. This material is highly durable and weather-resistant, with relatively simple maintenance, but it offers less comfort compared to other surfaces. A third common material is rubber (or other elastic materials), especially used in indoor

courts. These materials can come in sheets or rolls and are designed to provide an elastic surface that cushions impacts. Rubber has a high damping capacity, and it is rather soft. When the ball bounces on these surfaces, the noise tends to be muffled. It is a resilient material and offers a very comfortable surface for players, reducing the risk of injury.

As concerns the noise type during playing, environmental and anthropogenic factors also play a crucial role in determining the intensity, quality, and propagation of sound, as well as its impact on the surrounding environment. The main source of anthropogenic noise is the number of people playing simultaneously, which increases overall noise through cheering, frustration, laughter, movement sounds, and footfalls. This aspect is particularly pronounced during padel tournaments or organized sporting events, where larger crowds and spectators are present, often accompanied by amplification systems such as loudspeakers.

In Italy, studies on this topic are still limited. One example is the research conducted by ARPA (Regional Environmental Protection Agency), which investigated the case of padel courts in Ascoli Piceno that were shut down due to public complaints about excessive noise [5]. For this reason, we chose to explore this issue further by studying the padel courts at the University of Brescia, conducting experimental tests directly on-site.

3 | Materials and Methods

3.1 | Description of the case study

The area under investigation is in Brescia, Via Branze 39 and is adjacent to the University of Brescia (Fig. 3). This site was selected as a significant example for evaluating the acoustic impact produced by sports activity in a real-world context.



Fig. 3 – Area considered in the study
Area considerata nello studio

The court is an outdoor facility (Fig. 4), with a rectangular area measuring 20 x 10 meters. The back walls and part of the side walls are made of 12 mm thick tempered glass, while the remaining side sections are enclosed by galvanised steel fencing. The glass side walls are 3 m high. The court is covered with a high-quality rubber surface.



Fig. 4 – Picture of the padel court during the measurement session
Fotografia del campo da padel durante le misurazioni sperimentali

3.2 | Instrumentation and measurement techniques

Six microphones (model: BSWA MPA 416) were positioned on tripods at a height of 1.6 m at various distances from the padel court. The positions of the microphones around the court are shown in Fig. 5.

The microphones were connected to an OROS OR 36 analyser to record sound levels simultaneously at the multiple representative points within the area of interest. The recorded data were later post processed using the OROS NVGate software to obtain the 1/3rd octave spectra in the frequency range 20Hz-10 kHz. The players (students who volunteered to assist with the measurements) were asked to engage in the sporting activity as they normally would, as if our presence had no influence on their gameplay, to obtain realistic and representative measurements of typical match conditions.

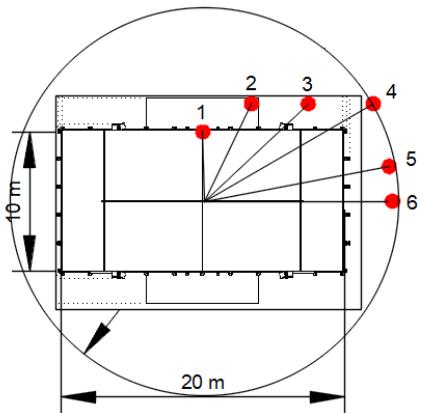


Fig. 5 – Plan view of the court. The red dots represent the microphone positions and the outer circle the distance used to normalize the sound pressure levels

Pianta del campo. I punti rossi rappresentano le posizioni dei microfoni e il cerchio esterno la distanza usata per normalizzare i livelli di pressione sonora

Once the microphones were activated, the sound emissions were recorded for 15 minutes for each one of the following playing conditions. During the measurements, the players were asked to play:

- Without celebrating the scores, so distinct acoustic data focused solely on the sounds produced by racket-ball-wall/nets impacts were recorded.
- Playing normally, including typical moments of celebration and vocal expressions during different phases of the match.

The procedure used to determine the sound power level and the directivity index is the following. First, it is necessary to compute the average sound pressure level generated by the source. Since one of the results to achieve is the directivity index, under the assumptions that the source has a double symmetry in the emissions and is equivalent to a point source that can be placed at the centre of the court, it is convenient to project the measured sound pressure levels at a common distance. The chosen distance is 14 m, since receivers 4, 5 and 6 are placed very close to such distance. Such projection can be made using the following equation:

$$L_{p14m} = L_{pi} - 20 \log \frac{14}{d_i} \quad (1)$$

Where L_{pi} is the equivalent sound pressure level measured at the distance d_i for a time span sufficient to characterise the noise emitted during the gameplay. Assuming that a scheme similar to the one proposed by the ISO 3744 standard [6] can be applied, the sound power level is equal to:

$$L_W = \bar{L}_{14m} - K_1 - K_2 + 10 \log S \quad (2)$$

Being \bar{L}_{14m} the space average of the sound pressure level evaluated at a distance of 14 m (representing also the sound intensity at the same distance, being negligible the difference between the two quantities), K_1 and K_2 the correction coefficients used to consider the effect of the reflections and of the background noise. In the case at hand such coefficients were considered negligible since the measurements were made outdoors and the background noise was at least 15 dB lower than the sound pressure level measured in each position for every frequency band of interest. S is the surface of the half sphere, with a radius 14 m, enveloping the source.

Finally, the Directivity Index (DI) can be determined as:

$$DI(\theta) = 10 \log \frac{I_\theta}{I_0} \quad (3)$$

Where I_θ is the sound intensity measured at a certain distance (14 m in our case) and at a certain angle θ for the actual source, while I_0 is the sound intensity caused, at the same distance, by an omnidirectional sound source having the same sound power as the source at hand. The sound power level, as well as DI , can be computed for each one of the 1/3rd octave frequency band of interest and will be presented in the results section.

During the entire measurement session, an Insta 360 X2 camera and a ZOOM H3 ambisonic microphone were placed inside the playground to get more information about the noise produced by the impact of the ball on the racket and the influence of the reflections. These data were further post processed using a script based on the work of Martellotta [7].

The noise measured by the ambisonics system can be projected as an intensity vector on the picture taken with the 360-camera using the following equations:

$$\begin{cases} I_x = \frac{W \cdot u_x}{\rho \cdot c} \\ I_y = \frac{W \cdot u_y}{\rho \cdot c} \\ I_z = \frac{W \cdot u_z}{\rho \cdot c} \end{cases} \quad (4)$$

Where the W component represents the omnidirectional (pressure) signal (essentially the zero-order component of the sound field); u_x , u_y and u_z represent the first order particle velocity components in the three axes of the microphone. Basically:

- W : is the omnidirectional (non-directional) component, captures the overall sound pressure.
- x : is the front-back directional component (figure-eight pattern along the front-back axis).
- y : is the left-right directional component.
- z : is the up-down directional component.

Some pictures featuring the sound intensity field will be shown in the results and discussion section.

4 | Results

The following sound power level values and spectra, as well as the directivity index pattern, refer to a doubles match involving four male amateur players. Of course, higher-level players can produce louder sound emissions. As an example, the Dutch guidelines recommend to use power levels of 91 dB(A) for acoustic impact predictions. According to the playing conditions adopted for the measurements, the spectra of the A-weighted sound power level can be reported for the evaluated conditions: without celebrating the scores and normal play (Fig. 6) and including typical moments of celebration and vocal expressions (Fig. 7).

Since four of the six microphones used for the measurements were placed beyond the glass screens, the sound power level generated inside the court was evaluated considering only the pressure levels measured by the two microphones not affected by the screening effect of the glass walls (Mic1 and Mic2). The overall sound power levels derived in the two cases are:

- 89.2 dB(A) re 1 pW in the case without screams;
- 91.1 dB(A) re 1 pW in the case with screams.

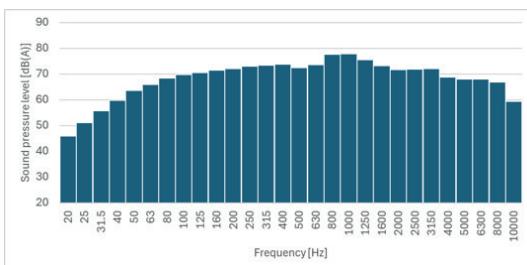


Fig. 6 – A-weighted sound power spectrum when playing without screaming

Spettro del livello di potenza sonora pesato A senza urla

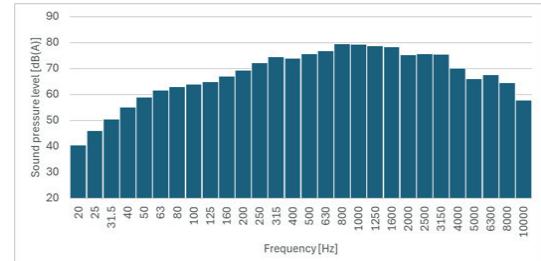


Fig. 7 – A-weighted sound power spectrum when playing with screaming

Spettro del livello di potenza sonora pesato A con urla

It can be deduced that the difference between the two cases is around 2 dB and that the contribution of the screams is higher than the one deriving only from the impact of the ball on the rackets and the structures. Still the influence of the screams strongly depends on the players and then the measured sound power level in such condition must be considered only as an example.

Fig. 8 shows the directivity patterns obtained using the sound pressure level measured by the 6 microphones in the frequency bands from 125 Hz to 5 kHz.

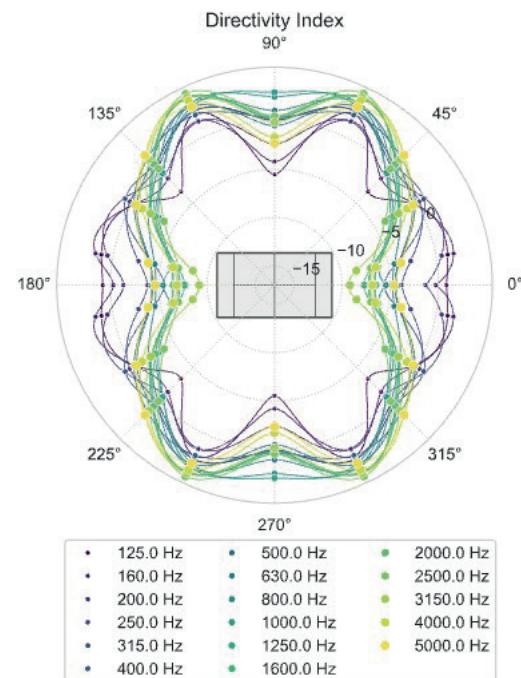


Fig. 8 – Directivity Index plot with screams

Grafico della direttività con urla

As for the ambisonics measurements, an experimental study was conducted with the aim of analysing the acoustic behaviour of a padel court during real gameplay situations. The focus was set on the impact between the ball and the racket — the most typical and recurring impulsive event of this sport — and on the resulting sound propagation within the enclosed environment of the court. The collected data were analysed using a dedicated software capable of combin-

ing the audio signals spectrogram with a directional sound mapping overlaid on the spherical image of the scene. The following images represent two distinct moments of the acoustic phenomenon under examination. The first corresponds to the exact moment of the impact (red area in Fig. 9), the second to the sound reflections that occur immediately afterward (green area in Fig. 9).

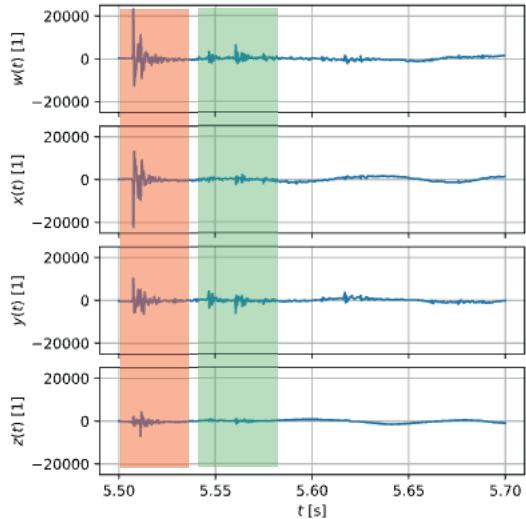


Fig. 9 – Time series of the global, -x, -y and -z channels of the ambisonics microphone

Registrazione dei canali globale, -x, -y e -z del microfono ambisonico

The time series show how the acoustic energy of the direct sound is concentrated in a very short time interval (starting around 5.5 seconds and with a time span of 30 milliseconds).

