

The logo consists of the letters 'AIA' in a bold, green, sans-serif font. The first 'A' is formed by two slanted bars meeting at the top, the 'I' is a vertical bar, and the second 'A' is formed by two slanted bars meeting at the top.

Rivista Italiana di Acustica

Semestrale di diffusione scientifica e tecnica

A series of overlapping, wavy lines in shades of green and yellow, creating a sense of motion and depth, resembling sound waves or a topographical map.

v. 48, n. 1/2024
gennaio-giugno

FrancoAngeli 

Direttore responsabile (Editor in Chief)

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

Responsabile di redazione (Editorial Manager)

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

Vice-responsabile di redazione (Deputy Editorial Manager)

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

Comitato di redazione (Editorial Committee)

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

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

Contatto e-mail della RIA

ria@acustica-aia.it

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

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

The journal also uses the invited paper procedure.



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

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

Per saperne di più:

http://www.francoangeli.it/come_pubblicare/pubblicare_19.asp

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.



Rivista
Italiana di
Acustica

Semestrale di diffusione scientifica e tecnica

v. 48, n. 1/2024
gennaio-giugno

FrancoAngeli 

Autorizzazione n. 17488/1978 del Tribunale di Roma –
Direttore responsabile: Eleonora Carletti – Semestrale
Poste Italiane Spa – Sped. in abb. post. – D.L. 353/2003
(conv. in L. 27/02/2004 n. 46) art. 1, comma 1, DCB Milano
Copyright © 2024 by FrancoAngeli s.r.l.

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

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

v. 48, I semestre 2024

Indice

Editoriale/Editorial

- 7 **Raccogliere il testimone guardando ai prossimi tre anni**
Patrizio Fausti

Articoli scientifici/Scientific papers

- 9 **Ottimizzazione delle prestazioni termoacustiche attraverso materiali porosi innovativi: modellazione, analisi e applicazioni**
Elio Di Giulio
- 19 **Machine learning per la separazione e la misura di sorgenti sonore coesistenti in spazi chiusi**
Domenico De Salvio
- 29 **Progettazione integrata con cambio di destinazione d'uso di un'aula universitaria per l'ottimizzazione del comfort acustico secondo i CAM**
Alessia Nora, Luca Barbaresi, Dario D'Orazio, Giulia Fratoni
- 39 **Association of psychoacoustic metrics with Italian words describing perceptual sound attributes**
Raffaele Mariconte, Giovanni Brambilla, Diego Annesi, Maurizio Diano, Fabio Lo Castro, Claudia Giliberti
- 49 **Design di pannelli fonoassorbenti sostenibili costituiti da macroalga bruna Sargassum**
Francesco Pompoli, Ilaria Dicarlantonio, Joselina Hernandez, Cristina Marescotti
- 61 **Normativa acustica ISO 22955:2021 e protocollo volontario WELL per gli uffici open plan: verifica dei criteri di progettazione acustica**
Virginia Tardini
- 71 **Coherence-based Beamforming algorithm for vehicle cabin acoustic comfort evaluation**
Francesco Uffreduzzi, Alessandro Aquili, Raj Mattias Mehta
- 81 **Effects of noise on the cognitive performance of primary school children**
Flavia Gheller, Gaia Spicciarelli, Lisa Battagliarin, Francesca Cappelletti, Antonino Di Bella, Piercarlo Romagnoni, Barbara Arfé

Note tecniche/Technical notes

- 91 **Riqualificazione acustica del Teatro 10 degli Studios di Cinecittà**
Anna Tarsitano
- 99 **Comparing acoustic models with measured noise sources in complex industrial plants – Ammonia production units**
Giuseppe Squadrone, Edoardo Brunazzo, Elena Bosa, Emanuela Greco, Antaryami Barikchandra, Andrea Sanchini

Vita dell'associazione/Life of the association

- 117 **Resoconto del Simposio Internazionale AIA-ICA “Ricerche avanzate per la gestione del rumore delle infrastrutture marittime”**

Antonino Di Bella

Progetti di ricerca in acustica/Acoustics research projects

- 121 **ActaReBuild – Acoustic and thermal retrofit of office building stock in EU**

Edoardo Alessio Piana, Monika Rychtarikova

- 125 **Resoconto dell'evento di lancio del progetto Interreg Marittimo Italia-Francia “CLASTER”**

Davide Borelli, Corrado Schenone

Raccogliere il testimone guardando ai prossimi tre anni

Patrizio Fausti*

Il 21 marzo 2024 si è insediato il nuovo Consiglio Direttivo dell'AIA che rimarrà in carica per il triennio 2024-2026. Ci tengo a ringraziare tutti i membri del nuovo CD che mi hanno dato la fiducia per il prestigioso incarico di Presidente AIA e che sono Francesco Asdrubali-Vice Presidente, Luca Barbaresi, Giovanni Brambilla, Andrea Cerniglia, Antonino Di Bella, Massimo Garai, Gaetano Licitra, Francesco Pompoli, Chiara Scrosati, Simone Secchi, Louena Shtrepi e Andrea Tombolato. Nel gruppo sono poi entrati Francesco Martellotta e Francesca Pedrielli rispettivamente con la nomina di Segretario e Tesoriere. Siamo una squadra di 15 consiglieri, supportati da una insostituibile Simona Senesi (segretaria amministrativa) e da tanti altri soci operativi.

Ho ereditato questo testimone, dopo circa 30 anni di attività organizzativa all'interno dell'AIA, soprattutto grazie ai tantissimi soci che mi hanno sostenuto con entusiasmo e che ringrazio con affetto.

Questo incarico arriva dopo un precedente triennio in cui si è instaurato un clima molto costruttivo e coinvolgente, aspetto fondamentale per una Associazione basata sull'impegno volontario dei membri del CD e di tutti gli altri soci operativi. Per questo ringrazio la Presidenza e il Consiglio Direttivo uscente.

L'Associazione si trova in un momento di grande visibilità, con una congiuntura che vede la presenza di soci AIA in ruoli apicali nelle più importanti associazioni internazionali di acustica. Questo è un riconoscimento importantissimo per il lavoro svolto negli ultimi anni sia dalle singole persone coinvolte che da tutta l'Associazione. Inoltre, il successo di Forum Acusticum e le altre attività svolte (International Year of Sound, Symposium on the Acoustics of Ancient Theatres, ecc.), hanno reso l'AIA molto credibile a livello internazionale e questa posizione va sostenuta in tutti i modi.

Anche a livello nazionale, il lavoro fatto dal CD uscente ha sicuramente rilanciato l'Associazione dopo il periodo critico della pandemia. Questo si è visto, oltre che dal successo degli eventi internazionali, anche su altri fronti, come l'organizzazione dei convegni nazionali di Matera, Ferrara e Taormina, il rilancio della Rivista Italiana di Acustica, il consolidamento e la funzionalità del sito web, il numero di soci ritornati a superare i 300, l'aumentato numero di aziende sostenitrici, i contatti e le collaborazioni con altre associazioni e tante altre iniziative.

Cosa fare e come impegnarci per creare le condizioni per dare continuità e consolidare questa tendenza di crescita?

Le linee programmatiche del nuovo Consiglio Direttivo prevedono di organizzare una serie di iniziative a carattere scientifico, formativo e professionale, mirate ad intercettare le esigenze di un numero sempre maggiore di soci, con uno sguardo sempre rivolto ai giovani acustici. Fondamentale è la diffusione della cultura acustica attraverso tutti i possibili canali come il convegno nazionale, i seminari, i simposi internazionali, i webinar, la comunicazione, la rivista, i contenuti del sito.

Il nuovo CD è già operativo, con il supporto di tanti altri soci, su più fronti. Stiamo predisponendo un programma di eventi ed altre iniziative, con incarichi e deleghe per specifiche attività, commissioni o gruppi di lavoro.

Nell'organizzazione di eventi, si cercherà di bilanciare la distribuzione delle iniziative sul territorio nazionale e di diversificare i temi onde coinvolgere di volta in volta ricercatori, professionisti, tecnici delle agenzie per la protezione dell'ambiente (Arpa) ed altri Enti Pubblici.

Nel momento in cui leggerete questo editoriale, saranno già state svolte varie attività programmate precedentemente come il simposio ICA tenuto a Padova il 22-04-2024 e soprattutto il 50° Convegno Nazionale di Taormina con numeri da record e notevole qualità scientifica ed organizzativa. A breve sapremo anche se la candidatura dell'AIA ad organizzare il convegno Inter-Noise 2027 a Padova avrà avuto successo.

Nel frattempo, sono state già programmate le sedi dei prossimi tre Convegni Annuali AIA, in particolare il 51° (2025) si svolgerà a Treviso, il 52° (2026) a Perugia e il 53° (2027) a Napoli/Caserta.

Inoltre, sono in fase di organizzazione una serie di seminari ed altre iniziative delle quali verrà data adeguata informazione sul sito e sugli altri canali di comunicazione. Si citano, come esempio, un evento sul rumore dei pubblici spettacoli a novembre 2024, nell'ambito della fiera Ambiente/Lavoro, un seminario sui materiali innovativi e sui metamateriali che si svolgerà a inizio 2025 a Bologna, anche con un ruolo operativo di giovani acustici, un seminario sul rumore degli impianti ad Ancona a settembre 2025 oltre ad altri eventi distribuiti sul territorio (Venezia, Milano, Roma, Bari).

Ci sono, inoltre, proposte per una scuola estiva, rubriche, gruppi di lavoro, eventi di internazionalizzazione.

Durante il Convegno Nazionale di Taormina si è svolto un incontro dei giovani acustici italiani promosso con l'obiettivo di verificare gli interessi e di promuovere iniziative per mettere a disposizione competenze, spazi di discussione, canali di informazione e sostegno economico all'organizzazione di attività autogestite. L'incontro ha visto una notevole partecipazione e sono emerse molteplici proposte che verranno

* Presidente Associazione Italiana di Acustica

DOI: 10.3280/ria1-2024oa17997

successivamente divulgate, ma soprattutto si è vista una notevole capacità propositiva e di coordinamento alla quale non possiamo che rispondere dando fiducia e autonomia.

Tra gli obiettivi della nostra associazione c'è anche quello di creare le condizioni affinché i nuovi soci rimangano nel tempo, perché interessati dalle iniziative e dagli eventi loro proposti.

Tra le altre, saranno promosse azioni volte ad intercettare le aspettative dei Tecnici Competenti in Acustica, raggiungibili sia direttamente sia attraverso i Collegi e Ordini Professionali, che potranno giovare di supporto tecnico-scientifico specialistico. Analogamente, andrà coinvolto e ulteriormente avvicinato il sistema delle Arpa e delle istituzioni.

Sarà necessario rendere ancora più qualificate ed efficaci le proposte dell'AIA, dagli eventi alla RIA, dal sito web agli altri servizi informatici; ogni socio deve avere la possibilità di accedere a benefici tangibili, di partecipare, di avanzare proposte.

Per mantenere la posizione attuale di visibilità internazionale, si stanno valutando una serie di proposte di organizzazione di eventi, da un Simposio Europeo di una giornata in affiancamento al Convegno Nazionale alla terza edizione del Simposio "The Acoustics of Ancient Theatres", considerando anche la delega che l'AIA ha avuto dalla EAA per gestire gli atti delle precedenti edizioni.

Per quanto riguarda i rapporti con le Istituzioni centrali, l'auspicio è quello di far riconoscere l'Associazione come interlocutore qualificato da consultare per l'elaborazione di documenti normativi e legislativi e per l'espressione di pareri.

In tema di comunicazione, l'invio ai soci di un bollettino elettronico con periodicità mensile o bimestrale potrebbe rivelarsi uno strumento particolarmente efficace nel rendere disponibili aggiornamenti sintetici sulle attività in programma e resoconti delle attività svolte, nel ricordare le scadenze per la partecipazione a bandi, per l'invio di articoli a convegni, con una tempistica più rapida rispetto a quella della RIA e con una modalità diversa rispetto a quella del sito web.

Il bollettino potrebbe anche essere utilizzato per raccogliere suggerimenti e proposte, per stimolare la partecipazione operativa dei soci, per raccogliere contributi diretti ed iniziative specifiche, anche con riferimento alle aree tematiche e ai gruppi di lavoro.

Come ulteriore aspetto, ma con importanza prioritaria, lavoreremo per alcune modifiche sulle procedure elettorali, con l'intento di coinvolgere i soci nella scelta del candidato Presidente e dei membri del Consiglio Direttivo fin dall'inizio delle procedure.

Per quanto riguarda la segreteria amministrativa, puntiamo a semplificare le procedure per permettere alla nostra instancabile Simona di gestire tutte le attività, specialmente in momenti di sovrapposizione di eventi.

Il nuovo Consiglio è pronto ad affrontare con entusiasmo il proprio mandato ed è aperto ai suggerimenti di tutti i Soci per fare dell'AIA un'Associazione sempre più autorevole, inclusiva, moderna e al servizio di tutte le sue diverse componenti.

Ottimizzazione delle prestazioni termoacustiche attraverso materiali porosi innovativi: modellazione, analisi e applicazioni

Elio Di Giulio¹

Dipartimento di Ingegneria Industriale,
Università di Napoli Federico II,
Piazzale Tecchio, 80, 80125 Napoli
elio.digiulio@unina.it

Ricevuto: 28/2/2024

Accettato: 20/5/2024

DOI: 10.3280/ria1-2024oa17368

ISSN: 2385-2615

L'impatto antropico e l'incremento della domanda energetica sollecitano l'adozione di tecnologie capaci di recuperare o trasformare fonti energetiche non sfruttate, come il calore residuo industriale o solare. La termoacustica, in questo panorama, si presenta come una soluzione sostenibile efficace, utilizzando fonti a bassa temperatura con fluidi ecocompatibili, ed è vantaggiosa per i bassi costi di gestione e manutenzione. Al centro di questa tecnologia vi è lo stack, un materiale poroso essenziale per le interazioni viscoso e termiche necessarie alla conversione dell'energia. Questa ricerca punta ad ottimizzare l'efficienza di motori e refrigeratori termoacustici mediante l'uso di stack non convenzionali come Array di Pin Tetragonali, Wire Mesh e Schiume a Membrana 3D. Attraverso un metodo numerico agli elementi finiti, si caratterizzano i parametri di trasporto delle microstrutture. I modelli previsionali del comportamento termoacustico sono stati poi validati con nuove tecniche di misurazione acustiche. Infine, un'analisi preliminare mostra il potenziale di questi materiali innovativi nel migliorare le prestazioni dei dispositivi termoacustici.

Parole chiave: termoacustica, stack, FEM, energie rinnovabili

Optimizing thermoacoustic performance through innovative porous materials: modeling, analysis, and applications

Human impact and the increasing energy demand urge the adoption of renewable technologies able to convert or recover unused energies, such as industrial or solar waste heat. In this context, thermoacoustics emerges as an effective sustainable solution, utilizing low-temperature sources with eco-friendly fluids, and is advantageous for its low operational and maintenance costs. The core of this technology is the stack, which is a porous material essential for the viscous and thermal interactions necessary for energy conversion. This research aims to optimize the efficiency of thermoacoustic engines and refrigerators by employing unconventional stacks such as Tetragonal Pin Arrays, Wire Mesh, and 3D Membrane Foams. Using a finite element numerical method, the transport parameters of the microstructures are characterized to develop predictive models of thermoacoustic behaviour, validated with new acoustic measurement techniques. Finally, a preliminary analysis reveals the potential of these innovative materials in enhancing the performance of thermoacoustic devices.

Keywords: thermoacoustics, stack, FEM, renewable energies

1 | Introduzione

La crescente attenzione verso le tecnologie sostenibili negli ultimi due decenni è motivata dall'aumento dell'impatto energetico delle attività umane e dalla necessità di ridurre l'impatto ambientale di esse. La tecnologia termoacustica si distingue in questo ambito per diverse ragioni: la sua capacità di sfruttare fonti di energia a basso grado exergetico, come l'energia solare o il calore di scarto industriale, l'uso di fluidi di lavoro ecocompatibili come aria o gas nobili, e il suo costo relativamente basso di implementazione e manutenzione. I dispositivi termoacustici, che includono refrigeratori termoacustici (o pompe di calore) che trasformano l'energia delle onde sonore in energia

termica per il raffreddamento (o di riscaldamento) e motori termoacustici che convertono il calore in lavoro utile, sono fondamentali per il loro processo di conversione energetica [1]. Questa tecnologia ha trovato applicazioni in vari campi, tra cui la produzione di elettricità, la refrigerazione domestica, il settore automobilistico, la criogenia e la gestione termica degli elettronici, mostrando la sua versatilità [2]. Tuttavia, affinché la tecnologia termoacustica possa diventare un'alternativa valida ai sistemi esistenti, sono necessari miglioramenti. L'efficienza dei motori e dei refrigeratori termoacustici dipende da un materiale poroso, la cui microstruttura è opportunamente progettata, noto come *stack* (o *rigeneratore*), che permette le necessarie interazioni viscoso e termiche tra il fluido e la superficie solida per la conversione energetica. Ottimizzare le prestazioni dei dispositivi richiede una comprensione più approfondita delle interazioni all'interno di questo nucleo poroso e l'identificazione della geometria ottimale per ogni specifica

¹ Vincitore ex-aequo del premio "Gino G. Sacerdote" edizione 2024.

applicazione. Analizzare i campi termo-fluidodinamici all'interno dello scheletro solido permeato da un fluido permette di caratterizzare il materiale costituente lo stack. Dato che il fluido all'interno del materiale poroso oscilla a causa di sollecitazione acustiche esterne, è necessario risolvere le equazioni di bilancio della meccanica dei fluidi nel regime armonico. Inoltre, è possibile fare riferimento alla vasta letteratura acustica per prevedere il comportamento viscoso e termico in base alla microstruttura del materiale. Una solida comprensione della termodinamica è inoltre fondamentale per quantificare gli scambi energetici e convertire il calore in potenza meccanica, e viceversa. Nel campo della termoacustica, l'uso di materiali con sezioni trasversali uniformi per gli stack è comune a causa della loro semplicità costruttiva e del loro comportamento dinamico in regime armonico descritto da funzioni analitiche. Tuttavia, la loro efficacia è limitata dalla semplicità stessa della geometria. Infatti, il trasferimento ottimale del calore tra gas e solido pregiudica anche le perdite viscoso, le quali rappresentano un aspetto cruciale per i fenomeni termoacustici.

Questa tesi mira ad ampliare le tipologie di stack impiegabili all'interno dei dispositivi termoacustici attraverso materiali, definiti non convenzionali in termoacustica, come i Pin Array Tetragonali, Wire Mesh e Schiume a Membrana 3D. La modellazione di tali materiali avviene sfruttando modelli semi-fenomenologici, derivati dalle teorie tradizionali utilizzate nell'ambito della previsione dell'assorbimento del suono [3]. Essi permettono di quantificare gli scambi viscosi e termici tra scheletro solido e fluido basandosi sulle caratteristiche della micro-geometria. Lo studio introduce, inoltre, due tecniche di misurazione innovative per superare le limitazioni metodologiche esistenti, specialmente a basse frequenze. Infine, viene fornito un criterio energetico per selezionare il materiale poroso più efficiente per la conversione dell'energia da calore ad energia acustica.

Nella sezione seguente, viene presentato un richiamo teorico dell'equazioni linearizzate di Navier-Stokes che descrivono l'interazione tra un flusso oscillante e lo scheletro solido di un materiale poroso. Successivamente, vengono riportati i modelli fenomenologici utilizzati nella modellazione dei mezzi porosi. Nella sezione 3, sono presentati metodi numerici agli elementi finiti atti alla valutazione dei parametri microstrutturali delle tre geometrie in esame: Pin array tetragonale, Wire mesh e schiume a membrana 3D. Inoltre, sono presentate le due tecniche sperimentali innovative, basate sull'ipotesi di parametri acustici concentrati. Il confronto tra i risultati sperimentali con tali tecniche innovative e i modelli sviluppati mediante simulazioni numeriche agli elementi finiti sono riportati nella sezione 4. Successivamente alla validazione dei modelli predittivi, è riportata un'analisi preliminare che evidenzia le proprietà di conversione termoacustica energetica dei materiali selezionati.