In the first 360° image (Fig. 10), it is possible to observe the environment at the moment of impact between the racket and the ball. This event naturally generates a broadband, dry sound. The 360° panoramic view of the padel court allows for visual localization of the point of impact, thanks to the player's position and the tension of the action. At this stage, the acoustic map does not yet show significant coloration around the court, as the sound energy has just been emitted by the impact with the racket and has not yet fully interacted with the surrounding environment.

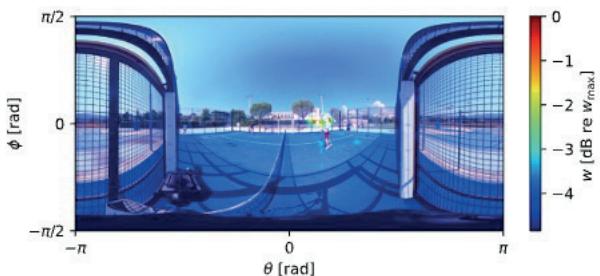


Fig. 10 – Immersive image showing the impact time
Immagine immersiva che mostra l'istante dell'impatto

In the next image (Fig. 11), taken just a few tenths of a second after the first, the effect of sound reflections caused

by the previous impact can be observed. The green area in the time series of Fig. 9 shows a certain amount of residual energy in a more attenuated and temporally distributed form. The software now clearly highlights the directionality of the sound within the visual scene. The coloured map overlaid on the spherical image reveals the paths taken by the sound wave as it bounces off the surfaces of the court: the walls on the short side of the court, the floor and the lateral structures. Areas with brighter colours represent directions from where higher sound intensity is arriving, while blue and green tones indicate weaker reflections. This visualization is particularly useful for understanding the spatial distribution of sound energy within the court and the areas where a sound absorbing material can be more effective.

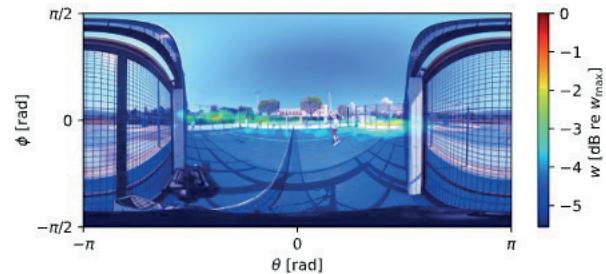


Fig. 11 – Sound map of the reflections after the ball impact
Mappa sonora delle riflessioni successive all'impatto della palla

5 | Discussion

Noise from padel courts can be modelled based on the data reported in the previous section. The most important point is to understand the type of source to be used in the model. For the determination of the DI a point source was introduced in the previous sections. Still, this type of source cannot represent the real distribution of the noise emission on the playground, because the players are continuously moving on the court during the game. Moreover, the position is not known "a priori". For this reason, it can be more sensible to use an area source having the same dimensions of the court (10 m × 20 m)

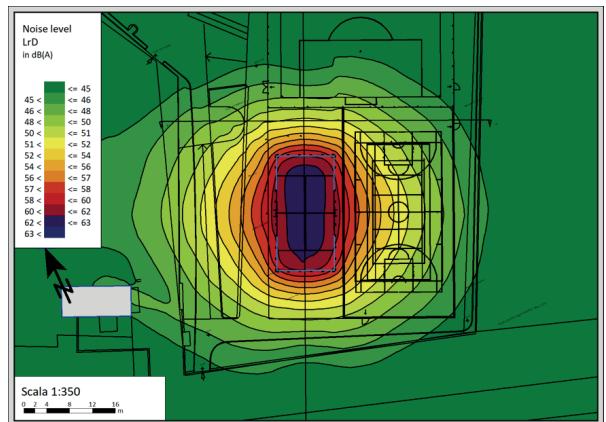


Fig. 12 – Predicted sound pressure level distribution [dB(A)]
Distribuzione del livello di pressione sonora [dB(A)]

with a sound power spectrum distribution that corresponds to the spectrum shown in Fig. 7. The overall sound power level associated with the area source is 93.7 dB(L). Applying such sound power level data to a model implemented in SoundPLAN, the resulting sound pressure level distribution at 4 m height is the one reported in Fig. 12.

The difference between the predicted and the measured sound pressure levels at the receiver position 1 is less than 1 dB, proving the acceptability of the sound power level determination. Fig. 13 shows the sound pressure level distribution on a vertical section placed along the main axis of the court.

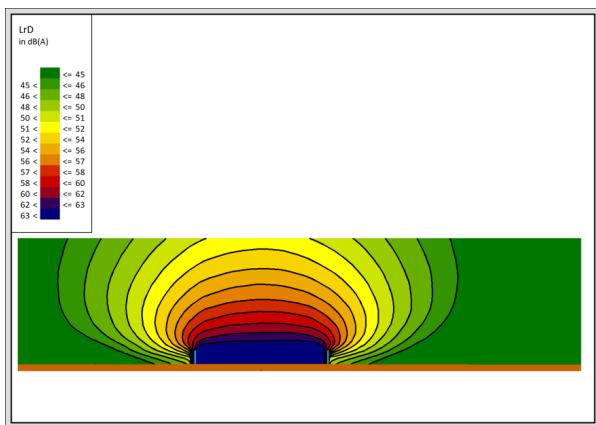


Fig. 13 – Vertical sound pressure level distribution [dB(A)]
Distribuzione verticale del livello di pressione sonora [dB(A)]

It can be observed that, as an effect of the reflections, the sound pressure level inside the court is almost constant in any position.

In any case, the sound power levels possess a maximum around 800-1000 Hz. These are frequencies for which the dB(A) attenuation is very low and then they result to be particularly annoying for the neighbourhood.

As concerns the directivity, the polar plot shows that the higher frequencies escape the court boundaries on the long sides, where there are no barriers, while the lower frequencies can easily pass over the screens and propagate at long distances. Such behaviour must be considered when designing new sports centres to minimize the noise impact.

6 | Conclusions

The study presented in this manuscript provides a comprehensive acoustic characterization of noise emissions from a padel court during real gameplay conditions. Through a combination of field measurements, spectral analysis, and ambisonics-based spatial mapping, the research has highlighted the primary sources of noise, their spectral content, and their spatial distribution.

The results show that the dominant noise emissions originate from the impulsive impacts between the ball and the racket or surrounding structures, with peak sound power lev-

els occurring around 800–1000 Hz — a frequency range particularly critical due to minimal A-weighting attenuation and high perceptual sensitivity. The contribution of vocal expressions, while present, was found to be more significant than the mechanical impacts.

The directivity analysis revealed that higher-frequency components tend to escape through the long sides of the court, where barriers are typically absent, while lower frequencies propagate over the perimeter screens. These findings are crucial for informing the design of future padel facilities, particularly in urban or residential contexts where noise mitigation is essential.

The use of ambisonics technology proved effective in visualizing the spatial behaviour of sound within the court, identifying key reflection zones and focal points. This information can be leveraged to implement targeted acoustic treatments, such as absorbent materials or structural modifications, to reduce the environmental impact of padel-related noise.

Overall, the methodology and results presented here contribute valuable data to a relatively underexplored area of environmental acoustics and offer practical insights for urban planners, facility designers, and policymakers aiming to balance recreational development with acoustic comfort.

Conclusioni

Il lavoro presentato in questo manoscritto fornisce una caratterizzazione acustica completa del rumore emesso da un campo da padel durante condizioni reali di gioco. Attraverso una combinazione di misurazioni in campo, analisi spettrale e mappatura spaziale basata su tecniche ambisonics, la ricerca ha evidenziato le principali sorgenti di rumore, il loro contenuto spettrale e la loro distribuzione spaziale.

I risultati mostrano che le emissioni sonore dominanti derivano dagli impatti impulsivi tra la pallina, la racchetta e le strutture circostanti, con livelli di potenza sonora massimi concentrati intorno agli 800–1000 Hz — una gamma di frequenze particolarmente critica per la percezione umana, in quanto poco attenuata dalla curva di pesatura A. Il contributo delle espressioni vocali, sebbene presente, è risultato più significativo rispetto agli impatti meccanici.

L'analisi della direttività ha rivelato che le componenti ad alta frequenza tendono a fuoriuscire dai lati lunghi del campo, dove solitamente non sono presenti barriere, mentre le basse frequenze si propagano oltre le schermature perimetrali. Queste osservazioni sono fondamentali per la progettazione di nuovi impianti sportivi, soprattutto in contesti urbani o residenziali dove la mitigazione del rumore è essenziale.

L'impiego della tecnologia ambisonics si è rivelato efficace per visualizzare il comportamento spaziale del suono all'interno del campo, identificando le principali zone di riflessione e i punti di focalizzazione. Queste informazioni possono essere utilizzate in modo mirato per implementare soluzioni di trattamento acustico, come materiali assorbenti o modifiche strutturali, al fine di ridurre l'impatto ambientale del rumore generato dal padel.

Nel complesso, la metodologia e i risultati presentati contribuiscono con dati preziosi a un ambito ancora poco esplorato dell'acustica ambientale e offrono spunti pratici per urbanisti, progettisti e decisori politici interessati a conciliare lo sviluppo delle attività sportive con il comfort acustico del territorio.

Bibliography

- [1] F. Binisti, Padel and noise pollution: the FFT publishes a technical study | Padel Magazine, (2025). <https://padel-magazine.co.uk/Padel-faces-noise-pollution%3A-the-FFT-publishes-a-technical-study/> (accessed September 14, 2025).
- [2] VV. AA., Padel and Sound: A practical tool that can help parties make the right decision and adaptability, 2023.
- [3] M. Dale, New research creates model for measuring padel noise, The Padel Paper (2025). <https://thepadelpaper.com/padel-noise-martin-higgins-research/> (accessed September 14, 2025).
- [4] E. Clarke, I. MacArthur, B. Whiffin, DIFFERENCES IN SOUND CHARACTERISTICS OF PADEL AND TENNIS, (2023).
- [5] E. Bellabarba, E. Lanciotti, E. Apostoli, Padel: misura ed analisi dei livelli sonori per la caratterizzazione acustica, in: Atti Del 47° Convegno Nazionale AIA, Associazione Italiana di Acustica, 2021.
- [6] International Organization for Standardization, ISO 3744:2010 -- Acoustics -- Determination of sound power levels and sound energy levels of noise sources using sound pressure -- Engineering methods for an essentially free field over a reflecting plane, 2010.
- [7] F. Martellotta, On the use of microphone arrays to visualize spatial sound field information, Applied Acoustics 74 (2013) 987–1000. <https://doi.org/10.1016/j.apacoust.2013.02.004>.

Resoconto del 51° Convegno Nazionale AIA

Giovanni Brambilla^{a*} | Andrea Tombolato^b

^a Dipartimento di Scienze della Terra e dell'Ambiente,
Università degli Studi di Milano-Bicocca,
Piazza della Scienza, 1, 20126 Milano

^b ICONA - *Italian Consulting Network of Acousticians*,
<https://icona-team.com/>, Padova-Pisa, Italia

* Autore di riferimento:
Giovanni.Brambilla@artov.inm.cnr.it

Ricevuto: 12/9/2025

Accettato: 15/9/2025

DOI: 10.3280/ria2-2025oa21449

ISSN: 2385-2615

Il 51° Convegno Nazionale dell'Associazione Italiana di Acustica (AIA) si è svolto dal 4 al 6 giugno 2025 a Treviso, presso la sede della Provincia che ha collaborato con AIA alla organizzazione dell'evento. Questo breve resoconto descrive le varie attività scientifiche e sociali che si sono tenute nei tre giorni del Convegno.

Parole chiave: convegno nazionale, Associazione Italiana di Acustica, resoconto

Report of the 51st AIA National Conference

The 51st National Conference of the Italian Acoustical Association (AIA) was held from 4 to 6 June 2025 in Treviso, at the site of the Province. The conference was organized by AIA in collaboration with the Treviso's Province. This report briefly describes the scientific and social activities that took place during the three days of the Conference.

Keywords: national conference, Italian Acoustical Association, report

1 | Introduzione

Dopo tre anni dalla sua programmazione, il 51° Convegno Nazionale dell'Associazione Italiana di Acustica (AIA) si è svolto dal 4 al 6 giugno a Treviso, presso il complesso di Sant'Artemio, messo a disposizione dalla Provincia di Treviso che ha collaborato alla organizzazione del Convegno. Tra i numerosi patrocini concessi si segnala quello di ARPA Veneto che è diventato anche Socio Istituzionale AIA per il 2025.

I numeri del Convegno testimoniano il suo successo: 230 partecipanti, 112 memorie presentate (delle quali 16 in modalità poster), 6 rassegne tecniche, 16 aziende espositrici. Incoraggiante la presenza di 34 giovani acustici che molto promettono in quanto già protagonisti di esperienze significative e che, con il coordinamento di Gioia Fusaro, hanno avuto modo di discutere del loro futuro anche nell'AIA negli incontri di mercoledì mattina e venerdì pomeriggio. Anche l'iniziativa dello speed dating con le aziende, alla quale hanno partecipato 3 società, ha suscitato interesse.



Fig. 1 – La riunione AIA Giovani di mercoledì mattina
Young AIA members meeting on Wednesday morning

Tra i giovani, numerosi i volontari di diversi Atenei che, sotto l'attento coordinamento di Claudio Guarnaccia, hanno fornito un contributo determinante per il regolare andamento delle sessioni, che ha richiesto un notevole impegno svolgendosi queste in parallelo in tre sale il mercoledì e il venerdì e in quattro il giovedì. La positiva esperienza organizzativa dei volontari sarà molto utile per i prossimi impegni congressuali dell'Associazione.



Fig. 2 – I volontari del 51° Convegno AIA
Volunteers at the 51st AIA Conference

Anche gli eventi satellite del Convegno, ossia la tavola rotonda nel mercoledì mattina e il corso di aggiornamento professionale per TCA nel venerdì pomeriggio, hanno registrato una partecipazione superiore alle aspettative.

Questo breve resoconto illustra le attività scientifiche e sociali che hanno animato questa edizione del Convegno Nazionale, con riscontri positivi da parte dei partecipanti e degli espositori.

Vita dell'associazione/Life of the association

2 | Le attività scientifiche

Come consuetudine, il Convegno è iniziato con la cerimonia inaugurale: i saluti istituzionali delle diverse autorità locali, anticipati all'inizio della Tavola Rotonda di mercoledì mattina, sono stati formulati da Loris Tomiato, Carlo Rapicavoli, Alessandro Manera, Marco Della Pietra, Eva Gatto e Chiara Casarin.

Quest'anno un momento di particolare rilievo è stata la commemorazione di Angelo Farina, figura eminente dell'acustica italiana per l'instancabile passione nella ricerca e per la generosità nel condividere il sapere, la cui importanza è testimoniata anche da riconoscimenti internazionali. La sua prolifica e poliedrica attività è stata sinteticamente ripercorsa da Patrizio Fausti, Presidente AIA, Arianna Astolfi, Daniele Ponteggia (Presidente AES Italia), Lamberto Tronchin e Adriano Farina, figlio di Angelo al quale è stata consegnata una targa ricordo con l'impegno da parte dell'AIA di mantenere viva la memoria di Angelo con adeguate iniziative.



Fig. 3 – Il ricordo di Angelo Farina durante la cerimonia inaugurale
Memorial moments for Angelo Farina during the inaugural ceremony

Come tradizione, durante la cerimonia sono stati conferiti i premi AIA Giacomini e Sacerdote, rispettivamente assegnati a Giorgia Guaglumi per la tesi di laurea specialistica "Ecoacustica e struttura forestale: un approccio integrato per l'analisi ecosistemica", svolta presso l'Università Milano-Bicocca, e Francesco Mori per la tesi di dottorato "L'efficacia di un sistema ANC con tecnica dei microfoni remoti nella cabina di un trattore", svolta presso l'Università di Ferrara.

Nella cerimonia di chiusura, invece, è stato assegnato il Premio Barducci alla migliore comunicazione poster presentata al Convegno. I vincitori ex aequo sono risultati:

- Gioia Fusaro per il contributo scientifico "Ventilazione naturale e attenuazione acustica: scalabilità di un sistema metamateriale per infissi";
- Riccardo Giovanni Rosso, Anastasia Urbanelli e Angela Guastamacchia per il contributo scientifico "Test di intellegibilità del parlato personalizzati in realtà virtuale: definizione di scenari audiovisivi e sviluppo di uno strumento clinico".

Le 97 presentazioni orali e le 6 rassegne tecniche curate dagli sponsor sono state organizzate in 14 sessioni, ciascuna

coordinata da 2 moderatori, riguardanti le seguenti 6 macro-aree tematiche:

- rumore negli ambienti di vita (41 presentazioni orali e 8 poster in 7 sessioni);
- rumore e vibrazioni nei luoghi di lavoro (7 presentazioni orali in una sessione);
- acustica dei materiali e dei sistemi edili (15 presentazioni orali e 2 poster in 2 sessioni);
- acustica architettonica e musicale (18 presentazioni orali e 2 poster in 2 sessioni);
- metrologia, misure acustiche e strumentazione (11 presentazioni orali e 3 poster in una sessione);
- acustica numerica e modelli previsionali (5 presentazioni orali e 1 poster in una sessione).

Molteplici gli argomenti trattati, da quelli più tradizionali a tematiche emergenti e multidisciplinari, che hanno fornito un ampio aggiornamento sull'attività in acustica in Italia. Molto partecipata anche la sessione di discussione dei poster, esposti durante l'intera durata del Convegno nell'area espositiva.

Per la partecipazione al Convegno sono stati riconosciuti CFP per Ingegneri, Architetti in autocertificazione e Geometri.

3 | Le rassegne tecniche e l'area espositiva

Numerosa la partecipazione alle 6 rassegne tecniche curate dagli sponsor, inserite nel programma scientifico del Convegno per la giornata di giovedì. Sono stati trattati i seguenti argomenti:

- applicazione del modello *Hearing Model Sottek* per la definizione di una metrica predittiva del rumore dei droni (Head Acoustics);
- *innovations in noise and vibration control* (Mason Industries);
- l'innovazione brevettata, nel controllo del suono e delle riflessioni, con pannelli fonoassorbenti e fonodiffondenti in carta (Polimax Italia);
- l'evoluzione dei manti resilienti sottopavimento per la correzione dei difetti acustici di solai e scale (Polimax Italia);
- comfort acustico in ambienti di lavoro: *case study* (Rockfon);
- approccio integrato all'acustica, caratterizzazione sperimentale e open-plan office tool (Saint Gobain).



Fig. 4 – L'area espositiva con gli stand e i poster, il desk di registrazione e i punti ristoro

The exhibition area distribution of stands, posters, registration desk and refreshment points

Nel luminoso e ampio atrio dell'edificio ove si trova l'Auditorium, scelto come centro organizzativo del Convegno con il desk di registrazione, è stata allestita l'area espositiva con 16 stand, i poster e il servizio di ristoro per le pause caffè. Da sottolineare che ben 15 di essi erano sostenitori commerciali annuali dell'AIA ai quali l'Associazione è grata per la loro fiducia e costante partecipazione agli eventi AIA.

4 | L'Assemblea dei soci

Giovedì pomeriggio, al termine delle sessioni tematiche, si è svolta l'annuale Assemblea dei soci presieduta dall'instancabile Patrizio Fausti e coadiuvato dal Segretario AIA Francesco Martellotta. Nel nutrito ordine del giorno, oltre alla consueta approvazione dei bilanci consuntivo 2024 e preventivo 2025 predisposti e illustrati dal Tesoriere AIA Francesca Pedrielli, è stata illustrata da Sara Delle Macchie l'edizione 2025 di INAD Italia "Ascolta con gentilezza" con l'obiettivo di sensibilizzare la popolazione sul tema dei disturbi uditi e accrescere la cultura dell'ascolto responsabile. La Rivista Italiana di Acustica, grazie all'impegno dei suoi curatori, ha raggiunto l'importante traguardo della sua indicizzazione su SCOPUS a partire dal 2023.

Il Presidente, tra le sue comunicazioni, ha annunciato una nuova iniziativa AIA, denominata AIATHON, consistente in una competizione annuale ideata per far confrontare giovani talenti sulle sfide più innovative che l'acustica dovrà affrontare nei prossimi anni. Alla competizione parteciperanno team di ricercatori, professionisti e/o studenti, che si confronteranno su un tema specifico per sviluppare i concetti di base dell'innovazione proposta. Maggiori dettagli saranno comunicati nel seguito.

L'aggiornamento sulle relazioni internazionali dell'AIA è stato illustrato dai Soci AIA che, a diverso titolo, sono coinvolti in cariche direttive di organismi internazionali, ossia Arianna Astolfi (EAA), Eleonora Carletti (IIAV), Antonino Di Bella (ICA) e Luigi Maffei (I-INCE).

L'Assemblea ha approvato la proposta del Consiglio Direttivo di nominare Soci Onorari Eleonora Carletti e Daniele Bertoni. Una sintesi della loro pluriennale attività è stata illustrata rispettivamente da Giovanni Brambilla e Alessandro Peretti.



Fig. 5 – La proclamazione dei due Soci Onorari Eleonora Carletti e Daniele Bertoni
The proclamation of the two Honorary Members Eleonora Carletti and Daniele Bertoni

5 | Gli eventi satellite

Nella mattinata di mercoledì, prima dell'inizio del Convegno, è stato organizzato il primo evento satellite consistente nella Tavola Rotonda sul tema "Gestione del Rumore nei Regolamenti Comunali" che ha visto il coinvolgimento e l'interessamento di dirigenti e funzionari comunali. Nella prima parte, moderata da Francesco Asdrubali e Andrea Tombolato, sono state presentate tre relazioni a invito da Jacopo Fogola, Renato Salvalaggio e Roberto Bonaventura. La seconda parte, moderata da Paolo Bidoli e Massimiliano Scarpa, è stata dedicata al dibattito coinvolgendo il numeroso pubblico presente.

L'altro evento satellite, svolto il venerdì pomeriggio al termine del Convegno, ha riguardato il corso di aggiornamento professionale per TCA sul tema "Autorizzazione Integrata Ambientale: aspetti tecnici, amministrativi, giuridici". Il corso, organizzato in collaborazione con AINE Servizi Srl e introdotto da Anna Maria Pastore e Gaetano Licitra, comprendeva 4 relazioni da parte di Silvia Quatrini, Daniele Sepulcri, Simone Bussoni e Aldo Fornasier. Al superamento positivo del test finale di apprendimento venivano certificate 4 ore di aggiornamento professionale.

6 | Gli eventi sociali

Le tre giornate sono state ricche di eventi sociali che hanno favorito un clima di convivialità tra i partecipanti. Nella prima serata i partecipanti si sono trasferiti a Castelfranco Veneto ove è stato offerto loro un apericena di benvenuto nella cornice di Piazza San Liberale, sulla quale si affaccia il Duomo.



Fig. 6 – L'apericena servito nella Piazza San Liberale a Castelfranco Veneto
Refreshment venue in Piazza San Liberale in Castelfranco Veneto

Al termine il Teatro Accademico ha ospitato i partecipanti per assistere all'evento musicale, magistralmente organizzato, coordinato e presentato da Chiara Casarin. Nel nutrito programma sono state presentate arie celebri di operetta, introdotte dalla voce recitante di Chiara Casarin.



Fig. 7 – Il pubblico nel Teatro Accademico di Castelfranco Veneto
The audience at the Academic Theatre of Castelfranco Veneto



Fig. 8 – Un momento del gradevole concerto di arie da operetta
A moment from the concert of operetta arias

La seconda giornata è cominciata all'alba con la terza edizione della *Sunrise Run & Walk* che ha impegnato per un'ora abbondante i circa 50 entusiasti partecipanti che, sotto la guida esperta di Francesco Pompoli, hanno percorso le vie del centro storico di Treviso, circondati dal fiume Sile, tra le mura rinascimentali, i monumenti e i numerosi canali che richiamano atmosfere veneziane.



Fig. 9 – I partecipanti alla III edizione della Sunrise Run & Walk
Participants in the third edition of the Sunrise Run & Walk

Il loro sforzo e la tenacia dimostrata sono stati ripagati anche quest'anno dalla maglietta ricevuta con il logo della manifestazione disegnato da Giuseppe Bonfiglio.



Fig. 10 – Il logo della III edizione della Sunrise Run & Walk
The logo of the third edition of the Sunrise Run & Walk

La seconda impegnativa giornata si è conclusa in allegria con la Cena Sociale, tenutasi nel ristorante La Caprese. I partecipanti hanno apprezzato il ricco antispasto e le varie portate servite. Dopo la cena i commensali si sono cimentati nei consueti canti e brani musicali, accentuando il carattere conviviale della serata, a conclusione di una giornata impegnativa.