2 | Cenni teorici

Dal punto di vista teorico, il comportamento dinamico viscoso e termico di un materiale poroso generico sotto un flusso oscillante (con frequenza angolare $\omega=2\pi f$) può essere descritto

risolvendo le tre equazioni linearizzate di continuità, quantità di moto ed energia accoppiate con l'equazione di stato nel dominio della frequenza. Considerando valori medi costanti per le quantità termodinamiche (p_m, T_m); la pressione, la temperatura e la velocità delle particelle possono essere scritte come:

$$p = p_m + \Re[p_1 e^{i\omega t}] \quad (1)$$

$$T = T_m + \Re[T_1 e^{i\omega t}] \quad (2)$$

$$v = \Re[v_1 e^{i\omega t}] \quad (3)$$

Dove p_1 è la pressione acustica, T_1 la temperatura oscillante, u_1 la velocità acustica, e $i\omega t$ è il fattore temporale complesso, $i = -1$ è l'unità immaginaria e \Re rappresenta la parte reale di un numero complesso. L'assenza di gradiente di pressione medio determina una velocità media del mezzo $u_m = 0$. Le equazioni di quantità di moto ed energia permettono di descrivere gli effetti viscosi e termici su due scale separate come evidenziato dalla teoria dell'omogeneizzazione [3,4]:

$$i\omega\rho_m v_1 = -\nabla p_1 + \mu\nabla^2 v_1, \quad (4)$$

$$i\omega\rho_m c_p T_1 = i\omega p_1 + \kappa\nabla^2 T_1; \quad (5)$$

ρ_m è la densità di equilibrio dell'aria, μ , κ e c_p sono rispettivamente la viscosità dinamica, la conducibilità termica e il calore specifico a pressione costante dell'aria. Sotto l'ipotesi di pareti rigide e isoterme ($u_{1,parete} = 0$, $T_{1,parete} = 0$) dello scheletro solido del materiale, le soluzioni generali delle Eq. (4), (5) possono essere scritte in termini di due quantità dipendenti dalla frequenza introdotte da Zwikker e Kosten [5] per descrivere il comportamento acustico dei materiali porosi: la densità complessa $\tilde{\rho}(\omega)$ e il modulo di rigidità complesso $\tilde{K}(\omega)$.

In termoacustica, un gradiente di temperatura statico lungo il materiale, dT_m/dx , è ottenuto mediante l'impiego di uno scambiatore di calore caldo e uno freddo ai lati dello stesso. In questo caso i campi di temperatura attraverso il materiale sono scritti come

$$T(x) = T_m(x) + \Re[T_1 e^{i\omega t}]. \quad (6)$$

Tenendo conto dell'Eq. (6), l'Eq. (5) diventa

$$i\omega\rho_m c_p T_1 + \rho_m c_p \frac{dT_m}{dx} v_1 = i\omega p_1 + \kappa\nabla^2 T_1. \quad (7)$$

Va notato che il termine convettivo $v_1 \nabla T = v_1 \nabla T_m + v_1 \nabla T_1$ non è presente nell'Eq. (5) per l'ipotesi di assenza di gradienti di temperatura statica ∇T_m e per la trascurabilità del termine di secondo ordine $v_1 \nabla T_1$ di ordini di grandezza inferiori rispetto a quelli del primo. La densità complessa e il modulo di rigidità sono ovviamente proprietà intrinseche del materiale, che non cambiano quando viene applicato il gradiente termico. In termoacustica, le funzioni termoviscose f_v, f_k sono introdotte per descrivere il comportamento dei media porosi, strettamente legate alla suddetta densità complessa e modulo di rigidità, come mostrato da Dragonetti et al. [6]

$$\tilde{\rho} = \frac{\rho_m}{1 - f_v}, \quad (8)$$

$$\tilde{K} = \frac{\gamma p_m}{1 + (\gamma - 1)f_\kappa}. \quad (9)$$

Per materiali porosi con forme geometriche semplici, come sezione trasversale uniforme (piastre parallele, pori circolari), le funzioni termoviscose (o la densità complessa e il modulo di rigidità) sono espresse analiticamente dipendendo solo dai parametri geometrici (semi-distanza tra le piastre, raggio del poro circolare). Nel caso di mezzi porosi complessi come materiali fibrosi, granulari e schiume, il comportamento termoviscoso dinamico può essere valutato attraverso il modello semi-fenomenologico di Johnson-Champoux-Allard-Lafarge (JCAL). Questo modello richiede sei parametri di input (detti *parametri di trasporto*) che sono correlati a quantità geometriche della microstruttura rappresentante il materiale poroso. I sei parametri di trasporto del modello JCAL sono: la porosità ϕ , la lunghezza caratteristica termica Λ' e viscosa Λ , la tortuosità α_∞ , la permeabilità viscosa statica k_0 (equivalente alla resistività al flusso d'aria $\sigma = \mu/k_0$) e termica k_0' . Noti tali parametri, le proprietà visco-termiche dinamiche dipendenti dalla frequenza possono essere espresse combinando il modello JCAL con le relazioni di Dragonetti et al. Eq. (8) e (9), come segue [7]:

$$f_v = 1 - \frac{1}{\alpha_\infty \left(1 + \frac{\phi \mu}{i \omega \rho_m k_0 \alpha_\infty} \sqrt{1 + i \frac{4 \alpha_\infty^2 k_0^2 \rho_m \omega}{\phi^2 \mu \Lambda^2}} \right)}, \quad (10)$$

$$f_\kappa = 1 - \frac{1}{1 + \frac{\phi \kappa}{i k_0' c_p \omega \rho_m} \sqrt{1 + i \frac{4 k_0'^2 c_p \rho_m \omega}{\kappa \Lambda'^2 \phi^2}}}. \quad (11)$$

3 | Materiali e metodi

Come evidenziato nella sezione precedente, per prevedere il comportamento dinamico di un materiale poroso sottoposto a eccitazione da onda sonora, è necessario conoscere i suoi parametri di trasporto. Le moderne tecnologie di stampa additiva (AM) consentono di realizzare materiali innovativi e multifunzionali per diverse applicazioni. In particolare, le tecniche AM rendono possibile progettare un materiale con una microgeometria controllata in modo preciso [8]. Pertanto, dalla ripetizione spaziale di una cellula unitaria scelta, è possibile realizzare un intero campione. Ciò consente di indagare sulle proprietà della cellula unitaria per progettare il materiale complessivo e quindi selezionare la geometria adatta per una specifica applicazione. Negli ultimi anni, varie tecnologie AM sono già state utilizzate nella ricerca e nello sviluppo di una varietà di nuovi materiali acustici, come assorbitori acustici con interferenza distruttiva passiva, schiume a sfera cava,

materiali fibrosi stampati in 3D, reticoli micro-assorbenti del suono. Pertanto, la possibilità di avere un set di correlazioni tra microgeometria e parametri di trasporto aiuta nella progettazione di un materiale poroso con proprietà acustiche specificate.

L'obiettivo di questo lavoro è stato quello di realizzare stack termoacustici mediante fabbricazione additiva, una volta trovata la cellula unitaria in grado di massimizzare la conversione dell'energia termoacustica attraverso i modelli sviluppati. Di seguito viene riportata la modellazione numerica eseguita mediante metodo agli elementi finiti (FEM) al fine di valutare i parametri di trasporto per tre diverse tipologie di materiali: Pin Array tetragonali, Wire Mesh e Schiume a membrana 3D. Successivamente, sono state sviluppate due tecniche acustiche basate sull'ipotesi di parametri concentrati che permettono di misurare sperimentalmente la densità complessa ed il modulo di rigidità complesso di un materiale in range di bassa frequenza (sotto i 200 Hz).

3.1 | Simulazioni agli elementi finiti

Le equazioni di continuità, momento ed energia linearizzate permettono di risolvere i campi termo-fluidodinamici all'interno dei materiali porosi in condizioni di flusso oscillante. La teoria dell'omogeneizzazione evidenzia che, quando esiste una *separazione di scala*, ovvero la lunghezza d'onda dello stimolo è molto più grande della microscala del materiale, la descrizione gli effetti viscosi e termici può essere disaccoppiata. In particolare, grazie al modello JCAL, la conoscenza del comportamento dinamico complesso del materiale è funzione di soli sei parametri di trasporto, che possono essere valutati mediante la risoluzione di tre *boundary value problems*. La fisica di base corrispondente alle diverse simulazioni è la seguente [9].

- Risolvendo il flusso di Stokes, si può valutare la permeabilità viscosa statica k_0 della struttura porosa in esame. Per flussi a basso numero di Reynolds, corrispondenti a un fluido newtoniano incomprimibile, risulta

$$k_0 = \phi \frac{\langle u \rangle}{\Delta p / D_t}, \quad (12)$$

dove $\langle u \rangle$ è la velocità media sulla fase fluida, Δp è la differenza di pressione applicata e D_t è la dimensione della cella unitaria.

- La risoluzione del problema di Laplace consente di valutare i parametri ad alta frequenza derivati nel caso di un fluido ideale inviscido: la tortuosità α_∞ e la lunghezza caratteristica viscosa Λ . Secondo l'analogia della conduzione elettrica, una volta applicata una differenza di potenziale elettrico ΔV attraverso la cella unitaria in cui la fase solida è isolante e il fluido è conduttivo, i parametri possono essere stimati come

$$\alpha_\infty = \frac{\langle E \cdot E \rangle_{V_f}}{\langle E \rangle_{V_s} \cdot \langle E \rangle_{V_s}}, \quad (13)$$

$$\Lambda = \frac{2 \int_{V_f} E \cdot E dV_f}{\int_{A_{fs}} E \cdot E dA_{fs}}; \quad (14)$$

dove V_f e A_{fs} indicano, rispettivamente, il volume fluido e la superficie di interfaccia solido-fluido, E è il campo elettrico locale derivante da un potenziale scalare, il potenziale scalare essendo a sua volta soluzione del problema di Laplace.

- Dalla soluzione del problema di Poisson all'interno del volume fluido della microstruttura del mezzo poroso è possibile valutare la permeabilità termica statica k'_0 come:

$$k'_0 = \varphi \langle \tau \rangle_{V_f} \quad (15)$$

dove τ è il campo di temperatura scalato che risolve l'equazione di Poisson all'interno della cella unitaria:

$$\nabla^2 \tau = -1. \quad (16)$$

Nella risoluzione di questi tre problemi alla microgeometria, alle superfici laterali della cella unitaria sono applicate condizioni al contorno periodiche, mentre isoterma e no-slip sono le condizioni termomeccaniche imposte all'interfaccia solido fluido. In Fig. 1 sono riportati degli esempi di campi di velocità, potenziale elettrico e temperatura per una cella unitaria di Pin Array Tetragonali.

Infine, porosità φ e lunghezza caratteristica termica Λ' sono parametri geometrici che possono essere valutati direttamente dalla geometria cellula unitaria:

$$\varphi = \frac{V_f}{V_{total}}, \quad (17)$$

$$\Lambda' = \frac{2 \int_{V_f} dV_f}{\int_{A_{fs}} dA_{fs}}, \quad (18)$$

con V_{total} il volume totale della cellula unitaria includendo entrambe le frazioni solide e fluide.

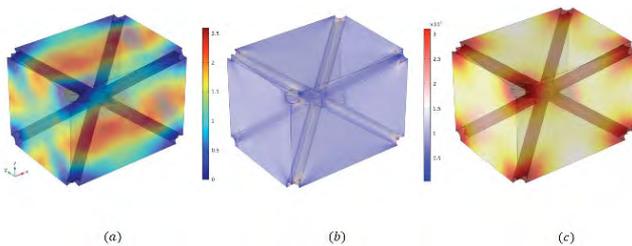


Fig. 1 – Un esempio dei tre campi di velocità, potenziale elettrico e temperatura per una cella unitaria a forma di Pin array tetragonale di pin. È possibile notare l'aumento della velocità nelle sezioni laterali del flusso di passaggio (a), la periodicità del campo elettrico sui confini laterali (b) e la condizione di parete isoterma imposta sulle interfacce solido-fluido (c)

An example of the three fields of velocity, electric potential, and temperature for a unit cell in the shape of a tetragonal array of pins. It is possible to notice the increase in velocity in the lateral sections of the flow passage (a), the periodicity of the electric field at the lateral boundaries (b), and the isothermal wall condition imposed on the solid-fluid interfaces (c)

3.2 | Tecniche sperimentali acustiche a parametri concentrati

Per caratterizzare le funzioni di risposta viscosa f_v e termiche f_k dei campioni da testare, è stata sviluppata una tecnica innovativa al fine di misurare con accuratezza il comportamento del mezzo poroso in bassa frequenza, dove generalmente sono impiegati a lavorare gli stack. La tecnica si basa sull'approccio dei parametri concentrati [10,11]. Le Figure 2 e 3 mostrano il setup sperimentale utilizzato per caratterizzare rispettivamente la funzione dinamica f_v viscosa e la funzione dinamica f_k termica. La procedura di misurazione si basa su due acquisizioni distinte per ciascuna funzione di risposta: una misurazione in cui il campione riempie la cavità anteriore la sorgente acustica (misura detta *full*, Figg. 2 e 3 sinistra) e una misurazione senza il campione (detta *empty*, Figg. 2 e 3 destra). I test “vuoti” corrispondono a una correzione che tiene conto del supporto rigido imperfetto o dell'effetto dell'impedenza di radiazione con la terminazione aperta. Sfruttando diverse condizioni al contorno (terminazione aperta o supporto rigido) e misurando il campo di pressione acustica sia nella cavità inferiore p_{dw} che nella cavità superiore p_{up} , è possibile fornire una misura sperimentale della densità di massa dinamica $\tilde{\rho}$ e del modulo elastico dinamico \tilde{K} dei campioni prodotti, come segue:

$$\tilde{\rho} = \varphi \left(\rho_m + \frac{\gamma p_m A}{\omega^2 V_{dw} (d - x_{mic})} \left[\left(\frac{p_{up}}{p_{dw}} \right)_{full} - \left(\frac{p_{up}}{p_{dw}} \right)_{empty} \right] \right), \quad (18)$$

$$\tilde{K} = \frac{\gamma p_m}{\frac{1}{\varphi} - \frac{V_{dw}}{V_{up} \varphi} \left[\left(\frac{p_{up}}{p_{dw}} \right)_{full} - \left(\frac{p_{up}}{p_{dw}} \right)_{empty} \right]}, \quad (19)$$

dove d e A sono rispettivamente lo spessore e l'area trasversale del campione, x_{mic} è la posizione del microfono (rilevante per la misurazione della densità complessa); V_{dw} e V_{up} sono il volume della cavità inferiore e superiore. Questo metodo è limitato all'intervallo di frequenza bassa e deve soddisfare $|\tilde{k}_n d| < 0.5$ dove $\tilde{k}_n = \omega \sqrt{\tilde{\rho} / \tilde{K}}$ è il numero d'onda complesso che si propaga all'interno del campione. Combinando i risultati sperimentali dalle elaborazioni delle Eqs. (19) e (20)

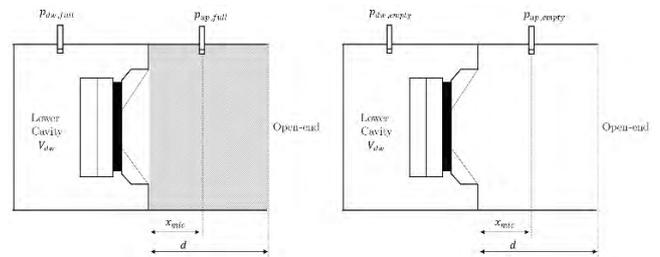


Fig. 2 – Illustrazione schematica della configurazione a parametri concentrati acustici utilizzata per misurare la densità complessa: configurazione completa (sinistra), configurazione vuota (destra)

Schematic illustration of the lumped parameter acoustic configuration used to measure the complex density: complete configuration (left), empty configuration (right)

e utilizzando le relazioni di Dragonetti et al., Eqs. (8) e (9), è possibile ottenere una derivazione sperimentale delle funzioni termoviscose f_v e f_k .

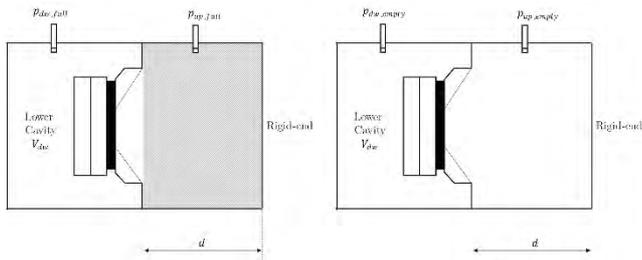


Fig. 3 – Illustrazione schematica della configurazione a parametri concentrati acustici utilizzata per misurare il modulo di rigidezza complesso: configurazione completa (sinistra), configurazione vuota (destra)

Schematic illustration of the lumped parameter acoustic configuration used to measure the complex stiffness modulus: complete configuration (left), empty configuration (right)

4 | Risultati e discussione

Le simulazioni numeriche sono state effettuate variando i parametri geometrici delle tre strutture in esame. Questo ha permesso di costruire delle correlazioni fenomenologiche per la previsione dei parametri di trasporto dipendenti dalle caratteristiche geometriche di ciascun materiale. In questa sezione, vengono riportati i confronti tra gli andamenti teorici predetti mediante il modello di JCAL e i risultati sperimentali ottenuti mediante le tecniche acustiche innovative introdotte nella precedente sezione.

4.1 | Pin Array Tetragonali

Per questi materiali, la cella elementare può essere immaginata come una disposizione di cilindri (con diametro $2r_p$) intersecanti che costituiscono le diagonali di un tetragono con base quadrata [12], come riportato in Fig. 4. In base all'altezza o alla dimensione della base del tetragono (L_x , L_z), le aste possono avere diverse orientazioni rispetto alla direzione di propagazione delle onde sonore. Questo studio è motivato dalle notevoli potenzialità termoacustiche di questi materiali, come anche mostrato in studi precedenti. Materiali porosi con array di pin paralleli, sono stati introdotti da Swift e Keolian [13], notando un aumento dell'efficienza rispetto ad altri stack tradizionali (pori circolari e piastre parallele). La migliore performance termoacustica attesa per stack con elementi cilindrici è correlata al fatto che, per fluidi operativi con numero di Prandtl $P_r < 1$, la convessità della superficie solida porta ad un rapporto maggiore tra area termoacustica e area viscosa rispetto ad altri stack dotati di geometrie concave interne.

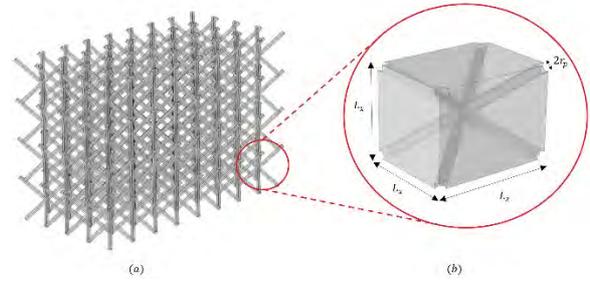


Fig. 4 – Pin Array Tetragonali (a), volume della cella unitaria (b)
Tetragonal Pin Array (a), volume of the unit cell (b)

Basandosi sul teorema di adimensionalizzazione di Buckingham, ciascun parametro di trasporto adimensionale può essere espresso come funzione di due grandezze adimensionali $\overline{L}_x = L_x/r_p$ e $\overline{L}_z = L_z/r_p$. Le simulazioni FEM sono state eseguite su 324 diverse celle reticolari, ottenute variando \overline{L}_x e \overline{L}_z in un intervallo di valori da 8 a 25 e fissando $r_p = 90 \mu\text{m}$. Una volta ottenuti i parametri per ciascuna cella del grande insieme di celle simulate con FEM, è stata implementata una procedura di adattamento per trovare i coefficienti dei polinomi del secondo ordine per ciascun parametro (R-quadrato corretto pari a 0,99 in ciascun caso).

$$\left[\varphi, \alpha_\infty, \frac{\Lambda'}{r_p}, \frac{\Lambda}{r_p}, \frac{k_0}{r_p^2}, \frac{k'_0}{r_p^2} \right] = A_1 + A_2 \overline{L}_x + A_3 \overline{L}_z + A_4 \overline{L}_x^2 + A_5 \overline{L}_x \overline{L}_z + A_6 \overline{L}_z^2.$$

Dove le costanti $A_{i=1-6}$ sono riportate nella Tab. 1.

Tab. 1 – Costanti del modello per valutare i parametri di trasporto adimensionali per i Pin Array Tetragonali

Model constants to evaluate the dimensionless transport parameters for Tetragonal Pin Arrays

	A_1	A_2	A_3	A_4	A_5	A_6
φ	0.4787	0.03023	0.01335	-0.0006	-0.0001627	-0.0002149
Λ'/r_p	-0.9985	0.1024	0.08976	-0.001162	0.04551	-0.01226
Λ/r_p	0.3271	0.1772	-0.1711	2.728e-5	0.01215	0.005476
α_∞	1.373	-0.02005	-0.01669	0.0003822	0.0002203	0.0002946
k_0/r_p^2	1.31	-0.1572	-0.2395	0.02229	0.004712	0.007991
k'_0/r_p^2	2.804	-0.5023	-0.2478	0.01621	0.05014	-0.003899

Il provino realizzato mediante tecnologia di stampa additiva in polvere metallica, riportato insieme ai risultati in Fig. 5, è caratterizzato i seguenti parametri geometrici: $r_p = 90 \mu\text{m}$, $\overline{L}_x = 13.9$, $\overline{L}_z = 16.7$. Dal confronto teorico, parametri di trasporto da Tab. 1 con il modello di JCAL, Eq (10) e (11), e sperimentale vi è un ottimo accordo che permette di validare il modello previsionale per questa tipologia di materiale.