Il venerdì pomeriggio, al termine del Convegno, è stata organizzata una visita guidata al centro storico di Treviso comprendente la Piazza dei Signori, la Torre Civica e il Palazzo dei Trecento, del quale eccezionalmente è stato possibile visitare il grande salone al primo piano. La visita, gestita in due turni, è stata molto apprezzata dai numerosi partecipanti.

7 | Conclusioni

Le tre giornate congressuali sono state impegnative ma molto stimolanti non solo in termini scientifici ma anche di convivialità. Per il regolare svolgimento delle molteplici attività congressuali è stato importante anche l'inesauribile ed efficiente lavoro svolto da Simona Senesi, Segretaria Tecnico-Amministrativa AIA. Gli organizzatori sperano che, nonostante gli inevitabili e imprevedibili contrattempi, i partecipanti siano rimasti soddisfatti delle esperienze vissute. Gli espositori hanno manifestato apprezzamento per l'interesse dei congressisti alle loro attività e prodotti, agevolato anche dalla strategica collocazione degli stand nell'area gestionale del Convegno.

Il testimone ora passa a Francesco Asdrubali dell'Università per Stranieri di Perugia al quale è stata affidata l'organizzazione del 52° Convegno. L'appuntamento è dal 10 al 12 giugno 2026 a Perugia, nella prestigiosa sede di Palazzo Gallenga Stuart.

Resoconto del Workshop Internazionale AIA “Classroom noise: a research update”

Antonino Di Bella^{a*} | Chiara Visentin^b

^a Dipartimento di Ingegneria Industriale,
Università degli Studi di Padova,
Via Venezia, 1, 35131 Padova

^b Dipartimento di Ingegneria,
Università di Ferrara,
Via Saragat, 1, 44122 Ferrara

* Autore di riferimento:
antonino.dibella@unipd.it

Ricevuto: 20/9/2025

Accettato: 26/9/2025

DOI: 10.3280/ria2-2025oa21458

ISSN: 2385-2615

Il 12 settembre a Padova, si è tenuto il Workshop Internazionale AIA dal titolo “Classroom noise: a research update”, presso l’Archivio Antico di Palazzo Bo, sede dell’Università degli Studi di Padova. Il workshop è stato organizzato dall’Associazione Italiana di Acustica (AIA), in collaborazione con l’Università degli Studi di Padova, l’Università di Ferrara e l’Università Iuav di Venezia. Il presente articolo ne riassume i contenuti tecnico-scientifici e lo scopo.

Parole chiave: workshop, noise, classroom, AIA, associazione italiana di acustica, PRIN, UNIPD, UNIFE, IUAV

Report of the AIA International Workshop “Classroom noise: a research update”

On September 12th, the AIA International Workshop, “Classroom Noise: A Research Update”, was held in Padua at the Archivio Antico of Palazzo Bo, home of the University of Padua. The workshop was organised by the Acoustical Society of Italy (AIA), in collaboration with the University of Padua, the University of Ferrara, and the Iuav University of Venice.

This article summarises its technical-scientific contents and main purpose.

Keywords: workshop, noise, classroom, AIA, associazione italiana di acustica, PRIN, UNIPD, UNIFE, IUAV

1 | Introduzione

Nella giornata del 12 settembre 2025 a Padova, si è tenuto il Workshop Internazionale dal titolo “Classroom noise: a research update”, presso l’Archivio Antico di Palazzo Bo, sede dell’Università degli Studi di Padova. Il workshop è stato organizzato dall’Associazione Italiana di Acustica (AIA), in collaborazione con l’Università degli Studi di Padova (Dipartimenti di Psicologia dello Sviluppo e della Socializzazione, di Neuroscienze e di Ingegneria Industriale), l’Università di Ferrara (Dipartimento di Ingegneria) e l’Università Iuav di Venezia (Dipartimento di Culture del Progetto).

Il workshop è stato promosso dai gruppi di ricerca che collaborano ai progetti di ricerca di interesse nazionale (PRIN) “LEARN” (CUP C53D23004070006) ed “EQUALITY” (CUP F53D23001890006), entrambi finanziati dall’Unione Europea – Next Generation EU, Mission 4-C2 Investment 1.1.

Il workshop ha attirato molti partecipanti, sia italiani che stranieri. Più di 60 persone hanno partecipato, tra cui accademici, ricercatori, insegnanti, formatori, consulenti e progettisti.

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

Bella dell’Università egli Studi di Padova, in qualità di membro del Consiglio Direttivo AIA, dalla Prof.ssa Francesca Cappelletti dell’Università Iuav di Venezia, in qualità di Responsabile del PRIN “EQUALITY” e dal Prof. Nicola Prodi dell’Università di Ferrara, in qualità di Coordinatore di unità locale del PRIN “LEARN”, che hanno fornito un quadro introduttivo sull’argomento.



Fig. 1 – L’apertura dei lavori del Workshop Internazionale
The opening of the International Workshop

2 | Programma scientifico

I lavori del Seminario sono stati aperti dalla Prof.ssa Barbara Arfè dell’Università degli Studi di Padova, in qualità di Delegata della Retrice all’inclusione e disabilità, dal Prof. Antonino Di

Il workshop ha offerto l’opportunità di un confronto tra ricercatori impegnati nello studio del rumore negli ambienti scolastici e dei suoi effetti su studenti e insegnanti. L’evento ha ospitato interventi di esperti, internazionali e nazionali, di diverse discipline, come acustica, psicologia, e neuroscienze. Le tematiche affrontate hanno spaziato dagli effetti cognitivi del rumore sull’apprendimento, al comfort acustico e ambientale nelle aule scolastiche, fino al benessere degli insegnanti e

alle esperienze di studenti con bisogni sensoriali. La giornata si è conclusa con una tavola rotonda dedicata agli strumenti e ai metodi per misurare la performance dei bambini in condizioni di rumore.



Fig. 2 – I partecipanti al Workshop Internazionale
The participants of the International Workshop

Gli interventi hanno offerto una panoramica sui problemi di apprendimento in età scolare, mettendo in luce come diversi fattori legati alla qualità acustica e ambientale degli spazi e al loro utilizzo influenzino il percorso educativo. La creazione di ambienti didattici accoglienti e funzionali dipende infatti da molteplici elementi, tra cui la qualità acustica riveste un ruolo fondamentale, sia per gli studenti sia per gli insegnanti.

3 | La sintesi degli interventi

Il workshop ha visto una successione di interventi in cui sono state presentate esperienze di ricerca nazionali ed internazionali.

La sessione mattutina si è aperta con una relazione di Julie Dockrell dell'University College London, incentrata sulle sfide legate al trasferimento nella pratica dei risultati della ricerca scientifica, in riferimento agli interventi acustici per migliorare prestazione e apprendimento degli studenti. Particolare attenzione è stata posta sugli effetti del trattamento acustico degli spazi di apprendimento e dei sistemi di amplificazione sulle prestazioni degli studenti in compiti di lettoscrittura (ad esempio, comprensione del testo o elaborazione di informazioni).



Fig. 3 – Julie Dockrell dell'University College London
Julie Dockrell, University College London

A questo intervento ha fatto seguito quello di Barbara Arfè, del Dipartimento di Psicologia dello Sviluppo e della Socializzazione dell'Università degli Studi di Padova, Responsabile del PRIN "LEARN", che ha evidenziato la necessità di un approccio multi-disciplinare per comprendere quali siano gli effetti del rumore sulle prestazioni cognitive degli studenti di scuola primaria.

La relazione di Jessica Massonnié, dell'University of Portsmouth, si è focalizzata sull'interazione tra le caratteristiche dello spazio fisico dell'aula e la percezione dei bambini con particolari esigenze sensoriali, valutata attraverso questionari e focus group.



Fig. 4 – Jessica Massonnié dell'University of Portsmouth
Jessica Massonnié, University of Portsmouth

A seguire, sono stati presentati da parte di Pietro Scimemi, del Dipartimento di Neuroscienze dell'Università degli Studi di Padova, e Francesca Cappelletti, del Dipartimento di Culture del Progetto dell'Università Iuav di Venezia, alcuni dei risultati sperimentali del PRIN "EQUALITY" sugli effetti cognitivi del rumore e di altri parametri ambientali sull'apprendimento, con particolare attenzione alle prestazioni degli studenti bilingui.

Nel pomeriggio Janina Fels, della RWTH Aachen University, ha presentato una relazione sugli studi di percezione sonora condotti in laboratori di realtà virtuale, che permettono di riprodurre in modo controllato scenari realistici.



Fig. 5 – Janina Fels del RWTH Aachen University
Janina Fels, RWTH Aachen University

A seguire, Chiara Visentin del Dipartimento di Ingegneria dell'Università di Ferrara, ha presentato i risultati di un mo-

nitoraggio nelle aule della scuola primaria, condotto nell'ambito del PRIN "LEARN", mettendo in evidenza come il rumore prodotto dagli studenti vari in relazione all'età, al tipo di attività svolta e alle caratteristiche acustiche dell'ambiente di apprendimento. Antonino Di Bella, del Dipartimento di Ingegneria Industriale dell'Università degli Studi di Padova, ha invece approfondito alcuni aspetti relativi alle indagini acustiche che possono risultare utili per il confronto tra test cognitivi condotti in situ in ambienti eterogenei mediante comparazione con risultati ottenuti in ambienti in cui sia possibile realizzare condizioni di neutralità per gli aspetti sensoriali non acustici.

Jenni Radun, della Metropolia University of Applied Sciences, ha illustrato il confronto tra diversi approcci architettonici e organizzativi – dagli spazi di apprendimento aperti a quelli flessibili, fino a quelli chiusi – riportando sia le esperienze del personale docente sia le analisi sull'esposizione ai differenti ambienti sonori in rapporto alle pratiche didattiche.



Fig. 6 – Jenni Radun della Metropolia University of Applied Sciences

Jenni Radun, Metropolia University of Applied Sciences

Infine, Giulia Vettori, del Dipartimento di Formazione, Lingue, Intercultura, Letterature e Psicologia dell'Università di Firenze, ha parlato della qualità acustica percepita dagli insegnanti negli ambienti scolastici, sottolineando come rumore e riverberazione incidano non solo sulla chiarezza della comunicazione e sulla gestione della classe, ma anche sul benessere.

Ulteriori informazioni possono essere reperite sul sito dell'Associazione Italiana di Acustica, alla pagina:

<https://acustica-aia.it/event/international-workshop-classroom-noise-a-research-update-padova-12-settembre-2025/>



Fig. 7 – Un momento della tavola rotonda conclusiva dell'evento
The round table at the end of the event

4 | L'organizzazione

Il workshop è stato organizzato dall'Associazione Italiana di Acustica, in collaborazione con l'Università degli Studi di Padova, l'Università di Ferrara e l'Università Iuav di Venezia.

Il Comitato Organizzatore (Barbara Arfè, Antonino Di Bella, Pietro Scimemi, Gaia Spicciarelli, Francesca Cappelletti, Ilaria Pittana, Irene Pavanello, Cora Pavarini, Piercarlo Romagnoni, Nicola Prodi e Chiara Visentin) ha curato l'organizzazione dell'evento presso il Palazzo Bo dell'Università degli Studi di Padova, ha contribuito alla definizione del programma e all'invito dei relatori, oltre a diffondere, attraverso i propri canali istituzionali le informazioni dell'evento.

Il comitato Scientifico (Barbara Arfè, Antonino Di Bella, Pietro Scimemi, Rosamaria Santarelli, Francesca Cappelletti, Piercarlo Romagnoni, Nicola Prodi e Chiara Visentin) 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 workshop (Simona Senesi), che ha supportato la realizzazione dell'evento, sovrainteso alla preparazione del materiale informativo, contribuito alla diffusione dell'evento, e gestito gli aspetti amministrativi.

BRiC INAIL 2022 ID-11: Sviluppo e sperimentazione di prototipi avanzati di dispositivi per il controllo del rumore e delle vibrazioni a tutela della salute dei lavoratori

Francesco Morì^{a*} | Andrea Santoni^a | Patrizio Fausti^a | Francesco Pompoli^a |
Paolo Bonfiglio^b | Francesco Marafini^c | Annalisa Fregolent^c | Lindoro del Duca^c |
Nicola Stampone^d | Jacopo Brunetti^d | Walter d'Ambrogio^d | Michele Gabrio Antonelli^d |
Christian Preti^e | Antonio Moschetto^f | Diego Annesi^f | Raffaele Mariconte^f |
Pietro Nataletti^f

^a Dipartimento di Ingegneria,
Università degli studi di Ferrara,
Via Saragat, 1, 44122 Ferrara

^b Materiacustica Srl,
Via C. Ravera, 15/A, 44122 Ferrara

^c Dipartimento di Ingegneria meccanica
e aerospaziale,
Università degli Studi di Roma La Sapienza,
Via Eudossiana, 18, 00184 Roma

^d Dipartimento di Ingegneria Industriale
e dell'Informazione e di Economia,
Università degli Studi dell'Aquila,
Piazzale Ernesto Pontieri, 1, 67100 L'Aquila

^e Istituto di Scienze e Tecnologie per l'Energia
e la Mobilità Sostenibili del Consiglio
Nazionale delle Ricerche – STEMS CNR,
Strada delle Cacce, 73, 10135 Torino

^f Istituto Nazionale per l'Assicurazione
contro gli Infortuni sul Lavoro,
Via di Fontana Candida, 1, 00078 Roma

* Autore di riferimento:
francesco.mori@unife.it

Ricevuto: 29/9/2025

Accettato: 1/10/2025

DOI: 10.3280/ria2-2025oa21459

ISSN: 2385-2615

L'obiettivo del progetto BRIC 2022 ID-11, finanziato da INAIL, è quello di sviluppare e sperimentare, in laboratorio e in campo, nuove tecnologie per ridurre l'esposizione al rumore e alle vibrazioni di operatori alla guida dei mezzi agricoli e in contesti industriali. I dispositivi sviluppati sono sistemi di controllo attivo del rumore (ANC) e delle vibrazioni (AVC). Queste tecnologie sfruttano degli attuatori per generare in tempo reale delle onde in controparte rispetto a un segnale esistente, eliminandolo per il principio di interferenza distruttiva.

Parole chiave: controllo attivo del rumore, controllo attivo delle vibrazioni, esposizione del lavoratore, macchine agricole, ambienti industriali

BRiC INAIL 2022 ID-11: Development and testing of advanced demonstrators and prototypes of noise and vibration control devices to protect worker health

The aim of the BRIC 2022 ID-11 project, funded by INAIL, is to develop and test in both laboratory and field settings new technologies to reduce the exposure to noise and vibrations of operators driving agricultural machinery and working in industrial environments. The devices developed are active noise control (ANC) and active vibration control (AVC) systems. These technologies use actuators to generate, in real time, counter-phase waves with respect to an existing signal, canceling it out through the principle of destructive interference.

Keywords: active noise control, active vibration control, worker exposure, agricultural machines, industrial environments

1 | Introduzione

I progetti BRIC sono dei progetti di ricerca finanziati da INAIL e finalizzati alla tutela della salute e della sicurezza nei luoghi di lavoro. In questo contesto, il progetto BRIC 2022 ID-11 ha lo scopo di sviluppare e sperimentare, in laboratorio e in campo, nuove tecnologie per ridurre l'esposizione al rumore e alle vibrazioni di operatori alla guida dei mezzi agricoli e in contesti industriali. Queste tecnologie sfruttano degli attuatori per generare in tempo reale delle onde in controparte rispetto a un segnale esistente, eliminandolo per il principio di interferenza distruttiva. Il progetto è costituito dai 4 obiettivi specifici di seguito elencati, due legati allo sviluppo di sistemi di controllo attivo del rumore (ANC), e due legati allo sviluppo di sistemi di controllo attivo delle vibrazioni (AVC):

- Obiettivo 1: Controllo attivo del rumore all'interno della cabina di un mezzo agricolo.

- Obiettivo 2: Controllo attivo del rumore irradiato da un cabinato industriale.
- Obiettivo 3: Controllo delle vibrazioni verticali trasmesse agli operatori di mezzi agricoli e industriali.
- Obiettivo 4: Controllo delle vibrazioni sul piano trasversale trasmesse agli operatori di mezzi agricoli e industriali.

A questo progetto hanno partecipato 4 Unità Operative: Dipartimento di Ingegneria meccanica e aerospaziale (DIMA) dell'Università degli Studi di Roma La Sapienza, il Dipartimento di Ingegneria Industriale e dell'Informazione e di Economia (DIIIE) dell'Università degli Studi dell'Aquila, il Dipartimento di Ingegneria (DE) dell'Università degli studi di Ferrara e l'Istituto di Scienze e Tecnologie per l'Energia e la Mobilità Sostenibili (CNR-STEMS) della sede secondaria di Torino. A queste, si aggiunge il Dipartimento di Medicina, Epidemiologia, Igiene del Lavoro e Ambientale (DiMEILA) come Unità operativa interna di INAIL. Inoltre, questo progetto ha visto la collaborazione

con alcune aziende quali Carraro SpA, Phononic Vibes Srl e COBO SpA, per la definizione dei casi studio su cui sviluppare l'applicazione di sistemi di controllo attivo.

2 | Background

Le malattie professionali correlate a rumore e vibrazioni costituiscono una quota rilevante tra quelle riconosciute da INAIL. Per garantire la tutela dei lavoratori e rispettare i limiti fissati dal D.lgs. 81/2008, vengono adottate soluzioni di prevenzione basate su tecniche passive (fonoassorbimento, fonoisolamento, isolamento e smorzamento delle vibrazioni). Tuttavia, tali strategie risultano poco efficaci soprattutto alle basse frequenze, rendendo necessario l'impiego di tecnologie di controllo attivo: Active Noise Control (ANC) per il rumore e Active Vibration Control (AVC) per le vibrazioni.

Il sistema ANC è particolarmente indicato per ridurre il rumore a medio-basse frequenze. Si basa sulla generazione in tempo reale di un segnale opposto in fase rispetto a un disturbo esistente. L'impiego di algoritmi adattivi consente di adeguarsi a variazioni della sorgente di rumore, superando i limiti delle soluzioni tradizionali che operano su frequenze fisse. Una possibile applicazione riguarda i trattori agricoli, dove il guidatore è esposto per molte ore a componenti di rumore tra 20 Hz e 1000 Hz, principalmente correlate al motore. Altri ambiti di rilievo sono i cabinati industriali, dove il sistema ANC può essere applicato al controllo vibro-acustico della radiazione di pannelli a bassa frequenza, a sistemi di aerazione e alla radiazione attraverso aperture.

Il controllo attivo delle vibrazioni (AVC) trova applicazione soprattutto alle basse frequenze, dove le soluzioni passive risultano meno performanti. Tali sistemi prevedono l'impiego di attuatori capaci di regolare le oscillazioni a cui è sottoposto un oggetto. Nei trattori agricoli, privi di sospensioni posteriori, la trasmissione delle vibrazioni lungo la colonna vertebrale del conducente avviene principalmente attraverso il sedile. Le soluzioni a questo problema variano dalle sospensioni passive (a elementi elastici e smorzanti) a quelle semiattive (ad esempio con sistemi multichamber o smorzatori magnetoreologici), fino a quelle attive, dotate di sensori e unità di controllo che guidano gli attuatori.

In conclusione, l'adozione di tecnologie ANC e AVC rappresenta una prospettiva concreta per ridurre il rischio di esposizione professionale a rumore e vibrazioni. Tali sistemi, applicati sia nel settore agricolo sia in quello industriale, consentono di proteggere la salute degli operatori, sia attenuando il rumore percepito, sia riducendo le vibrazioni trasmesse al corpo.

3 | Obiettivo 1 – Controllo attivo del rumore per la cabina di un trattore

L'Obiettivo 1 del progetto BRIC 2022 ID-11 ha riguardato lo sviluppo e la validazione sperimentale di un sistema ANC applicato alla cabina di un trattore.

Il sistema è stato inizialmente sviluppato, ottimizzato e validato in diversi laboratori, caratterizzati da un differente tempo di riverbero, per verificare le prestazioni in diverse condizioni ambientali. In particolare, i test condotti sulla cabina di un trattore in camera semi-anecoica (Fig. 1) con una sorgente acustica come fonte di rumore hanno permesso di studiare preliminarmente una configurazione da implementare in situ [1,2]. A questo scopo, con supporto di simulazioni numeriche [3,4], sono stati sviluppati diversi algoritmi basati sul metodo ai minimi quadrati (LMS) che potessero tenere conto della variabilità della sorgente di rumore e che potessero contrastare al meglio la potenziale instabilità del sistema. L'analisi preliminare in laboratorio ha fornito alcune indicazioni sulla scelta del sistema ANC da applicare a un trattore reale. In particolare, si è scelto di portare alla validazione in situ un sistema feedback, cioè privo di un sensore di riferimento, in quanto i segnali di riferimento vengono modellati internamente dal sistema in tempo reale. All'interno dell'algoritmo, lo step-size, il parametro che regola la velocità di convergenza del sistema e la sua stabilità, viene normalizzato rispetto alla potenza del segnale di riferimento per tenere conto della variabilità della sorgente. Inoltre, l'introduzione di un limite al voltaggio da poter erogare agli altoparlanti di controllo, di un fattore di leakage per evitare la saturazione degli altoparlanti e l'impiego di filtri digitali per la selezione del campo di frequenze di interesse hanno permesso la realizzazione di un sistema robusto.

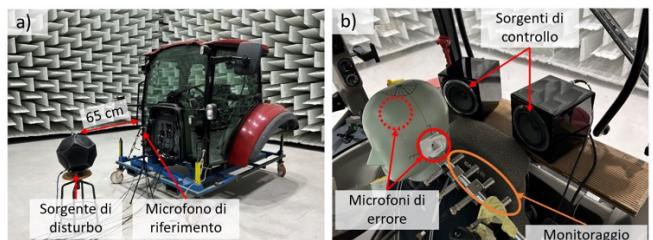


Fig. 1 – Setup sperimentale per lo sviluppo preliminare sulla cabina di un trattore in camera semi-anecoica

Experimental setup for the preliminary development on a tractor cabin in a hemi-anechoic chamber

Le prove su un trattore reale possono essere suddivise in tre categorie:

- prove su trattore fermo, al variare del numero di giri (rpm) del motore;
- prove su trattore in moto, sia su pista asfaltata sia su serrato, in diverse condizioni di guida;
- prove su trattore in condizioni di lavorazione.

Le prove su trattore fermo hanno riguardato diversi trattori: un mezzo fornito da Agritalia, un trattore Fiat F140 e un trattore New Holland T6020. A titolo di esempio, in Fig. 2 si riporta il setup sperimentale montato sul trattore Fiat F140 [5]. Esso consiste in due microfoni di errore, posti in prossimità della testa dell'operatore e due altoparlanti di controllo posizionati dietro il sedile, all'altezza delle spalle. I segnali acquisiti dai microfoni vengono processati in tempo reale da

una scheda NI-cRio 9063. L'output dell'algoritmo viene utilizzato per generare il segnale in controfase con gli altoparlanti di controllo. In Fig. 3 vengono riportate le attenuazioni globali registrate per diverso numero di giri. In generale, è stato garantito un minimo di 5 dB e 2 dB(A) di attenuazione in tutte le prove condotte con valori massimi fino a 22 dB e 6 dB(A). Tali attenuazioni sono correlabili alla cancellazione delle componenti tonali a bassa frequenza emesse dal motore e percepite dal guidatore all'interno della cabina per via della propagazione strutturale.

Le prove in diverse condizioni di guida sono state condotte presso il CNR-STEMS di Torino [6-8], su una pista asfaltata ad anello di lunghezza 1 km (Fig. 4). Sempre nello stesso sito, alcune misure sono state condotte su un tratto di strada sterrata che porta alla pista. I test sono stati condotti variando il numero di giri del motore e la velocità del trattore. Si riporta a titolo di esempio in Fig. 5 lo spettro in terzi di ottava senza e con ANC e la storia temporale dei principali ordini motore



Fig. 2 – Esempio di setup sperimentale su trattore in situ
Example of experimental setup on a tractor in-situ

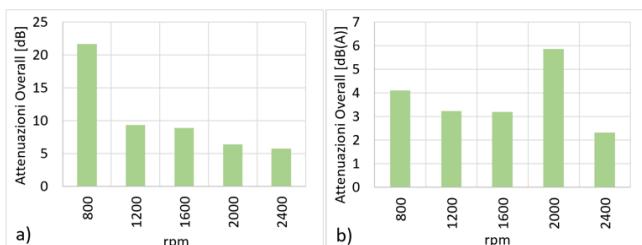


Fig. 3 – Attenuazioni globali registrate a trattore fermo per diversi rpm: a) in dB e b) in dB(A)
Overall attenuation recorded on a motionless tractor for different rpm: a) in dB, b) in dB(A)



Fig. 4 – Contesti delle prove con trattore in condizioni di guida:
a) pista asfaltata, b) strada sterrata
Testing contexts for tractor under driving conditions:
a) asphalt track, b) unpaved road

(ANC acceso dopo 10 s) per trattore a 1600 rpm e velocità 12 km/h. In generale, si sono ottenute attenuazioni globali fino a 5 dB e 7 dB(A), con qualche raro caso di amplificazione del livello lineare, associato a basse frequenze (< 40 Hz). Risultati simili sono stati ottenuti nelle prove su strada sterrata.