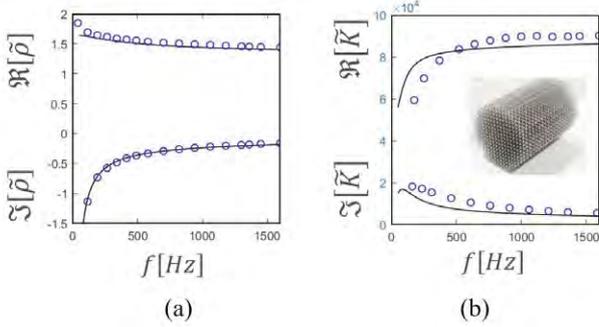


Fig. 5 – Confronto teorico-sperimentale della (a) densità complessa e (b) del modulo di Rigidezza complesso del provino di Pin Array Tetragonale
Comparison of theoretical-experimental (a) complex density and (b) complex stiffness modulus of the tetragonal pin array specimen

4.2 | Wire Mesh

Le Wire Mesh (o schermi sovrapposti) sono ampiamente utilizzate perché sono facili da realizzare rispetto ad altri stack classici a sezione trasversale uniforme (piastre parallele, pori circolari) e offrono un basso rapporto tra il volume del fluido e l'area dell'interfaccia fluido-solido. Tuttavia, manca un modello accurato nella letteratura per descrivere le proprietà viscoso e termiche di questo tipo di stack. Le Wire Mesh sono praticamente ottenute mediante la sovrapposizione di diversi strati di griglie disposte in modo casuale, Fig. 6. Le simulazioni sono state condotte su 150 diverse celle unitarie ottenute variando il raggio del cilindro r_p da 0.13 a 0.78 mm e la distanza tra essi d_s da 1 a 3.5 mm. Si noti che questo intervallo di variazione dei parametri r_p e d_s include le dimensioni tipiche delle reti metalliche commerciali. Attraverso le Eqs. (12)-(15), (17) e (18), i parametri di trasporto sono stati valutati per ciascuna cella unitaria. Successivamente, la struttura generale delle correlazioni proposte tra i descrittori geometrici e i parametri di trasporto è stata ispirata a quelle fornite da Luu et al. [14]. Questo è stato possibile grazie alla somiglianza tra le Wire Mesh ed una struttura fibrosa. Le correlazioni proposte sono riassunte nella Tab. II, insieme ad alcuni indicatori statistici che valutano la bontà dell'adattamento dell'interpolazione [7].

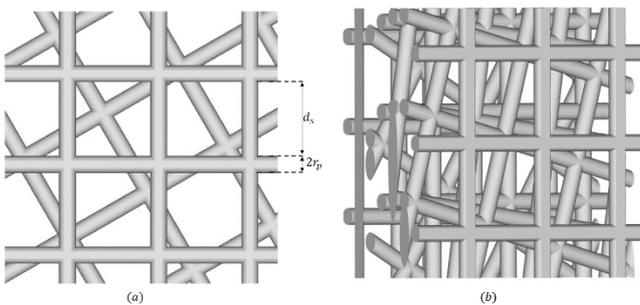


Fig. 6 – (a) Rappresentazione schematica dei parametri costituenti le Wire Mesh, (b) Volume rappresentativo della cella unitaria

(a) Schematic representation of the parameters constituting the Wire Mesh. (b) Representative volume of the unit cell

Tab. 2 – Correlazioni per i parametri di trasporto per le Wire Mesh. SSE indica l'errore quadratico medio
Correlations for the transport parameters for the Wire Mesh. SSE denotes the mean squared error

Correlazione	SSE
$\varphi = 1 - 0.7099 \frac{\pi r_p}{p + 2r_p}$	0.0493
$\frac{\Lambda'}{r_p} = \frac{\varphi}{1 - \varphi - 0.005133}$	10.38
$\frac{\Lambda}{r_p} = 0.4825 \frac{\varphi}{1 - \varphi + 0.04564}$	1.284
$\alpha_\infty = \left(\frac{1}{\varphi}\right)^{0.5807}$	0.1303
$\log_{10} \left(\frac{k_0}{r_p^2}\right) = 0.7765 \log_{10} \left(\frac{\varphi^3}{(1 - \varphi)^2}\right) - 0.9855$	0.0605
$\log_{10} \left(\frac{k'_0}{r_p^2}\right) = 0.7258 \log_{10} \left(\frac{\varphi^3}{(1 - \varphi + 0.3054)^2}\right) - 0.6741$	0.1802

Di seguito, i risultati sperimentali sono riportati in termini di funzioni termo-viscosa, f_v e f_κ . La Fig. 7 mostra un confronto tra i risultati sperimentali ottenuti attraverso la tecnica a parametri concentrati e le previsioni che combinano il modello JCAL, Eqs. (10) e (11) con le correlazioni dei parametri di trasporto proposte (Tab. II). Il provino testato è una Mesh con i seguenti dati geometrici: $r_p = 0.30$ mm, $d_s = 2.30$ mm. I grafici sono riportati in termini delle parti reale e immaginaria delle funzioni termo-viscoso. I dati sperimentali sono in buon accordo con le previsioni teoriche sia per il comportamento viscoso che termico. Le differenze più significative tra i dati sperimentali e il modello sono state osservate per la parte immaginaria della funzione di risposta termica, f_κ (sotto i 50 Hz). Questo è principalmente dovuto alle difficoltà intrinseche alla tecnica di

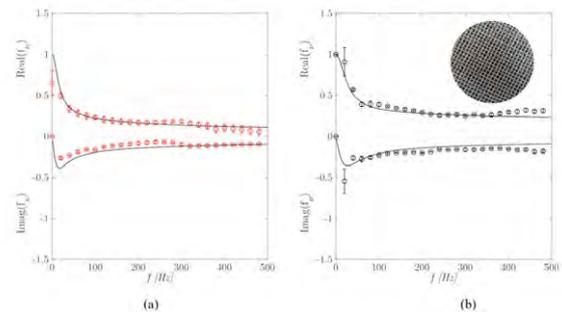


Fig. 7 – Confronto tra i risultati sperimentali (punti circolari), con media e deviazione standard, e l'approccio di modellazione (linea continua); parte reale e immaginaria della (a) funzione termica dinamica e (b) funzione viscosa dinamica in funzione della frequenza

Comparison between experimental results (circular points) with mean and standard deviation, and the modeling approach (solid line); real and imaginary parts of (a) dynamic thermal function and (b) dynamic viscous function as a function of frequency

misurazione, che richiede un allestimento perfettamente sigillato per evitare perdite d'aria e una sorgente acustica in grado di supportare il volume di aderenza anteriore e posteriore.

4.3 | Schiume a membrana 3D

Le schiume sono una dispersione di gas in una matrice liquida o solida. La loro struttura è composta da membrane, legamenti e vertici. Le schiume che presentano pori completamente interconnessi vengono definite come “*completamente aperta*”. In questa situazione, la connessione tra le celle raggiunge il massimo livello. Se alcuni dei pori sono chiusi o parzialmente chiusi da membrane sottili, la schiuma viene denominata “*parzialmente reticolata*”. I film solidi o le membrane nei reali mezzi porosi come poliuretano o schiume metalliche rappresentano solo una piccola frazione del materiale nella massa complessiva del mezzo poroso. Tuttavia, il loro ruolo potrebbe essere di primaria importanza per la comprensione delle proprietà di trasporto e acustiche di queste schiume.

L'obiettivo di questo modello è prevedere le proprietà dinamiche delle schiume a membrana realizzate con la tecnica di stampa additiva. Ciò significa che vengono considerate geometrie ordinate monodisperse, denominate schiume a membrana 3D. Le principali differenze tra la cellula unitaria scelta e la classica cellula tetraedrica reticolata sono l'assenza di legamenti per collegare le membrane e lo spessore non trascurabile delle membrane, come mostrato nella Fig. 8a. Pertanto, i tre descrittori geometrici che caratterizzano la cellula unitaria sono la dimensione della cellula unitaria D_t , lo spessore della membrana, ξ e il rapporto di apertura della membrana definito come $t_0\sqrt{A_{open}/A_{membrana}}$ (rapporto tra l'area verde chiaro e l'area rossa nella Fig. 8.a).

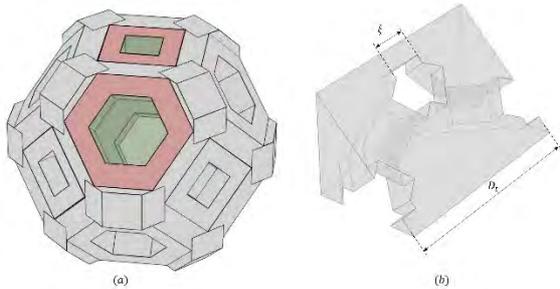


Fig. 8 – (a) Cella unitaria della schiuma a membrana 3D, (b) volume unitario utilizzato per le simulazioni numeriche sfruttando la simmetria della geometria
(a) Unit cell of the 3D membrane foam, (b) unit volume used for numerical simulations leveraging the symmetry of the geometry

Approfondendo della simmetria della cella unitaria, viene presa in considerazione solo un'ottava parte come dominio fluido per ridurre i costi computazionali (Fig. 8b). Il limite degli intervalli dei parametri geometrici è espresso attraverso due quantità adimensionali come $0.2 < t_0 < 0.7$ e $0.003 < \xi/D_t < 0.2$. Inoltre, per evitare punti di singolarità in cui non vi è convergenza e stabilità della soluzione numerica, vengono adottati bordi arrotondati delle membrane.

La struttura delle correlazioni per la porosità φ e la lunghezza caratteristica termica Λ' come funzioni dei descrittori geometrici è derivata analiticamente, mentre per i parametri inerziali Λ e α_∞ le correlazioni sono ispirate a Doutres et al. [15] e per la permeabilità viscosa statica da Langlois et al. [16]. Le correlazioni proposte sono riportate nella Tab. 3.

Tab. 3 – Correlazione dei parametri di trasporto per schiume a membrana 3D
Correlation of transport parameters for 3D membrane foams

Correlazione	SSE
$\varphi = 1 - \frac{9}{16}(1 + 2\sqrt{3})(1 - t_0^2)\frac{\xi}{D_t}$	0.01649
$\frac{\Lambda'}{D_t} = \frac{2\varphi}{6(1 - t_0^2) + \frac{\xi}{D_t}}$	0.03528
$\frac{\Lambda'}{\Lambda} = (\varphi)^{0.2468} \left(\frac{1}{t_0}\right)^{0.9609}$	3.254
$\alpha_\infty = 0.6668(\varphi)^{-0.4703} \left(\frac{1}{t_0}\right)^{0.9678}$	1.984
$\frac{k_0}{D_t^2} = 0.03249\varphi t_0^3$	2.334e-6
$\frac{k'_0}{D_t^2} = 0.04023\varphi^{3.265}t_0^{2.494} + 0.01097\left(\frac{\xi}{D_t}\right)^{-0.07873}$	4.506e-5

Il confronto teorico sperimentale è stato effettuato per un provino realizzato in stampa additiva (PLA), le cui dimensioni caratteristiche della microstruttura sono $D_t = 8$ mm, $\xi = 0.8$ mm, $t_0 = 0.4$. In Fig. 9, sono riportati i confronti teorico-sperimentali in termini di parte reale e immaginaria delle permeabilità viscoso $\tilde{k} = \varphi \frac{\delta_v^2}{2i}(1 - f_v)$ e termica $\tilde{k}' = \varphi \frac{\delta_\kappa^2}{2i}(1 - f_\kappa)$, dove $\delta_v = \sqrt{2\mu/\omega\rho_0}$ e $\delta_\kappa = \sqrt{2\kappa/\omega\rho_0 c_p}$ sono gli spessori di strato limite viscoso e termico rispettivamente. Da tali figure è possibile evidenziare un ottimo accordo tra i dati del modello e quelli misurati.

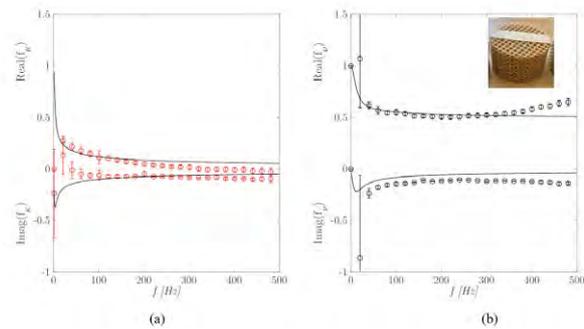


Fig. 9 – Confronto tra i risultati sperimentali (punti circolari), con media e deviazione standard, e l'approccio di modellazione (linea continua); parte reale e immaginaria della (a) permeabilità termica dinamica e (b) permeabilità viscosa dinamica in funzione della frequenza

Comparison between experimental results (circular points) with mean and standard deviation, and the modeling approach (solid line); real and imaginary parts of (a) dynamic thermal permeability and (b) dynamic viscous permeability as a function of frequency

4.4 | Confronto delle prestazioni termoacustiche

Il confronto delle prestazioni dei tre stack non convenzionali (Wire Mesh, Pin Array Tetragonali e Schiume a membrana 3D) è stato effettuato dal punto di vista numerico su un motore termoacustico ad onda stazionaria. Lo schema utilizzato per le simulazioni è riportato nella Fig. 10. Le simulazioni sono state effettuate implementando le equazioni del software DELTAEC [17] in ambiente MATLAB avendo così la possibilità di inserire la modellazione degli stack innovativi caratterizzati. Sono stati effettuati degli sweep bidimensionali per i parametri geometrici di ciascuno stack, in particolare: per Wire Mesh, $0.13\text{ mm} < r_p < 0.78\text{ mm}$ e $1\text{ mm} < d_s < 3.5\text{ mm}$; per i Pin Array Tetragonali, $r_p = 0.09\text{ mm}$, $8 < L_x < 24$ e $8 < L_z < 24$; per le schiume a membrana 3D, $D_t = 1\text{ mm}$, $0.1 < \xi/Dt < 0.2$ e $0.2 < t0 < 0.7$. Le condizioni al contorno applicate sono riportate nella Tab. 4.

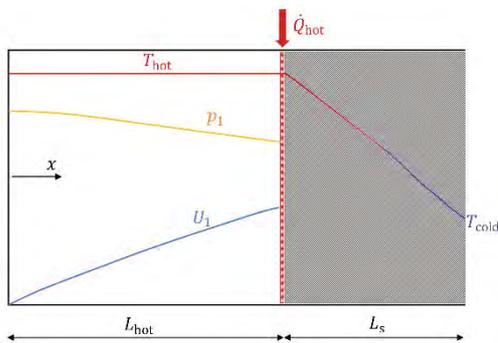


Fig. 10 – Rappresentazione della sezione del motore termoacustico simulato

Representation of the simulated section of the thermoacoustic engine

Tab. 4 – Condizioni operative del motore termoacustico simulato
Operating conditions of the simulated thermoacoustic engine

Parametro	Valore
L_{hot}	0.85 m
L_s	0.05 m
p_{run}	5.000 Pa
T_{hot}	593 K
T_{cold}	333 K
Q_{hot}	100 W

In Fig. 11, *surface-plot* consentono di individuare l'insieme dei parametri geometrici in cui lo stack è in grado di convertire una quantità positiva di energia per unità di tempo

$$\dot{E}_{gain} = \int \frac{1}{2} \Re[g \tilde{p}_1 u_1] dz > 0$$

dove il parametro g è il parametro di guadagno termoacustico funzione del comportamento del materiale (f_v, f_x) e del gradiente termico applicato dagli scambiatori di calore (dT_m/dx).

Se è soddisfatta la condizione per cui $\dot{E}_{gain} > 0$, allora avverrà la conversione di calore in energia meccanica. In caso contrario, quando non avverrà alcuna conversione in energia meccanica e si verificheranno solo processi dissipativi. Nel caso di Pin Array Tetragonali e Wire Mesh, è possibile riscontrare la presenza sia di condizioni favorevoli alla conversione energetica ($\dot{E}_{gain} > 0$) che puramente dissipative, come da Fig. 11a e 11b. Nel caso dei Pin Array Tetragonali, per valori molto bassi di L_z e valori elevati di L_x per i pin array, e per valori molto bassi di r_p e valori elevati di d_s delle Wire Mesh, la conversione di calore in energia meccanica è favorita. Le regioni in cui $\dot{E}_{gain} = 0$ sono caratterizzate da effetti bilanciati tra la conversione di energia energetica e le perdite. Nel caso delle Schiume a membrana 3D (Fig. 11c), si può notare che, per gli stessi parametri operativi (Tab. 6.2), non esistono regioni per cui $\dot{E}_{gain} < 0$. Questo indica dunque la presenza di sole condizioni favorevoli alla conversione energetica. Tuttavia, per poter osservare il fenomeno termoacustico, la quantità di energia convertita positivamente (guadagno) per unità di tempo \dot{E}_{gain} deve superare la quantità di energia dissipata per interazione viscosa e termica tra il fluido e lo scheletro solido dello stack \dot{E}_{diss} . Pertanto, il fenomeno termoacustico avverrà quando la somma dell'energia guadagnata e dell'energia dissipata per unità di tempo $\dot{E}_{tot} = \dot{E}_{gain} + \dot{E}_{diss} > 0$. Queste perdite di energia \dot{E}_{diss} per unità di tempo sono riportate per ciascun materiale in Fig. 12. Si può evidenziare l'alta quantità di dissipazione fornita dalle Schiume a membrana, che è di due ordini di grandezza maggiore rispetto a quella fornita dalle altre tipologie di stack. La Fig. 13, dunque, mostra il reale potenziale di innesco del processo termoacustico di questi tipi di stack all'interno di un dispositivo che funziona con queste condizioni operative. Si può dunque osservare che per le Wire Mesh e i Pin Array Tetragonali forniscono diverse combinazioni per cui $\dot{E}_{tot} > 0$, in particolare, per valori molto bassi di L_z e valori elevati di L_x per i pin array, e per valori molto bassi di r_p e valori elevati di d_s per le Wire Mesh. Infine, è possibile concludere che i Pin Array Tetragonali per tali condizioni operative possono essere preferiti rispetto al Wire Mesh, grazie ad una più ampia regione che permette la conversione energetica favorevole e dunque l'innesco del processo termoacustico.

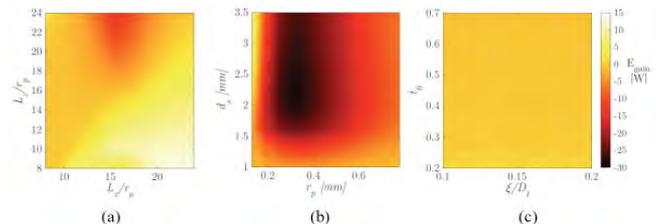


Fig. 11 – Le prestazioni, in termini di quantità positiva di energia per unità di tempo \dot{E}_{gain} , di un motore termoacustico che utilizza uno stack: (a) a pin array tetragonali, (b) wire mesh, (c) schiume a membrana 3D

The performance, in terms of positive energy output per unit time \dot{E}_{gain} , of a thermoacoustic engine using: (a) tetragonal pin array, (b) wire mesh, (c) 3D membrane foams

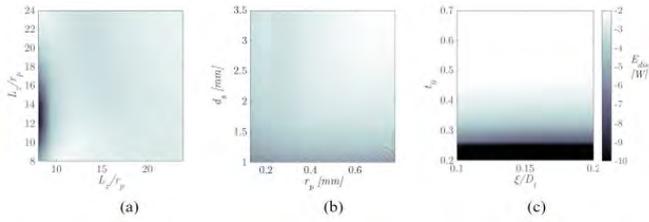


Fig. 12 – L'energia dissipata \dot{E}_{diss} in un motore termoacustico all'interno di uno stack: (a) a pin array tetragonali, (b) wire mesh, (c) schiume a membrana 3D

The dissipated energy \dot{E}_{diss} in a thermoacoustic engine within a stack: (a) tetragonal pin array, (b) wire mesh, (c) 3D membrane foams

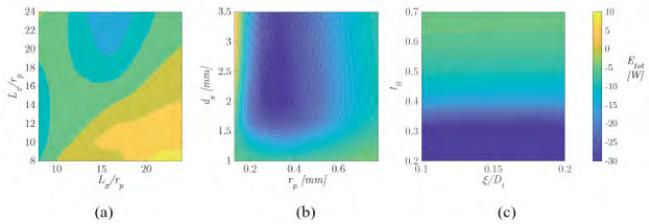


Fig. 13 – L'energia totale convertita \dot{E}_{tot} nel processo termoacustico da uno stack: (a) a pin array tetragonali, (b) wire mesh, (c) schiume a membrana 3D

The total converted energy \dot{E}_{tot} in the thermoacoustic process from a stack: (a) tetragonal pin array, (b) wire mesh, (c) 3D membrane foams

5 | Conclusioni

In questo articolo è stato dunque analizzato il contesto della termoacustica e la sua rilevanza nel panorama delle tecnologie sostenibili. Sono stati esaminati i vantaggi e le potenzialità di questa tecnologia, focalizzandosi sul ruolo cruciale degli stack porosi nel processo di conversione energetica. Si è evidenziata la necessità di migliorare l'efficienza dei dispositivi termoacustici attraverso l'ottimizzazione dei materiali degli stack. Infatti, grazie alla diffusione della tecnologia di fabbricazione additiva, è possibile realizzare materiali porosi con geometria controllata in modo preciso. Pertanto, un modello predittivo rappresenta uno strumento potente nella fase di progettazione sia delle applicazioni di assorbimento acustico sia delle applicazioni termoacustiche. Nel primo caso, l'obiettivo è massimizzare la dissipazione di energia dovuta alle perdite viscoso e termiche quando il suono si propaga nello scheletro solido. Nel secondo caso, invece, l'obiettivo è trovare il bilanciamento ottimale tra resistenza viscosa ed effetti di rilassamento termico al fine di innescare il fenomeno termoacustico, ossia la conversione di energia da termica a meccanica (e viceversa). A questo scopo, sono stati esplorati materiali non convenzionali come Pin Array Tetragonali, Wire Mesh e Schiume a Membrana 3D. Sono stati sviluppati modelli predittivi per correlare i parametri di trasporto con le dimensioni geometriche, per tre diverse tipologie di materiali: Pin Array Tetragonali, Rete Metallica e Schiume a Membrana 3D. Simulazioni basate sui metodi agli Elementi Finiti (FEM) hanno permesso di stimare numericamente i pa-

rametri di trasporto dalla risoluzione dei problemi di Stokes, Laplace e Poisson all'interno del Volume Elementare Rappresentativo del materiale.

Inoltre, sono stati sviluppati due nuove tecniche sperimentali per caratterizzare accuratamente i materiali porosi in bassa frequenza. Queste tecniche si basano sull'ipotesi dei parametri concentrati e l'analisi per i range di validità della frequenza è stata sintetizzata in $|\tilde{k}_n d| < 0.5$. Infine, è stato riportato un confronto tra le prestazioni di un motore termoacustico utilizzando i tre diversi stack (Pin Array Tetragonali, Wire Mesh e Schiume a Membrana 3D) e le stesse condizioni operative in termini di quantità di energia guadagnata ed energia dissipata per unità di tempo.

Sviluppi futuri prevederanno il testing delle proprietà di conversione energetica di questi materiali su diversi prototipi di dispositivi termoacustici caratterizzati da campi di pressione e velocità differenti tra loro (standing wave, traveling wave e hybrid).

Conclusions

This article explores the context of thermoacoustics and its relevance in the realm of sustainable technologies. It examines the advantages and potential of this technology, focusing on the crucial role of porous stacks in the energy conversion process. The need to enhance the efficiency of thermoacoustic devices through stack material optimization is highlighted. Thanks to the widespread adoption of additive manufacturing technology, it is now possible to create porous materials with precise controlled geometry. Therefore, predictive modeling represents a powerful tool in designing both acoustic absorption and thermoacoustic applications. In the former case, the goal is to maximize energy dissipation due to viscous and thermal losses when sound propagates through the solid skeleton. In the latter case, the aim is to find the optimal balance between viscous resistance and thermal relaxation effects to trigger the thermoacoustic phenomenon, i.e., the conversion of energy from thermal to mechanical (and vice versa). To achieve this, unconventional materials such as Tetragonal Pin Arrays, Wire Mesh, and 3D Membrane Foams have been explored. Predictive models have been developed to correlate transport parameters with geometric dimensions for these three types of materials: Tetragonal Pin Arrays, Wire Mesh, and 3D Membrane Foams. Finite Element Method (FEM)-based simulations have allowed for the numerical estimation of transport parameters by solving Stokes, Laplace, and Poisson problems within the Representative Elementary Volume of the material.

Additionally, two new experimental techniques have been developed to accurately characterize porous materials at low frequencies. These techniques are based on the lumped parameter assumption, and the frequency range analysis validity has been synthesized in $|\tilde{k}_n d| < 0.5$. Finally, a comparison of the performance of a thermoacoustic engine using the three different stacks (Tetragonal Pin Arrays, Wire Mesh, and 3D Membrane Foams) under the same operating conditions in terms of energy gain and dissipation per unit time has been reported. Future developments will involve testing the energy conversion properties of these materials on various prototypes of thermoacoustic devices characterized by different pressure and velocity fields (standing wave, traveling wave, and hybrid).

Bibliografia

- [1] G.W. Swift, *Thermoacoustics : a unifying perspective for some engines and refrigerators.*, Springer, 2018.
- [2] G. Chen, L. Tang, B. Mace, Z. Yu, Multi-physics coupling in thermoacoustic devices: A review, *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 146 (2021) 111170. <https://doi.org/10.1016/J.RSER.2021.111170>.
- [3] J.F. Allard, N. Atalla, *Propagation of Sound in Porous Media: Modelling Sound Absorbing Materials*, John Wiley and Sons, 2009. <https://doi.org/10.1002/9780470747339>.
- [4] J.L. Auriault, C. Boutin, C. Geindreau, *Homogenization of Coupled Phenomena in Heterogenous Media*, *Homogenization of Coupled Phenomena in Heterogenous Media* (2010). <https://doi.org/10.1002/9780470612033>.
- [5] C. Zwikker, C.W. Kosten, *Sound Absorbing Materials*, 1949.
- [6] R. Dragonetti, M. Napolitano, S. Di Filippo, R. Romano, Modeling energy conversion in a tortuous stack for thermoacoustic applications, *Appl Therm Eng* 103 (2016) 233-242. <https://doi.org/10.1016/J.APPLTHERMALENG.2016.04.076>.
- [7] E. Di Giulio, C.T. Nguyen, C. Perrot, R. Dragonetti, Wire mesh stack and regenerator model for thermoacoustic devices, *Appl Therm Eng* 221 (2023) 119816. <https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2022.119816>.
- [8] T.G. Zieliński, N. Dauchez, T. Boutin, M. Leturia, A. Wilkinson, F. Chevillotte, F.X. Bécot, R. Venegas, Taking advantage of a 3D printing imperfection in the development of sound-absorbing materials, *Applied Acoustics* 197 (2022) 108941. <https://doi.org/10.1016/J.APACOUST.2022.108941>.
- [9] T. Zieliński, R. Venegas, C. Perrot, *J. Sound and Vibration*, 2020, Benchmarks for microstructure-based modelling of sound absorbing rigid-frame porous media, <https://doi.org/10.1016/j.jsv.2020.115441>.
- [10] M. Napolitano, E. Di Giulio, F. Auriemma, R.A. Romano, R. Dragonetti, Low frequency acoustic method to measure the complex bulk modulus of porous materials, *J Acoust Soc Am* 151 (2022) 1545–1556. <https://doi.org/10.1121/10.0009767>.
- [11] E. Di Giulio, M. Napolitano, A. Di Meglio, R.A. Romano, R. Dragonetti, Low frequency acoustic method to measure the complex density of porous materials, *J Acoust Soc Am* 152 (2022) 2220. <https://doi.org/10.1121/10.0014762>.
- [12] E. Di Giulio, F. Auriemma, M. Napolitano, R. Dragonetti, Acoustic and thermoacoustic properties of an additive manufactured lattice structure, *J Acoust Soc Am* 149 (2021) 3878–3888. <https://doi.org/10.1121/10.0005085>.
- [13] G.W. Swift, R.M. Kenlian, Thermoacoustics in pin-array stacks, *Journal of the Acoustical Society of America* 94 (1993) 941–943. <https://doi.org/10.1121/1.408196>.
- [14] H.T. Luu, C. Perrot, R. Panneton, Influence of Porosity, Fiber Radius and Fiber Orientation on the Transport and Acoustic Properties of Random Fiber Structures, *Acta Acustica United with Acustica* 103 (2017) 1050–1063. <https://doi.org/10.3813/AAA.919134>.
- [15] O. Doutres, N. Atalla, K. Dong, A semi-phenomenological model to predict the acoustic behavior of fully and partially reticulated polyurethane foams, *J Appl Phys* 113 (2013) 054901. <https://doi.org/10.1063/1.4789595>.
- [16] V. Langlois, A. Kaddami, O. Pitois, C. Perrot, Acoustics of monodisperse open-cell foam: An experimental and numerical parametric study, *J Acoust Soc Am* 148 (2020) 1767. <https://doi.org/10.1121/10.0001995>.
- [17] B. Ward, J. Clark, Gregory.W. Swift, *Design environment for low-amplitude thermoacoustic energy conversion, DELTAEC version 6.2: Users guide*, Los Alamos National Laboratory, 2008.

Machine learning per la separazione e la misura di sorgenti sonore coesistenti in spazi chiusi

Domenico De Salvio¹

Dipartimento di Ingegneria Industriale,
Università di Bologna,
Viale del Risorgimento, 2, 40136 Bologna
domenico.desalvio2@unibo.it

Ricevuto: 28/2/2024

Accettato: 20/5/2024

DOI: 10.3280/ria1-2024oa17373

ISSN: 2385-2615

La crescente attenzione verso i monitoraggi a lungo termine, e alle grandi quantità di dati che riescono a produrre, spiana la strada all'utilizzo di tecniche di machine learning. L'utilizzo di algoritmi sofisticati, principalmente basati su tecniche statistiche, permette di ampliare le capacità di analisi dei tecnici acustici in contesti complessi. Il presente lavoro vuole proporre un metodo basato su tecniche di clustering per separare, identificare e misurare diverse sorgenti sonore coesistenti in scenari reali monitorati tramite un fonometro. Sono presentati quattro casi studio in due contesti diversi (aule universitarie e uffici) in cui il metodo proposto è stato applicato.

In entrambi i contesti, i risultati hanno evidenziato come il clustering riesca a ricostruire in modo efficace le occorrenze misurate, restituendo un significato fisico ad ogni cluster attraverso match spettrali e parametri statistici e temporali. Le indagini effettuate nei casi studio presentati promuovono l'uso del metodo proposto come un possibile strumento per ricavare ulteriori informazioni in scenari complessi.

Parole chiave: machine learning, monitoraggi, fonometro, aule universitarie, uffici, misura, spazi chiusi

Machine learning for the separation and measurement of coexisting sound sources in enclosed spaces

The constant growth of the interest in long-term monitoring and the large amount of data it produces pave the way for machine learning techniques. Using sophisticated algorithms, usually based on statistics, broadens the capability of analysis in complex scenarios. The present work proposes a machine learning-based method to separate, identify, and measure different coexisting sound sources through sound level meters in real-world scenarios. Four case studies show the application of the proposed method in two different contexts (university lecture halls and offices). In both contexts, results show the reliability of the clustering technique. It efficiently reconstructs the occurrences measured and gives back a physical meaning to clusters through spectral matching and statistical and temporal parameters. The investigation presented here fosters the use of the proposed method as a possible tool to mine information in complex scenarios.

Keywords: machine learning, monitoring, sound level meter, university lecture hall, offices, measurement, enclosed spaces

1 | Introduzione

Al giorno d'oggi la prassi tecnica comune fra i tecnici acustici si basa sulla descrizione dei contesti sonori attraverso i livelli di pressione sonora (SPL). Questi possono essere raccolti attraverso un fonometro e descrivono il contesto principalmente attraverso metriche energetiche.

Il parametro più comunemente utilizzato è il livello equivalente (L_{eq}), ovvero il valore quadratico medio valutato su un determinato intervallo di tempo. Tuttavia, essendo una metrica energetica, i livelli più alti influiscono significativamente sui risultati. Il L_{eq} viene principalmente utilizzato per valutare l'espo-

sizione sonora a lungo termine durante periodi rappresentativi di misurazione. Per eliminare l'influenza della durata del tempo di misurazione si usa il Sound Exposure Level (SEL) [1]. In questo caso, si "schiaccia" l'informazione misurata su un tempo di riferimento pari a 1 s. Tuttavia, è possibile utilizzare i dati fonometrici anche da un punto di vista statistico, oltre che energetico. Infatti, analisi più dettagliate vengono effettuate attraverso livelli di pressione statistici. I percentili acustici (L_N) sono definiti come gli SPL superati per l' $N\%$ del tempo di misura, dove N è la percentuale rispettiva da considerare. Ad esempio, L_{90} rappresenta l'SPL superato per il 90% del tempo di misura. I livelli percentili vengono comunemente usati per descrivere i contributi di singole sorgenti. Ad esempio, L'_{90} viene comunemente associato al livello di rumore di fondo. Tuttavia, questo approccio si basa su assunzioni temporali difficilmente dimostrabili.

¹ Vincitore ex-aequo del premio "Gino G. Sacerdote" edizione 2024.

La prassi attuale non permette di misurare in un contesto reale i diversi contributi delle diverse tipologie di sorgenti esistenti. Questa possibilità permetterebbe analisi più accurate per l'analisi e la progettazione acustica in molti casi.

Diversi lavori hanno indagato la possibilità di separare le sorgenti sonore attraverso monitoraggi a lungo termine [2–13]. Siccome da questi è possibile ricavare una grande quantità di dati, l'approccio statistico si è rivelato più efficace di quello energetico. L'utilizzo di SPL come variabili casuali porta a descrivere i contesti di misura attraverso i suoi SPL più probabili. Ciò non implica che i due approcci vadano in contrasto fra di loro. Misurano e descrivono il contesto sonoro secondo caratteristiche diverse.

La possibilità di usufruire di larghe quantità di dati ha permesso negli ultimi anni l'esplorazione sempre più frequente di nuove tecniche di analisi dati derivanti dal campo del machine learning [14]. Applicazioni di tecniche di machine e deep learning in acustica si trovano nei più svariati campi, dalle analisi geotecniche alle applicazioni in ambienti riverberanti [15–17]. Tuttavia, queste tecniche richiedono un alto costo di calcolo e dunque strumentazioni molto performanti poiché utilizzano input ricchi di informazioni come ad esempio spettrogrammi, MFCC, o direttamente registrazioni audio [18]. L'utilizzo dei soli SPL come input permette invece di ottenere risultati con costi di calcolo inferiori. Esempi di applicazione di approcci statistici basati solo su SPL li troviamo in contesti come aule scolastiche, uffici, ospedali ed eventi sportivi.

Il presente lavoro vuole proporre un approccio statistico dell'uso di monitoraggi fonometrici attraverso un metodo rigoroso e validato sia teoricamente che sperimentalmente.

2 | Accenni teorici

2.1 | Clustering

Il metodo proposto è basato sulla collezione di SPL ottenuta tramite monitoraggi fonometrici a medio e lungo termine. Ciò significa che il database di partenza per l'analisi da svolgere è formato da una sola lunga serie di numeri. Non ci sono dunque informazioni riguardo i numeri collezionati. Nell'ambito dell'analisi dati, si dice che i dati non sono "etichettati". Dunque, il primo passo che si può compiere è svolgere un'analisi di clustering.

Il clustering è una tecnica di analisi dati che impiega degli algoritmi per ricercare pattern all'interno dei dati [19]. L'obiettivo è suddividere i dati che si hanno a disposizione in diversi gruppi, chiamati *cluster*, in base alla loro somiglianza. L'ottimizzazione sarà poi ottenuta tramite processi iterativi che si concentreranno sulla coesione dei gruppi ricavati. Il miglior risultato possibile considerando i parametri di somiglianza e coesione rappresenterà il risultato finale. L'obiettivo finale del clustering è ricavare caratteristiche utili all'interno dei gruppi che saranno chiamate *features*. Questo processo è anche comunemente chiamato, nell'ambito del machine learning, apprendimento non supervisionato (*unsupervised*) [14,20].

Ogni algoritmo in grado di condurre un'analisi di clustering forma i cluster in base a criteri differenti. Nel presente lavoro si utilizzerà un algoritmo detto *model-based*, ciò significa che modella i dati da un processo generativo. Una volta scelto il processo generativo, si possono stimare i parametri del modello e ricavarne dunque le *features*.

2.2 | No free-lunch theorem e scelta dell'algoritmo

Il *no free-lunch theorem* (NFL) sostiene che, nello spazio di tutti i possibili problemi, ogni algoritmo di ottimizzazione produrrà in media risultati simili [21]. Una delle implicazioni di questo teorema è che non esiste un algoritmo migliore di un altro. Tuttavia, la conoscenza del contesto del problema da ottimizzare può influenzare la scelta dell'algoritmo.

Nel caso specifico del presente lavoro, il dato è rappresentato da una serie di short-time L_{eq} misurati da un fonometro sulla base del suo intervallo e costante di acquisizione. Ad esempio, un'acquisizione fonometrica con costante Fast sarà definita come:

$$SPL = 10 \log \left[\frac{(1/\tau_F) \int_{-\infty}^t p^2(\xi) e^{-(t-\xi)/\tau_F} d\xi}{p_0^2} \right] \text{ (dB)} \quad (1)$$

Dove τ_F rappresenta la costante Fast, ξ la variabile fittizia di integrazione, p la pressione istantanea misurata, p_0 la pressione di riferimento. Al netto della costante e dell'intervallo di acquisizione, ciò che è importante notare è che il dato è rappresentato da una quantità al quadrato all'interno di un logaritmo. Questo, nell'ambito dell'analisi dati, rappresenta ciò che viene definita una *log-transformation* ed è una tecnica comune per trasformare una distribuzione qualunque di dati in una con andamento normale [22]. Ciò significa che, a livello teorico, gli SPL prodotti da una singola sorgente, monitorata per un intervallo di tempo relativamente lungo, formeranno una curva di distribuzione gaussiana.

2.3 | Gaussian Mixture Model

Partendo dalle considerazioni fatte nella sezione precedente, l'algoritmo scelto per svolgere l'analisi di clustering su SPL sarà il Gaussian Mixture Model (GMM) [23]. Questo è un modello probabilistico che ricostruisce la struttura originale dei dati iniziali attraverso una combinazione lineare di distribuzioni gaussiane. L'ottimizzazione avviene tramite un processo iterativo che aggiorna gli *iperparametri*, cioè le medie, le covarianze, e i pesi di ogni componente della mistura. Dato un set di N osservazioni indipendenti $x = \{x_1, \dots, x_N\}$, la mistura gaussiana è definita come:

$$f(x) \approx \sum_{k=1}^K \pi_k f_k(x_i, \mu_k, \sigma_k^2) \quad (1)$$

dove π_k rappresenta i pesi di ogni componente, definiti come:

$$0 \leq \pi_k \leq 1 \quad (k = 1, \dots, K) \quad (2)$$

e

$$\sum_{k=1}^K \pi_k = 1. \quad (3)$$

L'Eq. (1) è soddisfatta massimizzando la funzione di verosimiglianza, definita come:

$$\mathcal{L}(x) = \prod_{i=1}^n \sum_{k=1}^K \pi_k f_k(x_i) = \prod_{i=1}^n \sum_{k=1}^K \pi_k \frac{1}{\sqrt{2\pi\sigma_k^2}} e^{-\frac{(x_i-\mu_k)^2}{2\sigma_k^2}}. \quad (4)$$

La massimizzazione della funzione di verosimiglianza è un metodo utilizzato in statistica per trovare i valori dei parametri che possono aver prodotto con la maggiore probabilità i dati osservati. Nel presente lavoro questo metodo è applicato alle distribuzioni normali, come esplicitato dall'ultimo termine indicato nell'Eq. (4) [24].

Nel presente lavoro, la massimizzazione viene fatta attraverso l'algoritmo Expectation-Maximization (EM) [25]. La Fig. 1 mostra un esempio di analisi GMM effettuata nel contesto del presente lavoro. La linea blu rappresenta la distribuzione delle occorrenze degli SPL acquisiti, mentre le 3 linee arancione, gialla e verde rappresentano 3 differenti cluster da associare a 3 differenti tipologie di sorgenti.