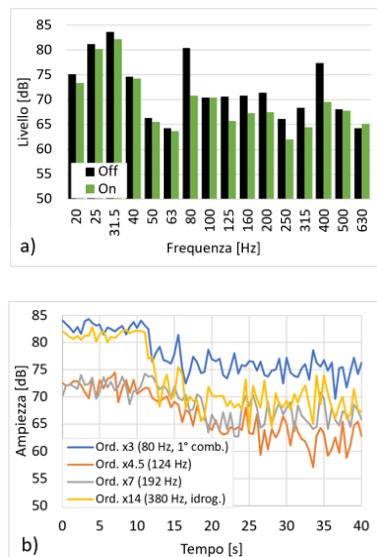


Fig. 5 – Risultati per trattore in moto a 1600 rpm, 12 km/h:
a) livello in terzi di ottava senza e con ANC, b) storia temporale del livello dei principali ordini motore
Results for the tractor in motion at 1600 rpm, 12 km/h:
a) third octave band level without and with ANC, b) time history of main engine order levels

Infine, per avere una validazione completa, alcune prove sono state effettuate su un trattore New Holland T6020 durante l'aratura di un campo presso Cossignano (AP) (Fig. 6). Anche in questo caso sono state effettuate misure al variare della velocità del trattore. A titolo di esempio, si riporta in Fig. 7 lo spettrogramma di una misura condotta con motore a circa 1500 rpm, dove sono stati indicati i tratti di storia temporale senza e con controllo attivo. In generale il sistema si è rivelato in grado di agire su diverse componenti del motore, con attenuazioni globali tra 0.7 e 7 dB e fino a 5 dB(A). Inoltre, un'analisi sui principali parametri psicoacustici ha permesso di stabilire che il sistema ANC è in grado di attenuare la loudness, indicatore della rumorosità percepita in cabina, fino a 7 sones.



Fig. 6 – Trattore in lavorazione usato nelle prove di validazione
Tractor in working condition employed for the validation tests

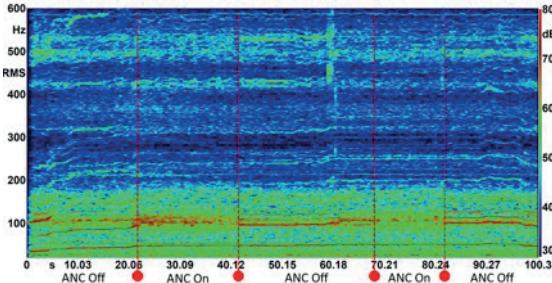


Fig. 7 – Spettrogramma della misura di validazione in condizione di aratura
Spectrogram of the validation test in ploughing condition

Da questi risultati è emersa la potenzialità di integrare il sistema ANC nelle cabine dei trattori al fine di ridurre l'esposizione al rumore del guidatore. Nei possibili futuri sviluppi di questo progetto il sistema potrà essere studiato in ottica di industrializzazione, ricercando il giusto equilibrio tra prestazioni del sistema e costi di realizzazione.

4 | Obiettivo 2 – Controllo attivo del rumore per un cabinato industriale

L'Obiettivo 2 del progetto BRIC 2022 ID-11 è indirizzato a ridurre le emissioni sonore di cabinati industriali con tecniche di controllo attivo, per creare ambienti di lavoro più confortevoli. In tal senso, per eseguire la campagna di misure sperimentali, è stato progettato e fornito da Phononic Vibes srl il cabinato riportato in Fig. 8 che modella in modo rappresentativo l'incapsulaggio di una sorgente industriale [9]. Questo cabinato ha dimensioni interne di $180 \times 130 \times 140$ cm e ha tutte le pareti trattate acusticamente con lana di roccia e rete metallica, ad eccezione di una che può ospitare tre elementi differenti: un pannello con camino, una lamiera non trattata o un'apertura di grandi dimensioni. Queste differenti coperture rappresentano tipiche criticità acustiche per un cabinato industriale, difficilmente trattabili con tecniche passive in particolare a bassa frequenza.



Fig. 8 – Cabinato industriale oggetto dei test: configurazione con a) camino, b) lamiera, c) apertura
Industrial enclosure for tests: configuration with a) chimney, b) steel plate, c) opening

Per il caso con camino è stato sviluppato un sistema ANC feedforward con un solo microfono di errore e un altoparlante di controllo, avendo l'accortezza di rispettare il vincolo di causalità, ossia curando che la distanza tra il microfono di riferimento e quello di errore fosse sufficiente per garantire il processamento e l'emissione dei segnali in tempo reale [10].

Inoltre, essendo il camino una buona guida d'onda, è stato necessario considerare all'interno dell'algoritmo sviluppato la propagazione sonora dalla sorgente di controllo al microfono di riferimento. Le prove sono state condotte sia in presenza di flusso d'aria generato da un ventilatore centrifugo a diverse velocità (Fig. 9a), sia con una sorgente acustica emettente in modo simulato il rumore di diversi macchinari (Fig. 9b). In Fig. 9c viene riportato il setup esterno al cabinato, con la derivazione della sorgente di controllo. Nel caso con ventilatore il rumore è puramente a banda larga, notoriamente difficile da attenuare per il sistema ANC. Si sono registrate attenuazioni globali di 0.6-1.2 dB e 1.4-2.0 dB(A), associate all'attenuazione in diverse bande, principalmente tra 400 Hz e 800 Hz e in quella a 160 Hz. A titolo di esempio, si riporta in Fig. 10 lo spettro senza e con controllo attivo per velocità di flusso d'aria di 1.75 m/s. Nel caso di registrazioni di macchinari, le attenuazioni variano a seconda del segnale della sorgente di disturbo. In particolare, si sono registrate attenuazioni di 11 – 12 dB(A) per i casi di un trasformatore, di una pompa e di un compressore domestico, caratterizzati da forti componenti tonali stazionarie nel tempo; 3 – 5 dB(A) per compressori industriali, bruciatori a olio e macchine ad acqua, caratterizzati da segnali a banda larga o modulati nel tempo.

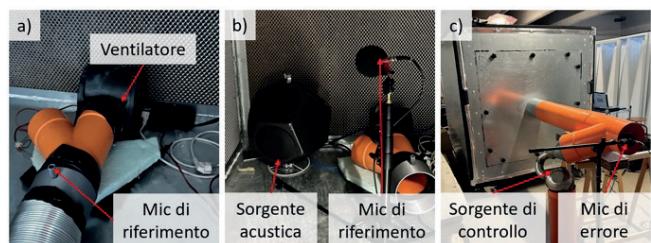


Fig. 9 – Sistema ANC applicato al camino: a) ventilatore come sorgente di rumore, b) dodecaedro come sorgente di rumore, c) setup esterno al cabinato
ANC system applied to the chimney: a) fan as a noise source, b) dodecahedron as a noise source, c) setup external to the enclosure

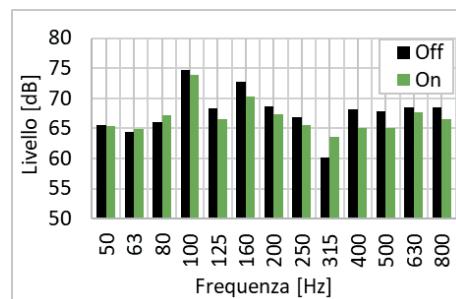


Fig. 10 – Spettro generato dal ventilatore senza e con ANC
Spectrum generated by the fan without and with ANC

Successivamente è stato studiato un sistema di controllo attivo da applicare al caso della radiazione acustica di una piastra in acciaio. Tale sistema prende più correttamente il nome di controllo attivo acustico-strutturale (ASAC) e sfrutta un attuatore inerziale al posto di un altoparlante di controllo

per ridurre il rumore irradiato dall'elemento [11]. Il sistema è riportato in Fig. 11, dove un microfono di riferimento è stato allocato in prossimità della sorgente acustica simulata, mentre la posizione dell'attuatore è stata ottimizzata considerando la rigidezza dei bordi e la posizione dei nodi dei modi di vibrare della piastra. Il sistema sfrutta la tecnica dei microfoni remoti (RMT) per definire la zona di quiete: il microfono di errore viene posizionato in prossimità della piastra, ma la cancellazione avviene in posizione virtuale, in questo caso a 60 cm dalla parete del cabinato. Questo permette di non avere ostacoli fisici durante il normale funzionamento del sistema. A titolo di esempio, si riporta in Fig. 12 lo spettro di un compressore industriale rilevato al microfono di errore senza e con controllo attivo. Il sistema ASAC si è rivelato in grado di ridurre il rumore in tutte le bande dello spettro, con attenuazioni fino a 5.5 dB nella banda a 80 Hz. Le attenuazioni globali sono state di 3.5 dB e 2.9 dB(A), dimostrando la potenzialità del sistema. Simili risultati si sono ottenuti per la lamiera trattata acusticamente come le pareti interne del cabinato.

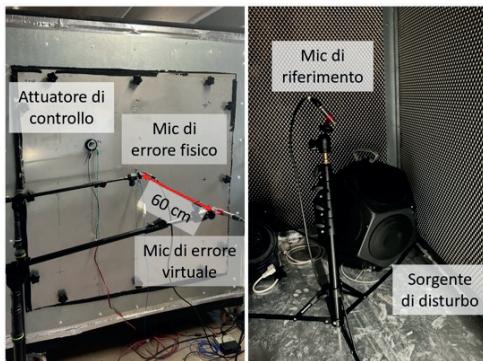


Fig. 11 – Sistema ASAC per il controllo della radiazione acustica di una lamiera

ASAC system for acoustic radiation control of a steel plate

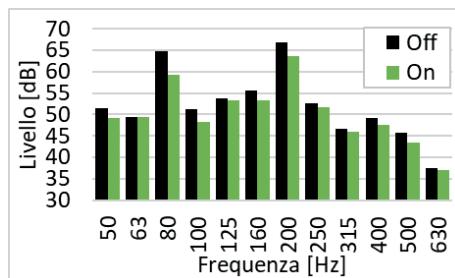


Fig. 12 – Spettro irradiato senza e con ANC per un compressore industriale

Radiated spectrum without and with ANC for an industrial compressor

Infine, il sistema applicato a una grande apertura segue lo stesso principio. Le sorgenti di controllo possono essere posizionate sul contorno dell'apertura, mentre il microfono di errore può essere collocato alla postazione dell'operatore o può essere sfruttata la tecnica RMT per tenere il microfono vicino al cabinato creando la zona di quiete a distanza. I test di validazione per questo caso sono ancora in corso.

Questi studi mostrano la potenzialità della tecnologia di controllo attivo di superare le criticità dell'isolamento fornito dal cabinato, in particolare a basse frequenze, creando ambienti di lavoro più confortevoli.

5 | Obiettivo 3 – Controllo attivo delle vibrazioni verticali su un mezzo agricolo

L'esposizione a vibrazioni a corpo intero (WBV) trasmesse ad un operatore in posizione seduta possono avere effetti negativi sulla salute ed il benessere del lavoratore [12, 13].

Il moto di rotolamento degli pneumatici su terreni sconnessi è una delle principali fonti di vibrazione unitamente all'effetto delle macchine operatrici e del motore termico. Queste vibrazioni si trasmettono attraverso la cabina e il sedile al conducente del mezzo. La norma ISO 2631-1:1997 [14] impone di valutare l'esposizione alle vibrazioni nella banda in frequenza da 0.5 a 80 Hz. Ai fini dell'ottimizzazione di sistemi per il controllo delle vibrazioni verticali, tenendo conto della presenza della sospensione primaria del veicolo e dell'imbotitura della seduta, è ragionevole realizzare un sistema di controllo efficace fino a 10 Hz [15].