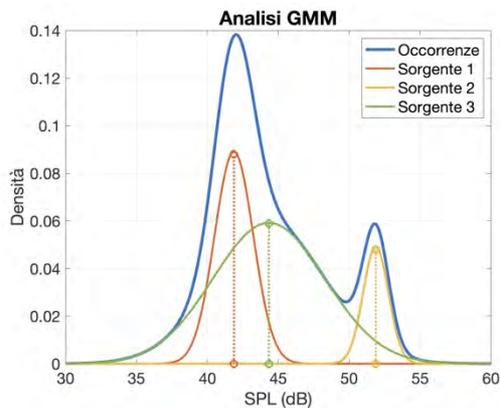


Fig. 1 – Esempio di ricerca dei cluster tramite GMM
Example of cluster analysis via the GMM

2.4 | Candidate models e numero ottimale di cluster

In molti algoritmi, tra cui la GMM, il numero di cluster da ricavare bisogna definirlo prima di avviare il processo iterativo. Questa rappresenta una delle tematiche più discusse nell'ambito delle analisi clustering [19]. La ricerca del numero ottimale di cluster si svolge su due step:

1. Creazione dei *candidate models*: si utilizza la GMM sui dati di partenza impostando diversi numeri di cluster k da ricercare. Ogni GMM(k) rappresenterà un candidato.
2. Si utilizza una metrica che valuta separazione e coesione dei vari cluster creati per ogni candidato. Il modello che ottiene il risultato migliore rappresenterà il k ottimale all'interno dei dati.

Esistono diverse metriche per valutare i candidati e anche fra di esse, in accordo con il NFL, non ne esiste una che performerà meglio di altre. Una delle tecniche più comuni per ovviare a questo limite è utilizzare più metriche e confrontarne i risultati.

Nel presente lavoro le metriche di selezione dei candidati sono quattro: l'indice *Calinski-Harabasz*, l'indice *Davies-Bouldin*, il coefficiente di *Silhouette*, e il *Gap Statistic*. Ognuna di queste metriche valuta separazione e coesione dei vari modelli in modo diverso [26-29]. Il numero ottimale di cluster più frequente fra le metriche utilizzate corrisponderà alla scelta finale. Approfondimenti teorici delle singole metriche utilizzate sono rimandati alla letteratura di riferimento.

3 | Metodo

3.1 | Casi studio

Il metodo proposto è stato costruito generalizzando tecniche avanzate di misure fonometriche in diversi contesti [4,6-9,12]. In questo lavoro si vogliono presentare i risultati di differenti casi studio affrontati in due differenti contesti di seguito descritti brevemente.

In Fig. 2 sono rappresentati due esempi di analisi GMM secondo il metodo proposto in questo lavoro, una svolta in un'aula universitaria, l'altra svolta in un ufficio. Di seguito sono descritti alcuni dettagli dei casi studio qui presentati.

3.1.1 | Aule universitarie

Il primo caso studio è rappresentato da due aule universitarie sottoposte ad interventi di miglioramento acustico secondo UNI11532-2 [30]. Le due aule sono considerabili come "grandi" avendo un volume rispettivamente di 900 e 1000 m³, con una capienza massima di 200 e 250 studenti. Qui il metodo proposto è stato utilizzato per valutare le variazioni di *student activity* (SA) in 18 lezioni totali, 9 prima e 9 dopo gli interventi realizzati. La SA è definita come il chiacchiereccio fra gli studenti durante le lezioni ed è considerata in letteratura una metrica dell'attenzione degli studenti e strettamente connessa alle proprietà acustiche delle aule [3]. SA viene ricavata tramite GMM e separata rispetto a quello che è il parlato dell'insegnante (indicato come *speech level* SL). È importante far notare che, essendo entrambe due aule grandi, gli insegnanti utilizzano un impianto di amplificazione per parlare agli studenti.

3.1.2 | Uffici

Il contesto degli uffici è qui affrontato tramite due casi studio. Due uffici sono stati monitorati al fine di ricavare i contributi spettrali di ogni tipologia di sorgente, come il parlato, il traffico, e il rumore di impianti. Gli spazi oggetto di studio sono abbastanza grandi da ospitare rispettivamente 4 e 3 postazioni di lavoro. In entrambi i casi studio il lavoro svolto è di tipo collaborativo. Ciò significa che i lavoratori parlano fra di loro oltre che con gente esterna attraverso canali telematici.

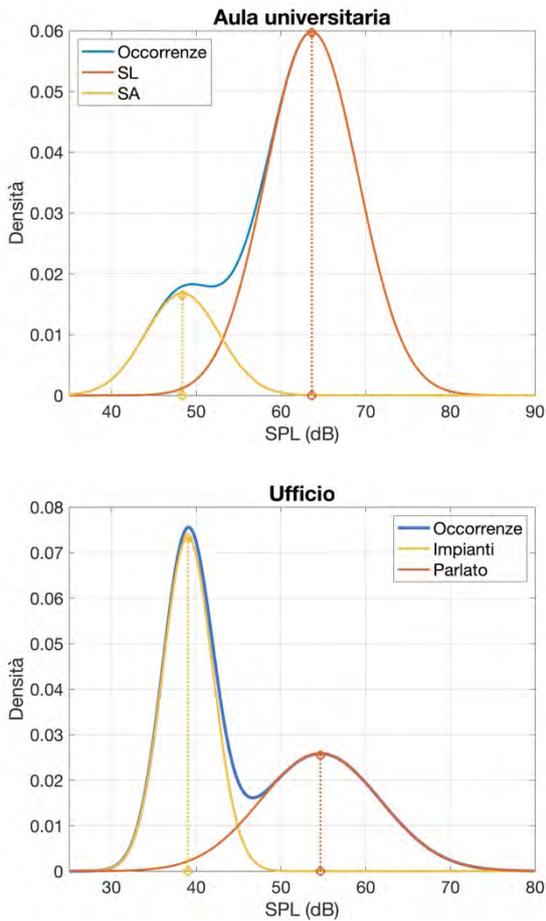


Fig. 2 – Esempi di analisi GMM in due contesti differenti: aula universitaria (in alto) e ufficio (in basso)
Example of GMM analysis in two different environments: university lecture hall (on the top) and office (on the bottom)

3.2 | Analisi dei cluster

Tutte le analisi sono basate sulla curva delle occorrenze dei monitoraggi effettuati. Questo permette di utilizzare il metodo proposto in base al contesto di applicazione e allo scopo della ricerca.

L'analisi può essere generalizzata e descritta in 5 step:

1. **Acquisizione dei dati.** Tutte le analisi presentate qui sono basate su monitoraggi fonometrici ottenuti con un intervallo di acquisizione di 100 ms in terzi e bande d'ottava. Ogni banda di frequenza, a prescindere dalla sua larghezza, influente nel metodo, rappresenterà una popolazione statistica. Ad esempio, tutti gli SPL acquisiti nella banda di ottava dei 125 Hz o nella banda di terzi di ottava dei 160 Hz rappresenteranno due differenti popolazioni statistiche da poter analizzare singolarmente.
2. **Preparazione dei candidate models.** Ogni singola popolazione statistica, i.e., ogni banda o livello globale del tempo di misura da voler analizzare, è elaborata più volte tramite GMM impostando diversi numeri di cluster k . Ad esempio, in Fig. 1, i dati sono stati suddivisi con $k=3$, in Fig. 2 con $k=2$. Questo passaggio è necessario perché

il numero di cluster k deve essere impostato prima di avviare il processo iterativo di GMM; dunque, non si conosce il numero ottimale di cluster all'interno delle varie popolazioni statistiche. A questo punto si ha una serie di popolazioni di dati suddivisi più volte con diversi k chiamati *candidate models*.

3. **Numero ottimale di cluster.** Fra i *candidate models* ce n'è uno che è quello ottimale. Il numero di cluster che avrà il modello ottimale rappresenterà il numero ottimale di cluster. Per conoscere questo numero, i.e., il numero di sorgenti sonore all'interno dei dati acquisiti, è necessario utilizzare le 4 diverse metriche citate in Sezione 2.4 per ogni gruppo di *candidate models* preparati nello step precedente. Poiché l'utilizzo di queste metriche è non supervisionato, è utile valutare i risultati ottenuti non soltanto tramite gli algoritmi utilizzati ma ponderando i risultati ottenuti con l'esperienza e la conoscenza del contesto. Per le metriche di valutazione, ognuna di esse indicherà dunque un numero ottimale di cluster. Il risultato finale sarà dato dal numero più frequente ottenuto; dunque, indicheranno il numero di sorgenti all'interno dei dati. Ad esempio, se si sta analizzando la popolazione statistica della banda di ottava dei 125 Hz, ogni metrica valuterà qual è la migliore fra le popolazioni dei 125 Hz elaborate con diversi k . Se due metriche indicheranno che il modello ottimale è quello ricostruito con $k=3$, una con $k=4$ e una con $k=2$, allora il modello ottimale sarà rappresentato da $k=3$.
 4. **Separazione delle sorgenti.** In questo step si separano i diversi cluster – cioè sorgenti – ottenuti per ogni banda di frequenza. Questo step colleziona le diverse medie e deviazioni standard di ogni cluster ottenuto per ogni popolazione statistica.
 5. **Identificazione delle sorgenti.** I cluster ottenuti sono rappresentati da curve gaussiane. Dunque, saranno definite univocamente da due parametri: la media e la deviazione standard. La media rappresenterà l'SPL della sorgente. La deviazione standard di ogni cluster è utilizzata per identificare il tipo di sorgente. Per esempio, prendendo a riferimento la distribuzione delle occorrenze graficata in basso della Fig. 2 si vedranno due tipi di cluster diversi. Le sorgenti di natura meccanica, avendo dei cicli ripetitivi nel tempo, emetteranno SPL in un range ristretto. Dunque, saranno costituite da curve gaussiane relativamente strette (curva gialla). Al contrario, il parlato di una persona, essendo un tipo di segnale molto vario nel tempo, dettato da pause e diverse intonazioni vocali, costituirà una curva gaussiana più larga (curva arancione). In questo lavoro, sulla base dei lavori precedentemente citati, si utilizzerà preliminarmente una soglia uguale a 5 dB per indicare una sorgente di tipo antropico (> 5 dB) da una di tipo meccanico o di traffico (≤ 5 dB).
- È importante sottolineare come questo metodo sia applicabile a qualunque tipo di livello misurabile dal fonometro. Il suo utilizzo e la sua efficacia non variano se si usano, ad esempio, livelli equivalenti o livelli massimi.

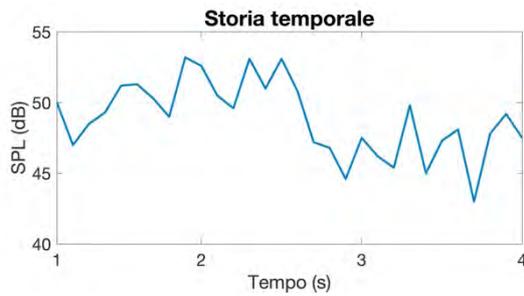


Fig. 3 – Esempio di storia temporale acquisita con un intervallo temporale di 100 ms

Example of time history obtained with an interval time equal to 100 ms

La ricostruzione degli spettri consiste nel raggruppare in maniera coerente tutti i cluster che hanno deviazioni standard dello stesso tipo, ad esempio umana o meccanica.

Nei casi studio descritti successivamente, sono stati utilizzati come database, cioè come popolazioni statistiche, *short-term* L_{eq} in bande d'ottava da 125 a 4000 Hz. I monitoraggi sono stati eseguiti con un intervallo di acquisizione pari a 100 ms. Questo permette di acquisire SPL anche fra le pause del parlato e dunque di evitare eccessivi mascheramenti dati dalle interazioni fra sorgenti coesistenti. In Fig. 3 è mostrato un esempio di storia temporale ottenuta con un intervallo di acquisizione di 100 ms. Qui, è possibile apprezzare le fluttuazioni del segnale. SPL più alti apparterranno ad una determinata sorgente, SPL più bassi riescono ad essere acquisiti nelle pause della sorgente più alta ed appartengono ad una sorgente differente. Questi SPL andranno dunque a disegnare le diverse forme delle occorrenze totali con i suoi diversi picchi e flessi.

In Fig. 4 è mostrato il processo del metodo proposto step-by-step attraverso uno schema a blocchi.

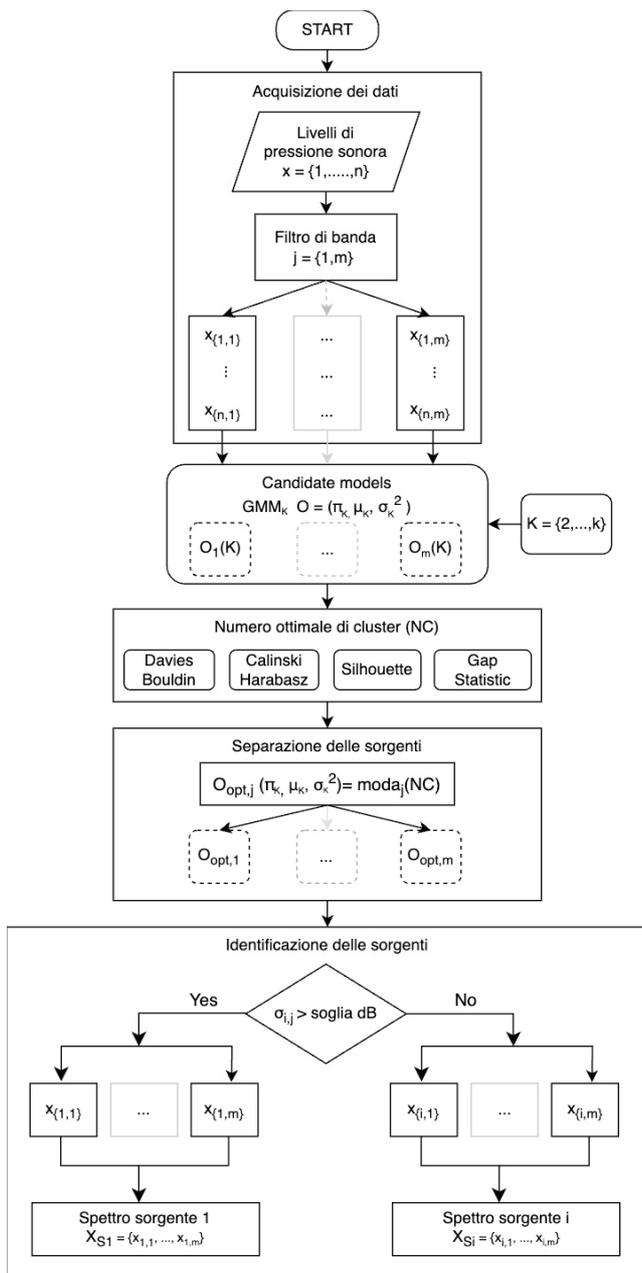


Fig. 4 – Schema a blocchi del metodo proposto. Adattato da [9]
Block scheme of the proposed method. Adapted from [9]

4 | Risultati

Di seguito si presentano i risultati suddivisi per ogni contesto di applicazione. In tutti i casi studio, le metriche di selezione del numero ottimale di cluster è sempre risultato uguale a 2. Dunque, in ogni contesto di applicazione, sono state ricercate 2 sorgenti. Nelle aule universitarie sono state separate la student activity (SA) e lo speech level (SL), negli uffici le sorgenti di rumore (di tipo meccanico e traffico) e il parlato.

4.1 | Aule universitarie

I principali risultati ottenuti nelle aule universitarie sono mostrati in Tab. 1. Qui sono indicati il codice della lezione, la corrispettiva aula, il numero di studenti presenti durante la lezione e i 3 parametri principali: la SA, l'SL e il rapporto segnale-rumore (SNR). Siccome durante tutti i monitoraggi gli impianti di condizionamento dell'aria erano spenti, l'SNR è ricavato come la differenza fra SL e SA, intendendo SA come sorgente di rumore. Le lezioni dalla A alla I sono state monitorate prima i lavori di correzione acustica, le rimanenti dopo. Il numero degli studenti sottende la percentuale di occupazione delle aule che fa variare, più o meno significativamente in base ai casi, le proprietà acustiche della stanza.

I valori medi sono stati riportati sia per il gruppo di lezioni monitorate prima che dopo i lavori. SA, SL e SNR prima dei lavori variano rispettivamente negli intervalli 47,5-61 dBA, 63,3-75,5 dBA e 13-20 dBA. Dopo i lavori, gli intervalli misurati sono rispettivamente 47,2-53,9 dBA, 59-72,1 dBA e 9,1-19,7 dBA. Mediamente è stata misurata una SA di 52,1 dBA, un SL di 68,3 dBA e un SNR di 16,2 dBA prima dei lavori. Dopo i lavori l'SA misurata è stata di 50,8 dBA, l'SL di 65,6 dBA e l'SNR di 14,9 dBA. Considerando gli outliers, l'occupazione, anche se mediamente inferiore, risulta circa la stessa.

Tab. 1 – Lezioni monitorate prima e dopo gli interventi di correzione acustica. Oltre al codice della lezione sono indicate l'aula in cui sono state svolte, il numero di studenti presenti, la SA e lo SL misurati e il corrispettivo SNR
Results of the lessons measured before and after restoration works. The lesson code, the corresponding hall of the lesson, the number of students, the SA, the SL, and the SNR are shown

	Lezione	Aula	N. studenti	SA (dBA)	SL (dBA)	SNR (dBA)
Prima	A	I	145	48,2	65,0	16,8
	B	I	200	47,5	63,3	15,8
	C	I	100	53,3	66,3	13,0
	D	I	150	51,2	67,2	16,0
	E	II	250	48,4	67,5	19,1
	F	II	160	50,3	66,5	16,2
	G	II	120	61,0	75,5	14,5
	H	II	150	55,3	75,3	20,0
	I	II	200	53,4	68,0	14,6
Media			164	52,1	68,3	16,2
Dopo	J	I	130	51,3	64,6	13,3
	K	I	185	49,9	69,6	19,7
	L	I	130	47,2	64,6	17,4
	M	I	80	49,9	59,0	9,1
	N	I	190	52,7	68,9	16,2
	O	II	110	53,9	72,1	18,2
	P	II	125	51,4	60,8	9,4
	Q	II	120	48,8	66,4	17,6
	R	II	95	52,1	64,9	12,8
Media			129	50,8	65,6	14,9

4.2 | Uffici

I principali risultati riguardanti le applicazioni del metodo proposto negli uffici si concentrano sulla possibilità di ricostruire gli spettri di ogni tipologia di sorgente presente nello spazio.

In Fig. 5 sono mostrati gli spettri ricostruiti nei due uffici oggetto di studio. Nel caso 1 (in alto) gli spettri misurati corrispondono al parlato dei lavoratori e alla somma delle sorgenti di tipo meccanico che si hanno all'interno di un ufficio (condizionamento dell'aria, computer, ecc.). Nel caso 2 (in basso), al momento della misura, l'impianto di condizionamento dell'aria era spento. Tuttavia, essendo l'ufficio a ridosso di una strada ad alto scorrimento, il rumore da traffico costituiva una sorgente rilevante durante la giornata lavorativa.

È importante notare che entrambi gli uffici presentavano caratteristiche acustiche molto differenti. Nel caso 1 il controsoffitto era completamente trattato e l'ambiente risultava, in termini di riverberazione, molto secco. Nel caso 2 l'ufficio non presentava alcun trattamento acustico.

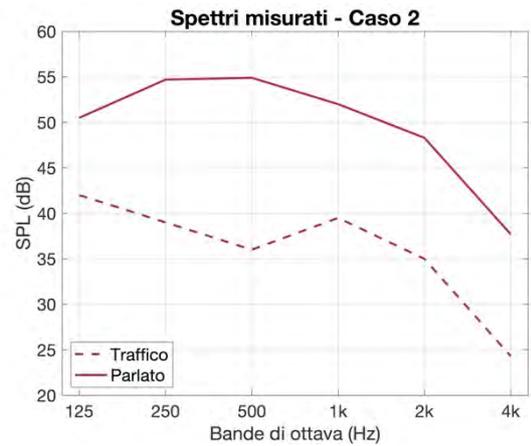
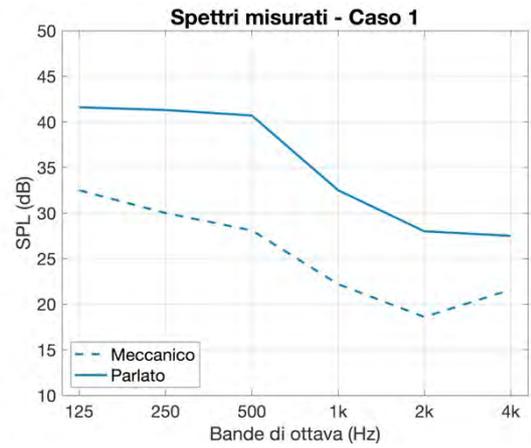


Fig. 5 – Spettri ricostruiti all'interno dei due uffici. Le linee tratteggiate indicano le sorgenti di rumore, le linee continue indicano gli spettri del parlato
Reconstructed spectra in offices. Dashed lines refer to the detected noise, solid lines refer to speech spectra

5 | Discussioni

5.1 | Aule universitarie e ruolo dell'occupazione

I risultati ottenuti all'interno delle aule universitarie mostrano come ambienti con caratteristiche acustiche conformi alla UNI11532 migliorino anche la capacità degli studenti di rimanere concentrati durante le lezioni. Al netto dell'uso dell'impianto di amplificazione, è ragionevole considerare anche uno sforzo vocale inferiore degli insegnanti.

Un approfondimento circa il cambiamento di comportamento delle persone che impiegano gli spazi misurati si può ottenere andando a correlare il numero degli studenti con i 3 livelli di pressione sonora presi in considerazione: SA, SL e SNR.

In Fig. 6 sono mostrate le correlazioni sopracitate. In tutti i grafici, il giallo indica il prima e il grigio indica il dopo lavori. I punti indicano le singole lezioni analizzate, le linee tratteggiate le corrispondenti regressioni, lineari in questo caso. Dai grafici si può intuire subito il ruolo chiave che gioca l'occupazione durante le lezioni universitarie. Nei presenti casi studio, le sedute sono disposte ad anfiteatro. In lavori precedenti sia Hodgson che Choi hanno messo in evidenza l'impatto rilevante che l'occupazione e la sua disposizione nello spazio genera sull'acustica delle aule [3,10].

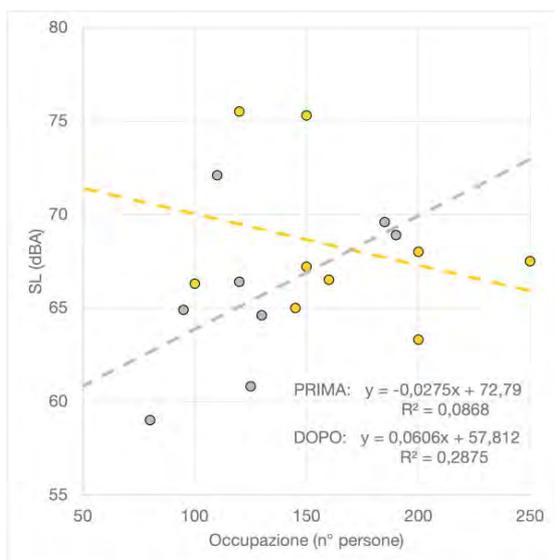
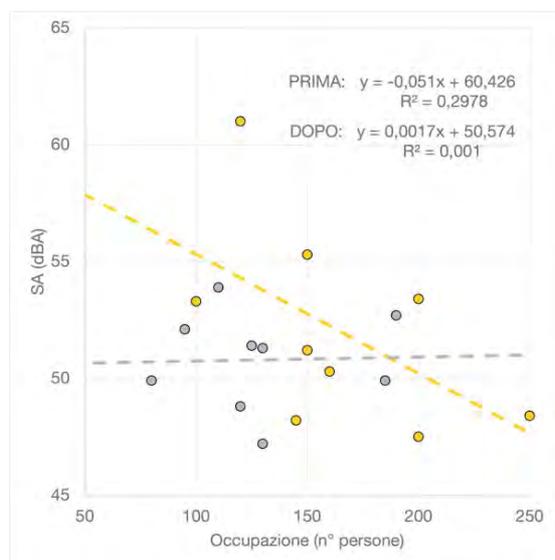
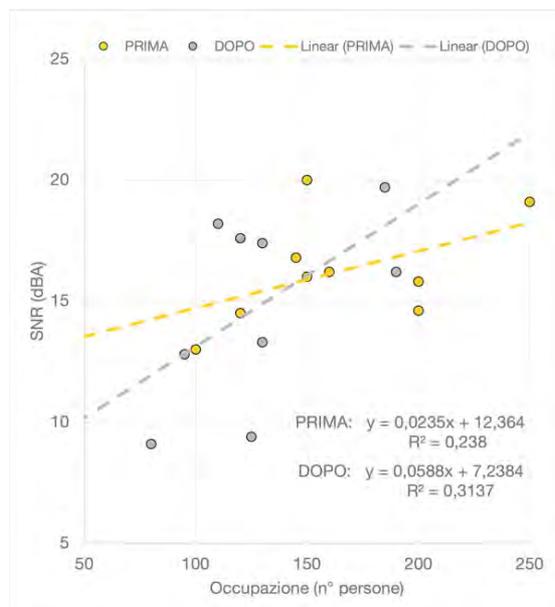


Fig. 6 – Correlazioni fra occupazione (numero di studenti durante le lezioni) e SA, SL e SNR prima e dopo i lavori di miglioramento
Correlation between occupancy (number of students attending lectures) and SA, SL, and SNR before and after restoration works

Dalla relazione fra studenti e SNR (in alto) si può notare come i lavori hanno reso la correlazione più significativa. Questo può voler dire due cose: da un lato o che più gente segue la lezione e più si fa silenzio; o che più gente segue la lezione e più l'insegnante tende ad alzare la voce o quantomeno ad avvicinare il microfono.

Nel mezzo di Fig. 6 invece è raffigurata la correlazione fra SA e numero di studenti. È possibile notare come, dopo gli interventi di correzione acustica, SA perda la correlazione con l'occupazione rimanendo costante. Questo potrebbe significare che gli studenti controllano il proprio chiacchiericcio in base al loro numero.

Nel grafico di correlazione fra occupazione ed SL (Fig. 6 in basso) sembra esserci l'effetto maggiore degli interventi di correzione acustica. Le tendenze delle regressioni cambiano completamente inclinazione suggerendo che gli insegnanti tenderebbero ad alzare il livello della propria voce all'aumentare del numero di studenti presenti in aula. Tuttavia, questo non è detto che sia strettamente legato allo sforzo vocale in quanto, come già accennato, tutte le lezioni sono svolte utilizzando un impianto di amplificazione.

Date le popolazioni statistiche di ogni scenario abbastanza piccole, i risultati numerici delle correlazioni sono da considerarsi preliminari. Essendo un confronto fra due scenari, i valori di R^2 sono riportati per evidenziare in maniera qualitativa più che quantitativa il cambio di tendenza dei dati [4].

5.2 | Uffici

Al fine di validare il metodo e di valutare l'affidabilità degli spettri misurati, è stato effettuato un confronto fra i risultati ottenuti e degli spettri di riferimento. Questo confronto è definito *spectral matching* e consiste nel valutare gli andamenti delle tipologie di spettri ottenuti con riferimenti normativi e di letteratura. In Fig. 7 sono mostrati questi confronti per entrambi i casi studio attraverso degli spettri relativi. Per spettri relativi si intendono gli spettri valutati riportando a 0 dB la banda dei 1000 Hz e valutando, rispetto a questo riferimento, le differenze delle bande rimanenti. I riferimenti di normativa o di letteratura sono indicati con linee tratteggiate mentre gli spettri misurati sono riportati con linee continue.

Negli uffici, gli spettri misurati in entrambi i casi studio sono stati suddivisi in base alla loro tipologia. Da una parte (Fig. 7 in alto) sono visualizzati gli spettri misurati di sorgenti di rumore. Nel caso specifico sono stati rilevati uno spettro di rumore meccanico e uno spettro di rumore da traffico. Per quanto riguarda il rumore meccanico, lo spettro di confronto è quello riportato dall'ASHRAE Handbook, testo di riferimento per quanto riguarda il funzionamento degli impianti di ventilazione meccanica [31]. Tuttavia, uno spettro che si riferisce al solo impianto di ventilazione risulta in questo caso relativamente limitato nel confronto. Infatti, come già accennato precedentemente, lo spettro indicato come "meccanico" in questo lavoro si riferisce all'insieme delle sorgenti di natura meccanica, e non soltanto di ventilazione. Questo spiega le

differenze rilevanti che si possono notare alle alte frequenze, cioè nelle bande dei 2000 e 4000 Hz. In quest'ultima banda, è particolarmente accentuata la differenza ed è attribuibile a ronzii di natura elettrica dei vari dispositivi presenti nell'ufficio (lampade, schermi, ecc.).

Il rumore da traffico invece è stato confrontato con lo spettro normalizzato indicato dalla EN1793-3 [32]. È importante notare che lo spettro riportato in normativa fa riferimento alla condizione di campo libero. Dunque, le proprietà acustiche dell'ufficio e della sua facciata possono influenzare i risultati. Le tendenze dei due spettri, indicati in alto della Fig.6 in rosso e giallo, è simile con la differenza più rilevante nella banda dei 500 Hz. Tuttavia, il contributo delle basse frequenze risulta coerente con il rumore prodotto da un traffico a bassa velocità [33].

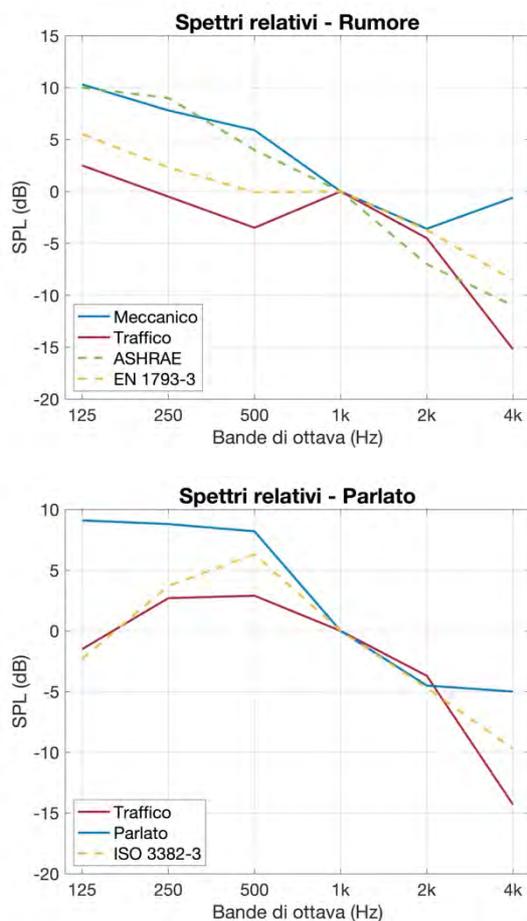


Fig. 7 – Spettri relativi e confronto con riferimenti normativi e di letteratura

Relative spectra and comparison with standards and literature

In basso della Fig. 6 invece sono mostrati gli spettri del parlato misurati in entrambi i casi studio e confrontati con lo spettro del parlato direttivo indicato dalla ISO 3382-3 [34]. Anche qui è importante sottolineare come lo spettro di riferimento sia misurato in condizioni anecoiche. Dunque, è ragionevole aspettarsi uno spettro influenzato dalle proprietà acustiche degli ambienti. In particolare, sono facilmente visibili differenze relativamente grandi alle basse frequenze. Queste

sono attribuibili al cambiamento dello spettro del parlato in ambienti riverberanti e all'incertezza di misura che si ha soprattutto ai 125 e 250 Hz [35,36]. Anche la direttività della sorgente stessa può influenzare l'andamento dello spettro rispetto al riferimento normativo. Nei casi studio abbiamo più persone che parlano, anche contemporaneamente; dunque, è ragionevole considerare una direttività complessiva diversa da quella indicata dalla ISO. In aggiunta, alle basse frequenze, anche i comportamenti modali dei due uffici possono influenzare gli spettri misurati.

6 | Conclusioni

Il presente lavoro ha proposto un metodo basato su tecniche di machine learning per separare e misurare differenti sorgenti sonore attraverso monitoraggi fonometrici. Questo metodo è stato ispirato dall'attenzione crescente, anche nel campo dell'acustica, verso il machine learning. La possibilità di sfruttare grandi quantità di dati provenienti da monitoraggi a lungo termine permette di utilizzare algoritmi sofisticati per compiere analisi più accurate e dettagliate rispetto alle tecniche usate oggi nella comune prassi tecnica. L'uso di alcune metriche, ad esempio dei livelli percentili, si basa su assunzioni temporali difficilmente dimostrabili. Inoltre, il significato fisico stesso dei livelli percentili risulta poco accurato. Il loro utilizzo è basato su alcune regole pratiche. Ad esempio, in contesti con rumori poco fluttuanti L_{50} sarà vicino a L_{eq} . Al contrario, L_{eq} sarà vicino a L_{10} e sarà maggiore di L_{90} di circa 10 dB o più. Il metodo qui proposto invece sfrutta i punti notevoli delle distribuzioni statistiche dei fenomeni misurati. Con l'utilizzo dell'algoritmo Gaussian Mixture Model è possibile separare i differenti contributi di differenti sorgenti sonore presenti nei monitoraggi a lungo termine in contesti complessi. Il metodo è stato validato e le sue assunzioni teoriche sono dimostrate in diversi lavori. L'uso dei soli livelli di pressione sonora permette inoltre di preservare la privacy degli ambienti poiché non è necessaria una registrazione audio per compiere la separazione. Dettagli del metodo e le sue applicazioni sono rimandati alla bibliografia di riferimento. Ulteriori misure permetteranno di affinare il metodo e ricavare soglie più precise per il riconoscimento delle sorgenti. L'uso del metodo proposto affiancato alla comune prassi tecnica permetterebbe ai tecnici acustici di ampliare sostanzialmente le capacità di analisi di vari scenari complessi.

Conclusions

The present work has proposed a method based on machine learning techniques to separate and measure different sound sources through sound level monitoring. This method was inspired by the growing attention towards machine learning, also in the field of acoustics. The chance of exploiting large amounts of data from long-term monitoring allows sophisticated algorithms to perform more accurate and detailed analyses compared to techniques commonly used in current technical practice. Certain metrics, such as percen-

tile levels, are based on temporally difficult-to-prove assumptions. Furthermore, the physical meaning of percentile levels is not very accurate. Their use is based on some practical rules. For example, L_{50} will be close to L_{eq} in contexts with less fluctuating noise. Conversely, L_{eq} will be close to L_{10} and greater than L_{90} by about 10 dB or more. The method proposed here instead exploits the notable points of the statistical distributions of the measured phenomena. Using the Gaussian Mixture Model algorithm, separating the different contributions of sound sources present in long-term monitoring in complex contexts is possible. The method has been validated, and its theoretical assumptions have been demonstrated in various works. Using only sound pressure levels also preserves the privacy of environments since audio recording is not necessary to perform the separation. Details of the method and its applications are deferred to the reference bibliography. Further measurements will allow for refining the method and deriving more precise thresholds for source recognition. Using the proposed method alongside common technical practices would substantially expand the capabilities of acoustic technicians to analyze various complex scenarios.

Bibliografia

- [1] IEC 61672-1:2013 | IEC Webstore, (n.d.). <https://webstore.iec.ch/publication/5708> (accessed February 20, 2024).
- [2] H. Sato, J.S. Bradley, Evaluation of acoustical conditions for speech communication in working elementary school classrooms, *The Journal of the Acoustical Society of America* 123 (2008) 2064–2077. <https://doi.org/10.1121/1.2839283>.
- [3] M. Hodgson, R. Rempel, S. Kennedy, Measurement and prediction of typical speech and background-noise levels in university classrooms during lectures, *The Journal of the Acoustical Society of America* 105 (1999) 226–233. <https://doi.org/10.1121/1.424600>.
- [4] D. De Salvio, D. D’Orazio, Effectiveness of acoustic treatments and PA redesign by means of student activity and speech levels, *Applied Acoustics* 194 (2022) 108783. <https://doi.org/10.1016/j.apacoust.2022.108783>.
- [5] K. Hummel, E. Ryherd, X. Cheng, B. Lowndes, Relating clustered noise data to hospital patient satisfaction, *The Journal of the Acoustical Society of America* 154 (2023) 1239–1247. <https://doi.org/10.1121/10.0020760>.
- [6] D. De Salvio, D. D’Orazio, M. Garai, Unsupervised analysis of background noise sources in active offices, *The Journal of the Acoustical Society of America* 149 (2021) 4049–4060. <https://doi.org/10.1121/10.0005129>.
- [7] D. De Salvio, M.J. Bianco, P. Gerstoft, D. D’Orazio, M. Garai, Blind source separation by long-term monitoring: A variational autoencoder to validate the clustering analysis, *The Journal of the Acoustical Society of America* 153 (2023) 738–750. <https://doi.org/10.1121/10.0016887>.
- [8] D. De Salvio, G. Fratoni, D. D’Orazio, M. Garai, Assessing human activity noise in workspaces using machine learning and numerical models, *INTER-NOISE and NOISE-CON Congress and Conference Proceedings* 265 (2023) 5259–5269. https://doi.org/10.3397/IN_2022_0767.
- [9] M. Cingolani, D. De Salvio, D. D’Orazio, M. Garai, Clustering analysis of noise sources in healthcare facilities, *Applied Acoustics* 214 (2023) 109660. <https://doi.org/10.1016/j.apacoust.2023.109660>.
- [10] Y.-J. Choi, Evaluation of acoustical conditions for speech communication in active university classrooms, *Applied Acoustics* 159 (2020) 107089. <https://doi.org/10.1016/j.apacoust.2019.107089>.
- [11] M.C. Cutler, M.R. Cook, M.K. Transtrum, K.L. Gee, Data-driven decomposition of crowd noise from indoor sporting events, *The Journal of the Acoustical Society of America* 155 (2024) 962–970. <https://doi.org/10.1121/10.0024724>.
- [12] D. D’Orazio, D. De Salvio, L. Anderlucci, M. Garai, Measuring the speech level and the student activity in lecture halls: Visual-vs blind-segmentation methods, *Applied Acoustics* 169 (2020) 107448. <https://doi.org/10.1016/j.apacoust.2020.107448>.
- [13] Y. Hasegawa, E. Ryherd, Clustering acoustical measurement data in pediatric hospital units, *The Journal of the Acoustical Society of America* 148 (2020) 265–277. <https://doi.org/10.1121/10.0001584>.
- [14] M.J. Bianco, P. Gerstoft, J. Traer, E. Ozanich, M.A. Roch, S. Gannot, C.-A. Deledalle, Machine learning in acoustics: Theory and applications, *The Journal of the Acoustical Society of America* 146 (2019) 3590–3628. <https://doi.org/10.1121/1.5133944>.
- [15] E. Ozanich, A. Thode, P. Gerstoft, L.A. Freeman, S. Freeman, Deep embedded clustering of coral reef bioacoustics, *The Journal of the Acoustical Society of America* 149 (2021) 2587–2601. <https://doi.org/10.1121/10.0004221>.
- [16] M.J. Bianco, S. Gannot, E. Fernandez-Grande, P. Gerstoft, Semi-Supervised Source Localization in Reverberant Environments With Deep Generative Modeling, *IEEE Access* 9 (2021) 84956–84970. <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2021.3087697>.
- [17] W.F. Jenkins II, P. Gerstoft, M.J. Bianco, P.D. Bromirski, Unsupervised Deep Clustering of Seismic Data: Monitoring the Ross Ice Shelf, Antarctica, *Journal of Geophysical Research: Solid Earth* 126 (2021) e2021JB021716. <https://doi.org/10.1029/2021JB021716>.
- [18] J. Neri, R. Badeau, P. Depalle, Unsupervised Blind Source Separation with Variational Auto-Encoders, in: *2021 29th European Signal Processing Conference (EUSIPCO)*, IEEE, Dublin, Ireland, 2021: pp. 311–315. <https://doi.org/10.23919/EUSIPCO54536.2021.9616154>.
- [19] C.C. Aggarwal, C.K. Reddy, eds., *Data Clustering: Algorithms and Applications*, 1st edition, Chapman and Hall/CRC, Boca Raton, 2013.
- [20] C.M. Bishop, N.M. Nasrabadi, *Pattern recognition and machine learning*, Springer, 2006. <https://link.springer.com/book/9780387310732> (accessed February 20, 2024).
- [21] D.H. Wolpert, W.G. Macready, No free lunch theorems for optimization, *IEEE Transactions on Evolutionary Computation* 1 (1997) 67–82. <https://doi.org/10.1109/4235.585893>.
- [22] G.E.P. Box, D.R. Cox, An Analysis of Transformations, *Journal of the Royal Statistical Society: Series B (Methodological)* 26 (1964) 211–243. <https://doi.org/10.1111/j.2517-6161.1964.tb00553.x>.
- [23] G.J. McLachlan, S.X. Lee, S.I. Rathnayake, Finite Mixture Models, *Annual Review of Statistics and Its Application* 6 (2019) 355–378. <https://doi.org/10.1146/annurev-statistics-031017-100325>.
- [24] J. Shao, *Mathematical statistics*, Springer Science & Business Media, 2003.
- [25] X.-L. Meng, D. Van Dyk, The EM Algorithm – an Old Folk-song Sung to a Fast New Tune, *Journal of the Royal Statistical*

- Society: Series B (Methodological) 59 (1997) 511-567. <https://doi.org/10.1111/1467-9868.00082>.
- [26] T. Caliński, J. Harabasz, A dendrite method for cluster analysis, *Communications in Statistics* 3 (1974) 1-27. <https://doi.org/10.1080/03610927408827101>.
- [27] D.L. Davies, D.W. Bouldin, A Cluster Separation Measure, *IEEE Trans. Pattern Anal. Mach. Intell. PAMI-1* (1979) 224-227. <https://doi.org/10.1109/TPAMI.1979.4766909>.
- [28] P.J. Rousseeuw, Silhouettes: A graphical aid to the interpretation and validation of cluster analysis, *Journal of Computational and Applied Mathematics* 20 (1987) 53-65. [https://doi.org/10.1016/0377-0427\(87\)90125-7](https://doi.org/10.1016/0377-0427(87)90125-7).
- [29] R. Tibshirani, G. Walther, T. Hastie, Estimating the number of clusters in a data set via the gap statistic, *Journal of the Royal Statistical Society: Series B (Statistical Methodology)* 63 (2001) 411-423. <https://doi.org/10.1111/1467-9868.00293>.
- [30] UNI 11532-2:2020 – UNI Ente Italiano di Normazione, (n.d.). <https://store.uni.com/uni-11532-2-2020> (accessed February 28, 2024).
- [31] 2023 ASHRAE Handbook – HVAC Applications | ashrae.org, (n.d.). www.ashrae.org/technical-resources/ashrae-handbook/2023-ashrae-handbook-hvac-applications (accessed February 28, 2024).
- [32] UNI EN 1793-3:1999 – UNI Ente Italiano di Normazione, (n.d.). <https://store.uni.com/uni-en-1793-3-1999> (accessed February 28, 2024).
- [33] A. Can, L. Leclercq, J. Lelong, D. Botteldooren, Traffic noise spectrum analysis: Dynamic modeling vs. experimental observations, *Applied Acoustics* 71 (2010) 764-770. <https://doi.org/10.1016/j.apacoust.2010.04.002>.
- [34] UNI EN ISO 3382-3:2022 – UNI Ente Italiano di Normazione, (n.d.). <https://store.uni.com/uni-en-iso-3382-3-2022> (accessed February 28, 2024).
- [35] J.H. Rindel, C.L. Christensen, A.C. Gade, Dynamic sound source for simulating the Lombard effect in room acoustic modeling software, in: *INTER-NOISE and NOISE-CON Congress and Conference Proceedings*, Institute of Noise Control Engineering, 2012: pp. 954-966. www.odeon.dk/pdf/C118-IN12_Paper%20209_Rindel_Christensen.pdf (accessed February 28, 2024).
- [36] G. Leembruggen, J. Verhave, S. Feistel, L. Holtzem, P. Mapp, H. Sato, T. Steinbrecher, S. Van Wijngaarden, The effect on sti results of changes to the male test-signal spectrum, *Proc. IOA* 38 (2016) 78-87.