I sistemi di controllo delle vibrazioni verticali attualmente in commercio sono tipicamente di tipo passivo o semi attivo [5] e solo in alcuni casi di tipo AVC [16]. Nell'ambito del progetto di ricerca BRIC INAIL ID 11 è stato sviluppato un sistema AVC ad attuazione elettroidraulica [17-19], è stato valutato l'impiego di uno smorzatore a fluido magnetoreologico (MR) in un sistema di controllo semiaattivo (SAVC) [20] ed è stato testato un sistema pneumatico SAVC a camere multiple.

5.1 | Sistema AVC elettroidraulico

In Fig. 13 è riportato il sistema AVC ad attuazione elettroidraulica composto da una piastra fissa e da una piastra mobile vincolata a muoversi nella sola direzione verticale da due guide lineari. La velocità relativa tra le due piastre è imposta da un

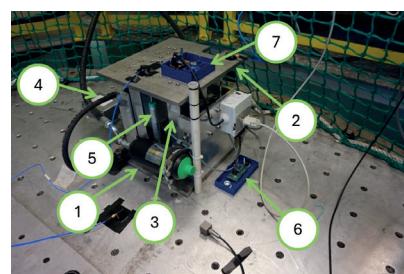


Fig. 13 – Sistema AVC ad attuazione elettroidraulica con (1) piastra fissa, (2) piastra mobile, (3) attuatore idraulico, (4) eletro valvola proporzionale in portata, (5) trasduttore lineare di posizione, (6) accelerometro MEMS di riferimento e (7) accelerometro MEMS di risposta

Electrohydraulic actuated AVC with (1) a fixed plate, (2) a moving plate, (3) the hydraulic actuator, (4) the proportional flow-rate electro valve, (5) the linear position transducer, (6) the reference MEMS accelerometer and (7) the response MEMS accelerometer

attuatore idraulico a doppio effetto alimentato da una elettrovalvola proporzionale in portata. Il segnale di comando dell'elettrovalvola è generato da un controllore che elabora i dati di accelerazione e spostamento relativo per minimizzare l'accelerazione della piastra mobile [21].

Il controllore implementa due algoritmi di controllo simultanei [22]. Un primo algoritmo proporzionale, integrativo e derivativo (PID) è caratterizzato da una costante di tempo dell'ordine dei secondi e agisce sulla posizione relativa tra le due piastre per mantenere lo stelo dell'attuatore in prossimità del centro della sua corsa totale. Un secondo algoritmo FPBFxLMS [23, 24] minimizza l'accelerazione della piastra mobile e della massa sospesa in funzione dell'accelerazione della piastra fissa. I due algoritmi di controllo sono stati implementati su una scheda a microcontrollore a basso costo dato il ridotto carico computazionale richiesto per controllare il sistema nella banda in frequenza di interesse.

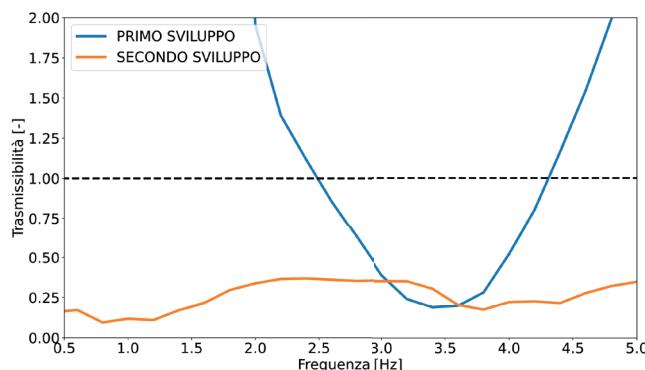


Fig. 14 – Curve di trasmissibilità dei test per il sistema AVC ad attuazione elettroidraulica

Experimental transmissibility curves for the AVC electrohydraulic actuated system

In Fig. 14 sono riportati i grafici di trasmissibilità ottenuti sperimentalmente per due differenti fasi di sviluppo. I test sono stati condotti sfruttando sia la tavola vibrante a 6 GdL del DIMEILA di Monte Porzio Catone che quella del CNR-STEMS di Torino a 1 GdL. In una prima fase il sistema usava accelerometri MEMS analogici. In una seconda fase sono stati usati accelerometri MEMS in protocollo di lettura digitale e sono stati ottimizzati i parametri dell'algoritmo adattivo per migliorarne le prestazioni nella banda di maggiore interesse per le WBV.

5.2 | Sistema pneumatico SAVC a camere multiple

Il sistema pneumatico SAVC a camere multiple in Fig. 15a presenta come elemento elastico una molla ad aria collegata tra piastra fissa e mobile. Lo schema di principio del sistema è riportato in Fig. 15b. Tre serbatoi sono connessi alla molla ad aria ognuno per mezzo di un'elettrovalvola 2/2. Un controllore implementa un algoritmo di controllo con logica derivata dallo SkyHook. In funzione dello stato del sistema, il controllore

apre una o più elettro valvole simultaneamente mettendo in comunicazione i volumi ausiliari con la molla ad aria, variando la rigidezza della sospensione. In questo modo si modifica il comportamento dinamico del sedile al fine di attenuare le vibrazioni trasmesse alla massa sospesa.

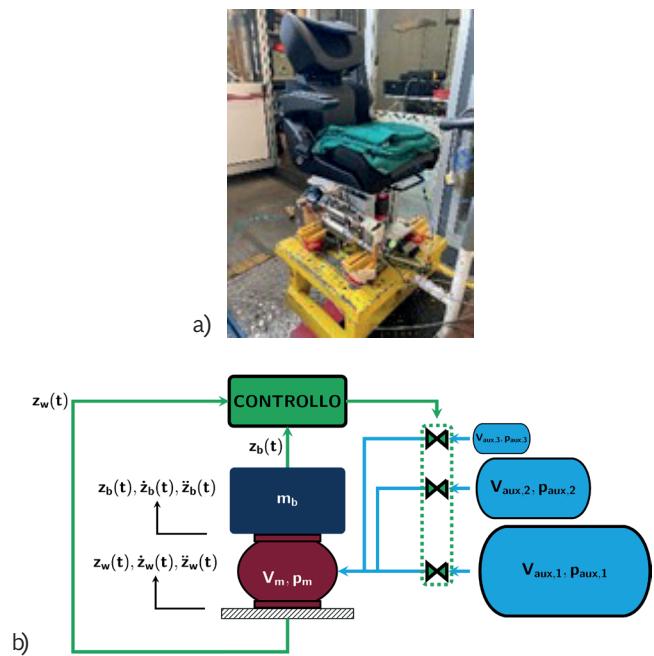


Fig. 15 – Sistema pneumatico SAVC a camere multiple:

a) prototipo e b) schema di funzionamento

SAVC multichamber pneumatic system: a) prototype and b) working scheme

5.3 | Caratterizzazione di uno smorzatore a fluido magnetoreologico

Nell'ambito dei sistemi SAVC sono spesso impiegati smorzatori MR. Un MR è in grado di modificare la forza di smorzamento esercitata in funzione della corrente di alimentazione del dispositivo.

Per valutare l'impiego di un MR in un SAVC il dispositivo è stato caratterizzato sperimentalmente per ricavare un coefficiente di smorzamento strutturale equivalente in funzione della corrente di alimentazione dell'MR. Le prove sperimentali sono state svolte in una macchina di trazione e compressione imponendo una legge di spostamento lineare per ottenere una velocità costante a tratti.

In Fig. 16 sono riportati i risultati dei test di caratterizzazione del MR. Le curve mostrano che a causa dell'effetto di saturazione magnetica, all'aumentare della corrente di alimentazione non corrisponde un aumento significativo della forza di smorzamento esercitata. I risultati sperimentali sono stati approssimati con una legge lineare a tratti funzione della corrente di alimentazione e della velocità dello stelo dello smorzatore. Per ogni valore di corrente di alimentazione del dispositivo è stato identificato un coefficiente di smorzamento strutturale.

Per usare l'MR in un SAVC è possibile considerare logiche di controllo di tipo Sky-Hook che mostrano un'efficacia del dispositivo per l'attenuazione delle accelerazioni sulla massa sospesa. L'algoritmo valuta il prodotto tra la velocità relativa e assoluta della piastra sospesa, in base al quale determina il valore ottimo di smorzamento richiesto a cui corrisponde la corrente di alimentazione per l'MR.

Gli algoritmi di controllo sono stati implementati numericamente confrontando il comportamento del sistema SAVC con un sistema passivo a smorzamento costante. Dall'analisi è emerso che il sistema controllato è in grado di agire sulle accelerazioni verticali della massa sospesa.

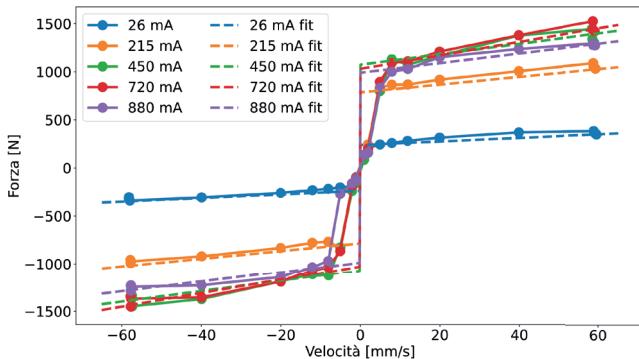


Fig. 16 – Risultati sperimentali di caratterizzazione dell'MR e curve di regressione identificate

Experimental characterization results for the MR and identified fitted curves

6 | Obiettivo 4 – Controllo attivo delle vibrazioni trasversali su un mezzo agricolo

Nelle normali condizioni operative di un veicolo agricolo, gli spostamenti verticali della ruota destra e sinistra dello stesso assale sono differenti. Pertanto, il conducente, oltre che alle vibrazioni nella direzione verticale, è soggetto anche a quelle dovute al moto di rollio.

6.1 | Sistema di controllo attivo delle vibrazioni attorno l'asse di rollio

Per limitare le vibrazioni dovute al moto di rollio si può pensare di collegare la cabina al telaio mediante un meccanismo che permetta alla cabina di ruotare attorno all'asse di rollio del mezzo. È stato sviluppato un dimostratore in scala ridotta di un sistema AVC ad attuazione elettropneumatica rappresentato in Fig. 17a. Il sistema è composto da un telaio superiore, che rappresenta la cabina del mezzo e un telaio inferiore che rappresenta il telaio del mezzo. Il telaio superiore è collegato al telaio inferiore da due bilancieri i cui assi longitudinali convergono in un punto che rappresenta la traccia dell'asse di rotazione del telaio superiore e che deve coincidere con l'asse di rollio del mezzo. Il moto del telaio

inferiore è imposto, pertanto il sistema così definito costituisce un sistema ad un grado di libertà, la cui configurazione può essere controllata da un attuatore pneumatico a doppio effetto interposto tra uno dei bilancieri ed il telaio superiore. L'architettura del sistema consente di compensare con un singolo attuatore sia le rotazioni attorno all'asse di rollio che le oscillazioni laterali indotte dal rollio. Il sistema è dotato di sensori di tipo IMU (Inertial Measurement Units) in grado di fornire accelerazioni, velocità angolari e angoli di assetto e di un traduttore lineare di posizione.

Sono state valutate diverse metodologie per il controllo del sistema. Un primo approccio prevedeva il controllo in pressione di una sola delle due camere dell'attuatore, mediante una elettrovalvola proporzionale in pressione, mantenendo l'altra delle due camere chiusa a formare una molla ad aria. In questo modo era possibile effettuare un controllo di posizione dell'attuatore al fine di compensare l'angolo di assetto del telaio inferiore. Un secondo approccio si basa sull'utilizzo di una valvola proporzionale in portata per controllare i flussi di aria in entrambe le camere dell'attuatore al fine di minimizzare le accelerazioni orizzontali e controllare l'assetto del telaio superiore.