Progettazione integrata con cambio di destinazione d'uso di un'aula universitaria per l'ottimizzazione del comfort acustico secondo i CAM

Alessia Nora^{1,a*} | Luca Barbaresi^a | Dario D'Orazio^a | Giulia Fratoni^a

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

* Autore di riferimento: alessia.nora3@unibo.it

Ricevuto: 27/2/2024

Accettato: 25/5/2024

DOI: 10.3280/ria1-2024oa17365

ISSNe: 2385-2615

Il presente lavoro riguarda la progettazione integrata acustica ed illuminotecnica di una sala universitaria, con la destinazione d'uso precedente di palestra, che a seguito di tale progetto verrà adibita ad aula magna del Campus universitario di Forlì. Il processo progettuale prevede l'utilizzo di formule analitiche previsionali e di simulazioni numeriche, focalizzandosi sui parametri acustici Tempo di riverberazione T_{20} , Indice di Chiarezza C_{50} and Speech Transmission Index STI. La geometria dell'ambiente e i vincoli progettuali non hanno permesso il raggiungimento dei requisiti di qualità acustica con soli trattamenti di acustica passiva. Nella sala è stata valutata necessaria l'introduzione di un sistema di amplificazione per soddisfare i requisiti della UNI 11532-2:2020, resa cogente dai CAM (Criteri Ambientali Minimi).

Parole chiave: sistema di amplificazione, progettazione integrata, acustica delle aule, CAM

Integrated design with change of use of a university lecture hall for optimization of acoustic comfort according to CAM

The present work concerns the integrated acoustic and lighting design of a university hall, previously used as a gymnasium, which will be used as a lecture hall on the Forlì University Campus. The design process involves using predictive analytical formulas and numerical simulations, focusing on the acoustic parameters Reverberation Time T_{20} , Clarity Index C_{50} and Speech Transmission Index STI. The room geometry and design constraints did not allow the acoustic quality requirements to be achieved with only passive acoustic treatments. In the room, an amplification system was necessary to meet the requirements of UNI 11532-2:2020, made mandatory by CAM.

Keywords: public address, integrated design, classroom acoustic, CAM

1 | Introduzione

L'entrata in vigore nel 2017 dei Criteri Ambienti Minimi (CAM) [1] per l'edilizia ha dato un forte impulso per la progettazione acustica degli ambienti pubblici e in particolare per gli edifici scolastici. Le scuole infatti devono soddisfare almeno i valori di riferimento di requisiti acustici passivi e comfort acustico interno indicati nella UNI 11532-2 [2].

Nelle aule a scopo didattico aspetto di fondamentale rilevanza è l'intelligibilità del parlato, ovvero la comprensibilità di un suono da parte di un ascoltatore in modo da incrementare la comunicazione di informazioni tra docenti e studenti. Diversi studi indicano che una buona comprensione migliora la capacità di concentrazione degli studenti e riduce i rischi per la salute degli insegnanti derivanti da un uso eccessivo della voce nel tempo [3,4]. Infatti, aumentando il rumore di fondo nell'aula, il docente tende inconsciamente ad alzare il tono della voce (effetto *Lombard*), aumentando così lo sforzo vocale. Inoltre, l'intelligibilità dipende dal rapporto segnale-rumore (SNR), ovvero la differenza tra il livello sonoro utile (la voce del

docente) e il livello sonoro del rumore di fondo (rumore degli impianti, dalle infrastrutture adiacenti e brusio degli studenti). Una bassa intelligibilità comporta una scarsa comprensione delle informazioni da parte degli studenti, riducendo la loro concentrazione e aumentando la probabilità di interazioni fra studenti, aumentando così il rumore di fondo. Un adeguato comfort acustico è necessario per ridurre al minimo lo sforzo vocale dell'oratore e facilitare la comprensione del parlato per gli ascoltatori. In questo contesto, un sistema di diffusione sonora (*Public Address PA*) ben progettato permette di raggiungere un livello di pressione sonora adeguato su un'ampia porzione di pubblico, come richiesto da sale conferenze di grandi dimensioni. Nel caso della ristrutturazione di un'aula, la valutazione della qualità acustica si basa solitamente solo su criteri relativi all'ambiente, mentre la valutazione dovrebbe includere parametri dinamici oggettivi provenienti da coloro che vivono questi spazi: studenti e insegnanti. Infatti, è noto da letteratura [5] come parametri quali il rumore di fondo, il brusio degli studenti (*Student Activity*) e il rapporto segnale-rumore variano a seguito di un trattamento acustico nelle aule.

Nella progettazione della sala si è inoltre tenuto conto di quanto emerso da diversi studi, secondo cui anche le informazioni visive contribuiscono alla comprensione del parlato [6,7].

¹ Vincitrice del premio "Amedeo Giacomini" edizione 2024.

Di conseguenza, in contesti educativi, la visibilità dell'oratore è un elemento cruciale per creare un ambiente confortevole per gli studenti o per migliorare l'ascolto in ambienti rumorosi [8,9].

Basandosi su una progettazione integrata, i lavori di miglioramento dell'acustica interna della sala hanno riguardato il trattamento acustico passivo, con l'introduzione di materiali nella sala e attivo, con la progettazione dell'impianto di amplificazione (PA).

1.1 | Descrittori T, C₅₀ e STI

I criteri oggettivi e misurabili considerati secondo normativa UNI 11532-2 [2], resa cogente dai CAM [1], come descrittori della qualità della comunicazione verbale all'interno delle aule scolastiche sono il Tempo di riverberazione T, l'indice di Chiarezza C₅₀ e *Speech Transmission Index* STI. I metodi di previsione per i descrittori sono indicati nella UNI 11532-1 [10]. Il tempo di riverberazione rappresenta il tempo necessario affinché il livello di pressione sonora in un punto diminuisca di 60 dB dopo lo spegnimento di una sorgente sonora in regime stazionario. Data la difficoltà tecnica nel registrare un decadimento completo di 60 dB, comunemente si valuta il tempo di riverberazione estrapolando il decadimento da -5 a -25 dB, (indicato con T₂₀). Secondo la norma UNI 11532-2 [2], i valori di Tempo di riverberazione considerano sempre lo stato arredato e occupato degli ambienti. Tuttavia, le misure sono effettuate nello stato arredato e non occupato dell'ambiente (T_{inocc}), quindi è necessario aggiungere l'assorbimento acustico delle persone (all'80% dell'occupazione totale) per ogni banda di ottava compresa tra 125 Hz e 4.000 Hz.

$$T_{occ} = \frac{T_{inocc}}{1 + \frac{\Delta A_{persone}}{0,16 V}} \quad (s) \quad (1)$$

Dove:

- T_{occ} è il tempo di riverberazione allo stato occupato della sala, in s;
- T_{inocc} è il tempo di riverberazione allo stato non occupato della sala, in s;
- V è il volume della sala, in m³;
- ΔA_{persone} è la superficie fonoassorbente equivalente aggiuntiva per ogni persona, secondo l'appendice C della norma UNI 11532-2, in m² Sabine.

La sala oggetto di studio risulta appartenente alla categoria A2 di aule magne, secondo normativa UNI 11532-2 [2], e il tempo di riverberazione ottimale è espresso dalla formula seguente:

$$T_{ott} = 0.37 \log V - 0.14 \quad (s) \quad (2)$$

Dove V è il volume della sala, in m³.

Mentre il tempo di riverberazione è una proprietà della sala, la chiarezza del suono dipende dalla posizione delle sorgenti sonore e dei ricevitori, quindi deve essere considerata una proprietà del punto di ascolto. Le direttive della UNI

11532-2 definiscono, infatti, delle posizioni obbligatorie distribuite spazialmente nell'aula di sorgenti sonore e ricevitori durante le misurazioni *ante operam* e *post operam*. L'indice di Chiarezza C₅₀ è definito come segue:

$$C50 = \frac{\int_0^{50} p(t)^2 dt}{\int_{50}^{\infty} p(t)^2 dt} \quad (dB) \quad (3)$$

Dove 50 ms è il riferimento temporale che divide il suono diretto e prime riflessioni (utili per il parlato), dalle successive riflessioni (dannose per il parlato). Mentre si indica come p(t) la pressione sonora istantanea della risposta all'impulso. Lo *Speech Transmission Index* STI, definito nella norma IEC 60268-16 [11], quantifica l'effetto combinato dell'interferenza del rumore di fondo e della riverberazione sulla riduzione di intelligibilità del parlato. I valori di STI variano da 0 a 1, dove il valore 0 indica nessuna intelligibilità ed il valore 1 un'intelligibilità ideale. La norma IEC 60268-16 [11] e la normativa nazionale UNI 11532-1 [10] identificano come "buono" un valore di STI compreso tra 0.6 e 0.75, "eccellente" un valore maggiore di 0.75.

2 | Metodo

2.1 | Caso studio

Il caso studio è la Palestra Campostrino, immobile di interesse storico-artistico del Campus Universitario di Forlì, che al termine dell'intervento di riqualificazione verrà adibito ad aula Magna. L'edificio è situato nel centro storico di Forlì e ha un importante excursus storico in quanto la prima palestra fu realizzata nel 1888. Recenti ricerche archivistiche attribuiscono il progetto dell'elegante prospetto al grande architetto della Forlì del Duce Enrico Del Debbio. La sala (vedi Fig. 1) ha una pianta regolare (20 m × 11,5 m) e un volume di 1850 m³ ed è caratterizzata da una copertura a falde. Le 3 pareti laterali sono in cartongesso, mentre quella di fondo è una parete rigida intonacata. La presenza di questi materiali di rivestimento nella sala è dovuta al fatto che l'edificio, prima di essere ceduto dal Comune di Forlì all'Università, è stato oggetto di un intervento di ristrutturazione volto al ripristino degli ambienti, all'adeguamento impiantistico e al miglioramento delle prestazioni energetiche dell'involucro. Tuttavia, le opere realizzate non erano state pensate per una destinazione d'uso prettamente didattica della sala. Nella progettazione, inoltre si è dovuto tener conto di alcuni vincoli dati dallo stato di fatto e in particolare imposti dalla Soprintendenza per il valore storico-artistico dell'edificio e dai vigili del fuoco per assicurare le vie di fuga interne all'aula.

2.2 | Misure ante operam

La campagna di misura, in linea con le normative vigenti, ha permesso di acquisire i parametri per la corretta caratterizzazione dell'aula. Il 13 ottobre 2022 è stata eseguita

una campagna di misure acustiche a sala priva di arredamento – come si trovava allo stato di fatto – e in stato di non occupazione secondo la norma ISO 3382 [12,13]. Un dodecaedro omnidirezionale è stato utilizzato come sorgente sonora e un microfono monoaurale come ricevitore. Le risposte all'impulso sono state acquisite lanciando un segnale *Exponential Sine Sweep* di 512 K e campionato a 48 kHz. Secondo la norma ISO 3382-2 [13], sono state scelte due posizioni di sorgente sonora: una nella possibile posizione dell'oratore, l'altra decentrata e più vicina agli ascoltatori e 14 ricevitori (vedi Fig. 1). Un'analisi accurata è stata effettuata sui parametri T_{20} , C_{50} (nell'intervallo 125 Hz-4000 Hz) e STI. Con un tempo di riverberazione T_{20} di 1.94 s e un valore di C_{50} di -0.6 dB, i risultati delle misure dimostrano l'inadeguatezza delle condizioni acustiche della sala rispetto ai requisiti minimi dei criteri di intelligibilità (UNI 11532-2). Il livello di rumore di fondo L_{eq} è stato misurato all'interno dell'ambiente utilizzando un fonometro di classe 1 ed effettuando, dato il carattere fortemente stazionario del rumore, un'acquisizione di 30 secondi per ogni misura. Durante le misure, il sistema HVAC è rimasto in funzione e non è stato rilevato un significativo rumore da traffico durante la campagna di misure. Il livello di rumore di fondo è un parametro che definisce il comfort interno degli ambienti ed è stato anche necessario per definire il parametro STI nella successiva progettazione tramite simulazione numerica e metodo analitico previsionale.

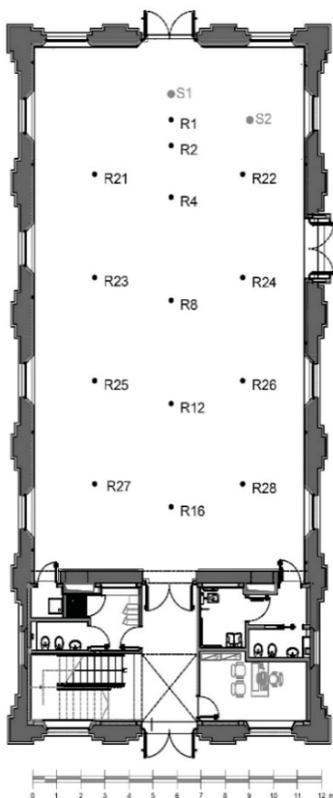


Fig. 1 – Planimetria della sala: posizioni delle sorgenti sonore (S1, S2) e dei ricevitori (R1-R28) durante le misurazioni
Plan of the hall: sound sources (S1, S2) and receivers positions (R1-R28) used in measurements campaign

2.3 | Il modello numerico e la sua calibrazione

A seguito delle misure, è stato creato anche un modello digitale per la simulazione degli interventi migliorativi da apportare alla sala. La calibrazione del modello digitale ha permesso di ottenere dal modello previsionale gli stessi risultati delle misure in situ. Il modello, oltre che essere uno strumento utile per svolgere ulteriori analisi sullo stato di fatto, è necessario per progettare interventi migliorativi. Il modello numerico è stato creato su SketchUp e poi con un plug in è stato importato su Odeon Room Acoustics, software di simulazione via *ray-tracing* (vedi Fig. 2). Il processo di modellazione è stato eseguito secondo le linee guida del manuale di Odeon [14] e secondo lo stato dell'arte della letteratura scientifica [16]. Nel modello si sono collocati sorgenti, ricevitori e sono stati attribuiti i materiali alle superfici. Per simulare la condizione iniziale dell'aula sono stati utilizzati materiali con differenti proprietà acustiche: superfici riflettenti (pareti, soffitti, pavimenti, vetri) ed elementi più assorbenti (Topakustik), come riportati in Tab. 1. Per la calibrazione del modello sono stati presi in considerazione come descrittori fondamentali del comportamento acustico dell'aula il Tempo di Riverberazione T_{20} , la Chiarezza C_{50} e *Speech Transmission Index* STI. La calibrazione è stata una fase iterativa, considerata effettuata quando la differenza tra i valori misurati e quelli simulati era inferiore all'intervallo della *Just Noticeable Difference* (JND), secondo normativa ISO 3382-1 [12].

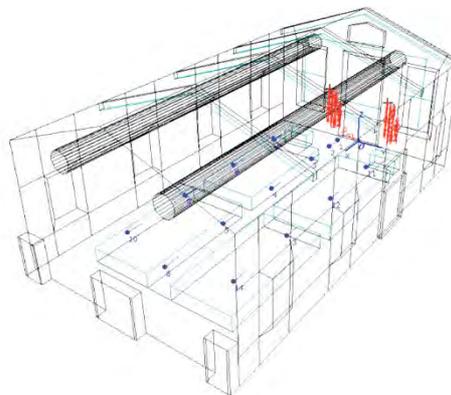


Fig. 2 – Modello numerico realizzato con il software Odeon
Digital twin created with Odeon software

2.4 | Simulazioni numeriche ed analitiche

La fase di simulazione numerica, combinata con i metodi previsionali analitici, ha permesso di effettuare una stima previsionale del comportamento dell'ambiente con l'introduzione di trattamenti acustici. Il modello numerico è stato simulato con il software Odeon [14]. La simulazione previsionale analitica si avvale, invece, della formula del tempo di riverberazione di Sabine (riportata nella formula 5) tenendo conto dell'area equivalente di persone che occupano l'80% dell'ambiente, come specificato dalla normativa UNI 11532-2 [2].

$$T_{occ} = 0.16 \frac{V}{\sum \alpha_j S_j + A_{obj} + 0.8N \Delta A_{persone}} \quad (s) \quad (4)$$

Dove:

- V è il volume della sala, in m^3 ;
- α_j è il coefficiente di assorbimento acustico della superficie j -esima;
- S_j è la superficie j -esima delle superfici dell'involucro, in m^2 ;
- A_{obj} e la j -esima area di assorbimento equivalente degli elementi di arredo dell'ambiente, in m^2 Sabine;
- N è il numero di persone considerando l'80% dell'occupazione;
- $\Delta A_{persone}$ è la superficie fonoassorbente equivalente aggiuntiva per ogni persona, secondo l'appendice C della norma UNI11532-2, in m^2 Sabine.

Nella corrispondenza tra formule previsionali [2, 21, 22], i risultati delle simulazioni numeriche mediante *ray-tracing* e misurazioni, bisogna tener conto di alcuni aspetti:

- le superfici equivalenti, o contigue, sono spesso trattate in modo omogeneo nella modellazione, a differenza di quanto accade nella realtà. Questo porta, in genere, a sottostimare l'assorbimento acustico di materiali ad alta frequenza;
- la diffusione del campo sonoro dovuta a superfici scatteranti o bordi di diffrazione.

L'introduzione di sedute nella sala, anche nell'ipotesi di assenza di assorbimento acustico delle superfici delle medesime, ha come conseguenza un decremento del tempo di riverberazione e l'aumento della diffusione del campo sonoro per effetti di diffrazione di bordo delle poltrone [15]. Simulazioni numeriche (e misure acustiche) mettono in evidenza questo decremento, che invece le formule previsionali [2, 21, 22], non riescono a considerare. Tale effetto in generale cresce con la frequenza. Le ragioni evidenziate giustificano la differenza tra le curve in nella Fig. 3 alle medio alte frequenze.