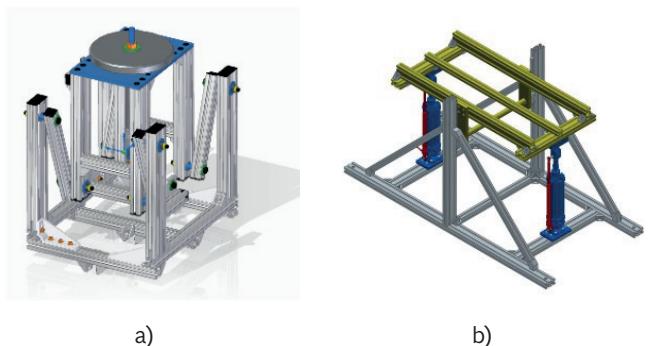


Fig. 17 – Controllo delle vibrazioni attorno l'asse di rollio del veicolo: a) sistema AVC di rollio ad attuazione elettropneumatica e b) piattaforma oscillante a 2 GdL

Control of vibration in the roll direction: a) electropneumatic AVC roll system and b) 2 DoF vibrating platform

6.2 | Sviluppo di un banco prova a 2 GdL per il sistema di controllo delle vibrazioni trasversali

Per poter testare le potenzialità del dimostratore in Fig. 17b è stata realizzata ad hoc una piattaforma vibrante a 2 GdL ad attuazione elettropneumatica [25] da usare in alternativa alla tavola vibrante a 6 GdL. Il sistema in Fig. 17b è composto da un telaio fisso rispetto al quale un telaio mobile è libero di traslare nella direzione verticale e ruotare attorno ad un asse orizzontale. Il moto del telaio mobile è governato da due attuatori pneumatici a doppio effetto controllati rispettivamente da valvole 5/3 proporzionali in portata. Il sistema consente di riprodurre in scala ridotta i profili di spostamento definiti dalla norma ISO 5008:2002 [26].

7 | Conclusioni e prospettive

In questo progetto è stata studiata la potenzialità dei sistemi di controllo attivo del rumore e delle vibrazioni come soluzione per la tutela della salute e della sicurezza nei luoghi di lavoro. In particolare, i risultati sono stati molto incoraggianti e gettano le basi per realizzare applicazioni pratiche e industrializzate. Queste soluzioni possono essere integrate con quelle attuali passive e semi-attive migliorando le condizioni di sicurezza e di comfort degli operatori nei settori agricolo e industriale. Inoltre, tali tecnologie possono essere estese ad altri ambiti simili, quali macchine operatrici, mezzi di trasporto, macchine di movimentazione terra e ambulanze.

Conclusions and perspectives

In this project, the potential of active noise and vibration control systems as solutions for safeguarding health and safety in workplaces was investigated. In particular, the results were highly encouraging and lay the groundwork for the development of practical and industrialized applications. These solutions can be integrated with existing passive and semi-active approaches, thereby improving safety and comfort conditions for operators in the agricultural and industrial sectors. Furthermore, such technologies can be extended to other related fields, such as operating machinery, transport vehicles, earth-moving equipment, and ambulances.



ISTITUTO NAZIONALE PER L'ASSICURAZIONE
CONTRO GLI INFORTUNI SUL LAVORO



DIPARTIMENTO DI INGEGNERIA
MECCANICA E AEROSPAZIALE

SAPIENZA
UNIVERSITÀ DI ROMA

UNIVERSITÀ
DEGLI STUDI
DELL'AQUILA



DIINE
Dipartimento di Ingegneria
Industriale e dell'Informazione
e di Economia

Consiglio Nazionale delle Ricerche



Istituto di Scienze e Tecnologie
per l'Energia e la Mobilità Sostenibili



Università
degli Studi
di Ferrara

Department of
Engineering
Ferrara

Fig. 18 – Logo dei partners coinvolti

Involved partners logo

Bibliografia

- [1] F. Mori, A. Santoni, P. Fausti, F. Pompoli, P. Bonfiglio, P. Nataletti, The effectiveness of least mean squared-based adaptive algorithms for active noise control system in a small confined space, *Applied Sciences* 13 (2023) 11173. <https://doi.org/10.3390/app132011173>.
- [2] F. Mori, A. Santoni, P. Fausti, F. Pompoli, P. Nataletti, P. Bonfiglio, L'efficacia di un sistema di controllo attivo del rumore con tecnica dei microfoni remoti nella cabina di un trattore, *Rivista Italiana Di Acustica* 49 (2025) 9–19. <https://doi.org/10.3280/ria1-2025oa19189>.
- [3] F. Mori, A. Santoni, C. Marescotti, P. Fausti, P. Nataletti, P. Bonfiglio, Active noise control with adaptive algorithms applied to a finite element model, in: 30th International Congress on Sound and Vibration, Amsterdam, 2024.
- [4] F. Mori, A. Santoni, C. Marescotti, P. Fausti, F. Pompoli, P. Nataletti, P. Bonfiglio, Stima della risposta all'impulso su un modello a elementi finiti mediante analisi nel dominio del tempo con metodi implicito ed esplicito, in: 50° Convegno Nazionale AIA, Taormina, 2024.
- [5] F. Mori, A. Santoni, A. Marcazzani, P. Fausti, F. Pompoli, C. Preti, P. Nataletti, P. Bonfiglio, Da un sistema di controllo attivo del rumore feedforward a uno feedback: confronto su un trattore in assenza di moto, in: 51° Convegno Nazionale AIA, Treviso, 2025.
- [6] F. Mori, A. Santoni, P. Fausti, F. Pompoli, P. Bonfiglio, Prove preliminari di un sistema di controllo attivo del rumore su un trattore in moto, in: 49° Convegno Nazionale AIA, Ferrara, 2023.
- [7] F. Mori, A. Santoni, P. Fausti, F. Pompoli, P. Bonfiglio, C. Preti, Active noise control with FXLMS algorithm applied to a tractor in driving condition, in: 29th International Congress on Sound and Vibration, Prague, 2023.
- [8] F. Mori, A. Santoni, C. Marescotti, P. Fausti, F. Pompoli, C. Preti, P. Nataletti, Active noise control in a tractor cabin: implementation challenges and experimental testing in driving conditions, *Applied Acoustics* 242 (2025) 111087. <https://doi.org/10.1016/j.apacoust.2025.111087>.
- [9] C. Marescotti, F. Pompoli, F. Mori, A. Santoni, P. Fausti, P. Nataletti, P. Bonfiglio, Sistema ANC applicato ad incapsulaggi di macchinari industriali: riduzione del rischio di esposizione al rumore dei lavoratori, in: 50° Convegno Nazionale AIA, Taormina, 2024.
- [10] F. Mori, A. Santoni, C. Marescotti, P. Fausti, F. Pompoli, P. Nataletti, P. Bonfiglio, Sistema di controllo attivo del rumore applicato al camion di un cabinato industriale, in: 51° Convegno Nazionale AIA, Treviso, n.d.
- [11] F. Mori, A. Santoni, C. Marescotti, P. Fausti, F. Pompoli, P. Nataletti, P. Bonfiglio, Active structural acoustic control with remote microphone technique for noise radiated by a thin plate, in: Forum Acusticum 2025, Malaga, 2025.
- [12] M. Bovenzi, A. Betta, Low-back disorders in agricultural tractor drivers exposed to whole-body vibration and postural stress, *Applied Ergonomics* 25 (1994) 231–241. [https://doi.org/10.1016/0003-6870\(94\)90004-3](https://doi.org/10.1016/0003-6870(94)90004-3).
- [13] S. Kwaku Essien, C. Trask, M. Khan, C. Boden, B. Bath, Association Between Whole-Body Vibration and Low-Back Disorders in Farmers: A Scoping Review, *Journal of Agromedicine* 23 (2018) 105–120. <https://doi.org/10.1080/1059924x.2017.1383333>.
- [14] ISO2631-1:1997, Mechanical Vibration and Shock-Evaluation of Human Exposure to Whole-Body Vibration General Requirements., International Organization for Standardization;, Geneva, Switzerland, 1997.
- [15] J. Brunetti, W. D'Ambrogio, A. Fregolent, Analysis of the Vibrations of Operators' Seats in Agricultural Machinery Using Dynamic Substructuring, *Applied Sciences* 11 (2021) 4749. <https://doi.org/10.3390/app11114749>.
- [16] Y. Zhao, X. Wang, A Review of Low-Frequency Active Vibration Control of Seat Suspension Systems, *Applied Sciences* 9 (2019) 3326. <https://doi.org/10.3390/app9163326>.
- [17] M.G. Antonelli, J. Brunetti, W. D'Ambrogio, A. Fregolent, P. Nataletti, Development of a Digital Twin for a Hydraulic, Active

- Seat Suspension System, Machines 11 (2023). <https://doi.org/10.3390/machines11070708>.
- [18] M.G. Antonelli, J. Brunetti, W. D'Ambrogio, A. Fregolent, F. Marafini, Identification of the electromechanical model of a pneumatic positioner for the dynamic actuation of an oscillating platform, in: K.U. Leuven (Ed.), 31st Edition of the Biennial ISMA Conference on Noise and Vibration Engineering - Leuven, Belgium 2024, Leuven, 2024.
- [19] M.G. Antonelli, J. Brunetti, W. D'Ambrogio, A. Fregolent, F. Latini, Multi-physics modeling of an active seat suspension with pneumatic or hydraulic actuation, Proceedings of ISMA 2022 - International Conference on Noise and Vibration Engineering and USD 2022 - International Conference on Uncertainty in Structural Dynamics (2022) 211–223.
- [20] M.G. Antonelli, J. Brunetti, W. D'Ambrogio, M. Di Manno, A. Fregolent, F. Marafini, Characterization of a magnetoreological damper for semi-active suspension control, in: AIMETA (Ed.), XXVI Congresso AIMETA - Napoli 2024, Naples, 2024.
- [21] A. Moschetto, L. Del Duca, P. Nataletti, F. Marafini, S. Monti, A. Tirabasso, R. Di Giovanni, D. Annesi, A. Fregolent, Prototipo avanzato di sedile con sistema di controllo attivo, Associazione Italiana Di Acustica - 51° Convegno Nazionale (2025).
- [22] F. Marafini, C. Preti, J. Brunetti, W. D'Ambrogio, A. Fregolent, G. Paletto, P. Nataletti, Valutazioni delle prestazioni del controllo elettronico idraulico delle vibrazioni verticali di un sedile per mezzi agricoli, in: A.I. di Acustica (Ed.), Associazione Italiana Di Acustica - 51° Convegno Nazionale, Treviso, 2025.
- [23] F. Yang, Y. Cao, M. Wu, F. Albu, J. Yang, Frequency-Domain Filtered-x LMS Algorithms for Active Noise Control: A Review and New Insights, Applied Sciences 8 (2018). <https://doi.org/10.3390/app812313>.
- [24] F. Marafini, J. Brunetti, W. D'Ambrogio, L. Del Duca, A. Fregolent, P. Nataletti, Confronto tra algoritmi adattivi per l'identificazione di un sistema di controllo attivo delle vibrazioni, in: A.I. di Acustica (Ed.), Associazione Italiana Di Acustica - 51° Convegno Nazionale, Treviso, 2025.
- [25] M.G. Antonelli, J. Brunetti, W. D'Ambrogio, M. Di Manno, A. Fregolent, F. Marafini, Control of a 2 DoFs oscillating platform using pneumatic actuators, in: AIMETA (Ed.), XXVI Congresso AIMETA - Napoli 2024, Naples, 2024.
- [26] ISO5008:2002, Agricultural wheeled tractors and field machinery - Measurement of whole-body vibration of the operator, 2nd ed., International Organization for Standardization, Geneva, Switzerland, 2002.



Semestrale di diffusione scientifica e tecnica

EDITORIALE/EDITORIAL

Prospettive future: verso materiali acustici più sostenibili?

Shtrepi et al.

CONTRIBUTI INVITATI/INVITED CONTRIBUTIONS

Materiali fonoassorbenti bio-based e a base di scarti

Rubino et al.

Development and acoustic optimisation of sustainable fibrous materials

Santoni et al.

ARTICOLI SCIENTIFICI/SCIENTIFIC PAPERS

Enhancement of the acoustic design workflow through VR technology:

the case study of conference room in a historical building

Cetani et al.

NOTE TECNICHE/TECHNICAL NOTES

Protocollo sperimentale per la valutazione dell'intelligibilità del parlato nelle aule,
dotate di impianto elettroacustico, del patrimonio edilizio dell'Università di Bologna

Spinelli et al.

Un'applicazione di design acustico all'interno di ambienti scolastici

Asdrubali et al.

Acoustic characterisation of the noise emitted by a padel court

Piana et al.

VITA DELL'ASSOCIAZIONE/LIFE OF THE ASSOCIATION

Resoconto del 51° Convegno Nazionale AIA

Brambilla et al.

Resoconto del Workshop Internazionale AIA "Classroom noise: a research update"

Di Bella et al.

PROGETTI DI RICERCA IN ACUSTICA/AcouSTICS RESEARCH PROJECTS

BRiC INAIL 2022 ID-11: Sviluppo e sperimentazione di prototipi avanzati di dispositivi
per il controllo del rumore e delle vibrazioni a tutela della salute dei lavoratori

Mori et al.