Tab. 1 – Coefficienti di scattering (s) e di assorbimento (α) utilizzati per le simulazioni numeriche ed analitiche
Scattering (s) and absorption (α) coefficients used for numerical and analytical simulations

	Ref.	s						α									
		125 Hz	250 Hz	500 Hz	1000 Hz	2000 Hz	4000 Hz	125 Hz	250 Hz	500 Hz	1000 Hz	2000 Hz	4000 Hz				
Tapakustik	[17]	0.10	0.27	0.30	0.40	0.33	0.29	0.20									
Pareti in cartongesso	[2]	0.05	0.15	0.19	0.07	0.07	0.06	0.05									
Pareti in muratura	[16]	0.05	0.05	0.04	0.03	0.04	0.05	0.05									
Finestre	[2]	0.05	0.18	0.06	0.04	0.03	0.02	0.02									
Pavimento	[16]	0.05	0.01	0.02	0.02	0.02	0.02	0.02									
Sedute	[18]	0.70	0.41	0.56	0.71	0.62	0.65	0.63									

Nel presente lavoro i parametri di intelligibilità del parlato (C_{50} e STI) sono stati simulati avvalendosi del modello numerico comprensivo del rumore di fondo ed è stato considerato come parametro significativo per la caratterizzazione acustica dell'aula la Chiarezza C_{50} , sebbene non sia obbligatoria per aule di grandi dimensioni ($V > 250m^3$) secondo normativa UNI11532-2 [2].

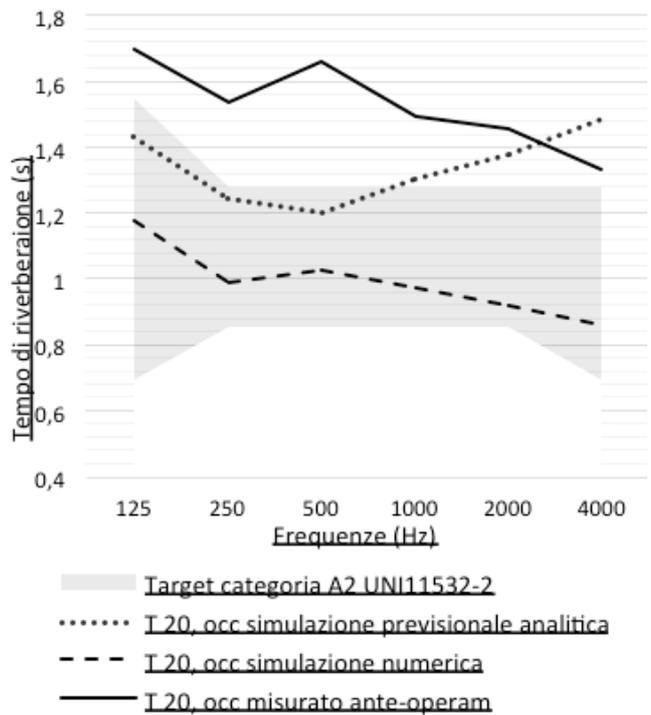


Fig. 3 – Tempo di riverberazione in funzione della banda di ottava della frequenza in condizioni occupate (all'80% come da normativa UNI11532-2) della sala in condizioni di stato di fatto ante operam, a confronto con le simulazioni analitiche e numeriche della sala con trattamenti acustici passivi
Reverberation time as a function of octave band of the frequency in occupied conditions (at 80% as per UNI11532-2) of the ante operam hall, compared with analytical and numerical simulations of the hall with passive acoustic treatments

3 | Design

La proposta progettuale di intervento acustico nella sala si compone di due tipologie di trattamento, in prima istanza si è considerato un trattamento di tipo passivo, con l'introduzione di sedute con proprietà acustiche assorbenti e in seconda istanza è risultata necessaria l'installazione di un sistema di amplificazione (PA). I risultati delle simulazioni, effettuate tenendo conto del rumore di fondo, dimostrano che i trattamenti acustici passivi non sono sufficienti a raggiungere il valore target di STI. La soluzione progettuale ottimale analizzata nelle simulazioni, poi successivamente confermata dalle misure *post operam*, è stata l'introduzione nella sala di un sistema di amplificazione.

3.1 | Trattamenti acustici passivi

La sala, allo stato di fatto, presenta già un'implementazione acustica del soffitto, che è rivestito di Topakustik (vedi Tab. 1). Il materiale sfrutta le proprietà assorbenti dei risonatori di Helmholtz e delle membrane vibranti. Questo tipo di pannello ha un elevato potere assorbente alle medie e alte frequenze. Inoltre, il precedente progetto di recupero prevedeva anche l'installazione di diffusori acustici alle pareti negli spazi tra le finestre (mai realizzati) e l'isolamento termico interno con rivestimenti in cartongesso. Alla luce dei precedenti trattamenti acustici della sala, non era più possibile gestire altre applicazioni sulle superfici interne (pannelli fonoassorbenti e/o diffondenti), pertanto è stato necessario intervenire solo attraverso una idonea scelta di sedute in tessuto. Le simulazioni hanno preso in considerazione due scelte principali: sedute in stoffa o in pelle. Le prime hanno soddisfatto ampiamente lo standard richiesto grazie al loro elevato fonoassorbimento. Tuttavia, la scelta finale è ricaduta sulle sedute in pelle, che adempiono ai requisiti acustici ma al contempo garantiscono i requisiti igienici richiesti dal committente.

I trattamenti acustici passivi nell'aula sono volti a raggiungere i requisiti previsti dalla norma UNI 11532-2 e con evidenze dalla letteratura scientifica che descrivono come ottenere un buon posizionamento del materiale. Pertanto, il tempo di riverberazione in stato di occupazione T_{occ} è stato calcolato con la formula della UNI 11532-2, come si vede nel

paragrafo 6.3 della normativa e riportato nella formula 1. Con la formula previsionale del tempo di riverberazione ottimale T_{ott} , è stato possibile verificare i target normativi dei valori del tempo di riverberazione in modo che rientrassero della finestra di valori richiesti dalla normativa (vedi Fig. 3). Questo ha permesso, insieme al confronto con le simulazioni numeriche, di avere una rapida valutazione della correttezza delle proposte progettuali. Per il rispetto degli standard normativi sono stati considerati i parametri acustici T_{20} e di intelligibilità del parlato, C_{50} e STI, riferimento fondamentale per valutare il comportamento complessivo del fenomeno sonoro nell'ambiente.

3.2 | Sistema line array

All'interno di grandi spazi universitari è buona norma progettare e installare dei sistemi audio con altoparlanti line array. Un sistema line array è un insieme di altoparlanti allineati in senso verticale in modo da costituire una fonte sonora cilindrica. Aumentando il numero di elementi, e quindi la lunghezza della sorgente, si ottiene un livello di pressione sonora più elevato e uniforme. La distanza tra gli altoparlanti adiacenti è calcolata in modo da creare interferenze costruttive, consentendo l'invio di onde sonore con un minor decadimento in funzione della distanza rispetto ai tradizionali sistemi di altoparlanti (schematizzabili come sorgenti puntiformi). Una "linea pulsante", quale è un line array, ha direttività $Q > 1$ e un'attenuazione spaziale proporzionale alla distanza, con una perdita di 3 dB al raddoppio della distanza. Mentre una "sferetta pulsante", con direttività $Q = 1$, ha un'attenuazione spaziale che aumenta con il quadrato della distanza, con una perdita di 6 dB al raddoppio della distanza. L'attenuazione di un line array di 3 dB è valida solo all'interno delle zone di Fresnel, che sono le regioni comprese tra il campo vicino effettivo (2-3 metri dalla sorgente) e le zone di Fraunhofer, o campo lontano. Le zone di Fresnel possono essere calcolate utilizzando l'equazione:

$$\text{Zone di Fresnel} < \frac{2L^2}{\lambda}$$

Dove:

- L rappresenta la lunghezza del line array, in metri;
- λ indica la lunghezza d'onda del suono, in metri.

In un'aula magna la disposizione del sistema di diffusione sonora (PA) è un punto critico per l'intelligibilità del parlato: ha lo scopo di aumentare il valore di STI e di renderlo il più omogeneo in tutta la sala. Per ottenere un buon risultato è necessario un posizionamento accurato, perché una posizione errata del sistema PA potrebbe diminuire il valore di STI, invece di aumentarlo. Infatti, con il supporto del sistema di diffusione sonora, diminuisce l'effetto Lombard e l'insegnante tende a raggiungere il livello minimo di segnale-rumore per avere la massima intelligibilità del parlato possibile, come dimostrato in letteratura scientifica [3,4]. Nella progettazione l'utilizzo della direttività vocale è stato necessario per essere



Fig. 4 – Foto della sala al termine del trattamento acustico passivo (sedute) ed attivo (impianto PA)
Photos of the hall at the end of passive (seating) and active (PA system) acoustic treatment

coerenti tra la qualificazione *ante operam*, la calibrazione del modello numerico e le misure *post operam*. Questo perché la direttività della voce produce risultati più elevati rispetto alla sorgente omnidirezionale utilizzata durante le compagne di misurazioni. Un sistema di amplificazione, grazie al modello di direttività ristretto, permette di focalizzare il segnale vocale sull'area degli studenti e di ottenere un rapporto segnale/ rumore ottimale.

Compatibilmente con la geometria della sala, è stato studiato un posizionamento appropriato per avere un'adeguata copertura dell'area di ascolto, con una buona omogeneità tra tutte le sedute. La soluzione progettuale scelta prevede una coppia di line array, composte ciascuna da due colonne di diffusori ai lati dello schermo a 1 metro di altezza rispetto al pavimento. La disposizione dei trasduttori scelti (Python-KP102) produce uno schema con direttività H/V $90^\circ \times 7^\circ$, ottimizzando la copertura orizzontale senza dispersioni sull'asse verticale. I dodici altoparlanti a cono distanziati garantiscono una bassa distorsione e un buon ascolto sia in campo vicino sia a distanza dal diffusore. Il posizionamento di un diffusore acustico dietro la cattedra è stato ottimizzato per aumentare l'auto-monitoraggio degli insegnanti (*Vocal Support*).

Il guadagno e i ritardi temporali dei line array sono stati impostati in modo da raggiungere una copertura omogenea del suono diretto nell'area di seduta con l'aiuto di un modello

numerico. Utilizzando il software *Odeon Room Acoustics* [14] è stata valutata e quindi ottimizzata la copertura del campo sonoro diretto dei diffusori line array, come mostrato in Fig. 7. Nella progettazione si è tenuto conto del delay temporale del diffusore superiore di ciascuna colonna di line array inclinando di 4° . La configurazione di progetto dell'impianto audio, è stata rispettata, creando di fatto un ponte di progettazione integrata con gli impiantisti elettrici e gli installatori audio/video (vedi Fig. 6).

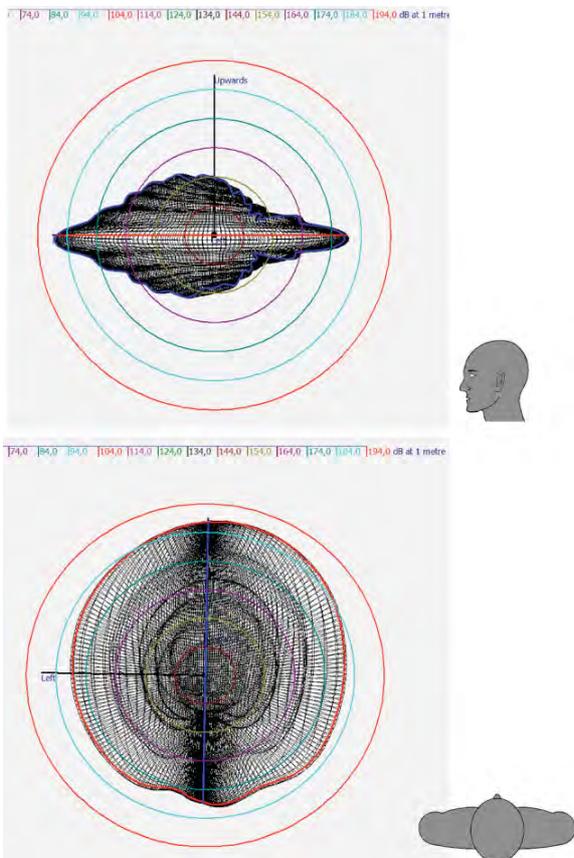


Fig. 5 – Direttività verticale ed orizzontale della colonna di altoparlanti alla frequenza di 1000 Hz
Vertical and horizontal directivity of the speaker column at 1000 Hz frequency



Fig. 6 – Foto del sistema di amplificazione al termine dei lavori di trattamento acustico della sala
Picture of the PA system at the end of the acoustic treatment of the hall

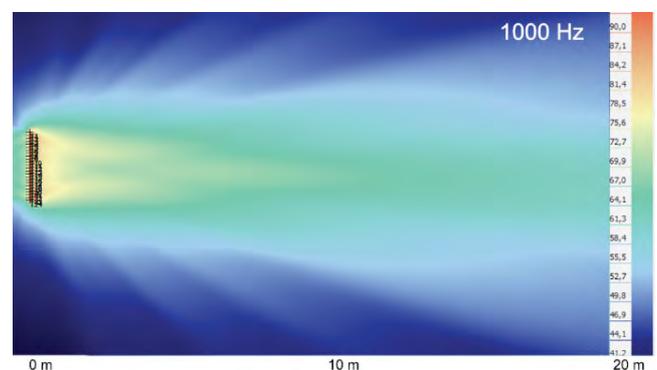


Fig. 7 – Simulazione della direttività verticale dei line array di progetto a 1000 Hz, considerando la profondità di 20 m come riferimento geometrico dell'aula
Simulation of vertical directivity for the design line array at 1000 Hz, considering a depth of 20 m as the geometric reference of the classroom

4 | Risultati

I valori misurati riportati in Tab. 2 mostrano la panoramica dei principali risultati delle misurazioni ante e post operam, i cui valori medi sono calcolati su tutte le posizioni della sorgente e dei ricevitori. I valori misurati tempo di riverberazione (T_{20}), indice di Chiarezza del suono (C_{50}) e intelligibilità del parlato (STI) denotano condizioni acustiche piuttosto scarse per un'adeguata intelligibilità del parlato. L'elaborazione delle misure effettuate conferma la necessità di un trattamento di miglioramento acustico della sala, che allo stato di fatto presenta già un trattamento acustico della copertura. Infatti, le dimensioni e l'altezza della sala, senza trattamento acustico, avrebbero contribuito ad un valore molto più elevato di tempo di riverberazione. In particolare, l'andamento di T_{20} (Fig. 8) mostra un picco nella banda di ottava di 250 Hz, dovuto ad altri fenomeni che si verificano nella sala: la presenza di tessuto rigido, con una cavità retrostante di 30 cm, caratterizzate da un assorbimento per risonanza di membrana. Inoltre, considerando $T = 1.94$ s come tempo medio di riverberazione e $V = 1850$ m³ come volume della sala, è possibile calcolare la frequenza di Schroeder, come segue:

$$f_s \approx 2000 \sqrt{\frac{T}{V}} = 2000 \sqrt{\frac{1.94}{1850}} = 65 \text{ Hz} \quad (5)$$

Il campo riverberante diffuso si può assumere considerando 2 volte la frequenza di Schroeder, pertanto i fenomeni modali all'interno dell'aula interessano parzialmente la banda d'ottava considerata solitamente nell'acustica architettonica, ossia i 125 Hz.

4.1 | Misure post operam

Il collaudo post operam è stato effettuato con lo stesso setup di misura ante operam, ma utilizzando il nuovo sistema PA come sorgente sonora. I risultati mostrano che i diffusori line array hanno una copertura uniforme sui 4 settori di sedute, coprendo anche i posti più lontani, grazie allo schema di direttività del sistema di diffusori. Le misure effettuate dopo l'intervento hanno confermato quanto previsto, ovvero il raggiungimento dei valori di riferimento per tutti i criteri di intelligibilità (vedi Tab. 2). In particolare, l'introduzione dei diffusori line array ha permesso di ottenere il valore target del parametro STI in ogni posizione del ricevitore, altrimenti difficilmente raggiungibile. La verifica di questo parametro di intelligibilità risulta soddisfatta considerando anche il rumore di fondo dell'ambiente, sia con la misura con il nuovo sistema di amplificazione ($STI \geq 0.60$), sia con la misura con la sorgente dodecaedrica ovvero senza utilizzare l'impianto PA ($STI \geq 0.50$). In un'aula di queste dimensioni (profondità di 20 m) e capienza di 178 posti, è solito utilizzare sistemi line array come sistema di amplificazione per assicurare una chiara comprensione del discorso tra insegnanti e studenti [5]. Per tale ragione, la normativa UNI 11532-2 [2] stabilisce requisiti specifici in situazioni simili (con un indice $STI > 0.60$).

Tab. 2 – Confronto dei risultati delle misure ante operam, dei metodi previsionali e dei valori misurati post operam in fase di collaudo. I valori in stato occupato sono calcolati secondo il metodo previsionale fornito dalla UNI 11532-2 [2] (vedi equazione 1). Dove "M" (che indica la gamma delle frequenze medie) e "3" indicano quei valori medi sulle bande centrali di ottava, rispettivamente 500-1000 Hz e 500-1000-2000 Hz

Comparison of the results of ante operam measurements, predictive methods and post operam measured values during testing. Values in occupied state are calculated according to the prediction method provided by UNI 11532-2 [2] (view equation 1). Where "M" (indicating the middle frequency range) and "3" indicate those average values on the middle octave bands, 500-1000 Hz and 500-1000-2000 Hz, respectively

	Ante- operam misurato	Post- operam simulato	Metodo previsionale	Post- operam misurato	Valori Target (Cat. A2 - UNI 11532-2)
$T_{M \text{ inocc}} (s)$	1.94	1.14	1.32	1.10	-
$T_{M \text{ occ}} (s)$	1.58	1.00	1.26	1.02	1.07
$C_{50,3} (dB)$	-0.6	-	-	0.5	≥ 0
STI (senza P.A.)	0.52	0.53	0.33	0.56	≥ 0.50
STI (con P.A.)	0.52	0.68	-	0.63	≥ 0.60

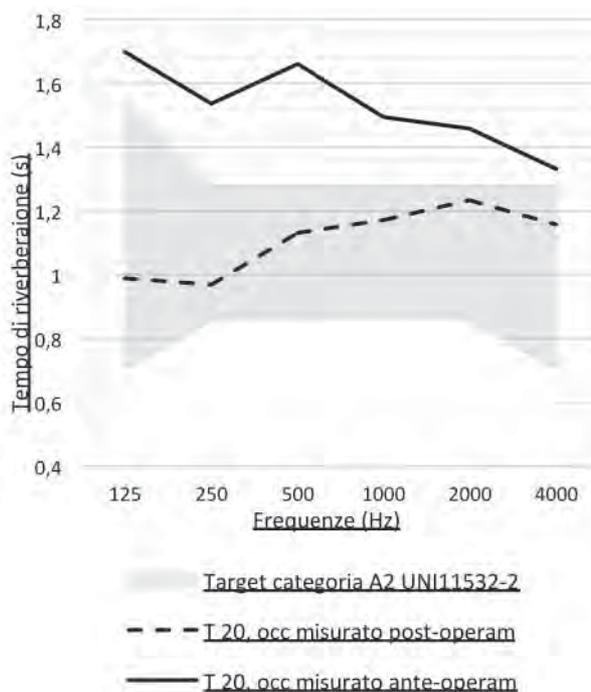


Fig. 8 – Tempo di riverberazione in funzione della banda di ottava della frequenza in condizioni occupate (all'80% come da normativa UNI11532-2) della sala prima e dopo i trattamenti acustici
Reverberation time as a function of octave band frequency in occupied conditions (at 80% as per UNI11532-2) of the room before and after acoustic treatments

5 | Discussione

Nella Fig. 8 viene presentato il confronto dell'andamento in frequenza del tempo di riverberazione T_{20} , mentre nella Fig. 9 si analizza il decadimento spaziale dei livelli di pressione sonora normalizzati (SPL) prima e dopo l'applicazione dei trattamenti acustici nella sala. L'andamento del tempo di riverberazione dopo i tratta-

menti acustici rispecchia l'assorbimento delle sedute scelte (vedi Tab. 1), secondo i rapporti di prova del modello di poltrona [18], presentando un picco di assorbimento alle medie frequenze.

I trattamenti passivi hanno un impatto limitato sul decadimento spaziale di una sorgente sonora sferica, come la voce naturale o un altoparlante tradizionale: si osserva invece che un line array mostra una pendenza visibilmente maggiore nel grafico in Fig. 9. Le misurazioni dei livelli di pressione sonora confermano la distribuzione uniforme del campo sonoro nell'area del pubblico, come era stato valutato tramite simulazioni numeriche con il modello geometrico (vedi Fig. 10). Inoltre, le differenze rilevate (entro 3 dB tra punti massimi e minimi) sono ridotte dal contributo del campo sonoro riverberante. I posti più vicini all'oratore riceveranno anche un utile contributo diretto della voce dell'oratore.

La progettazione integrata della sala ha tenuto conto degli effetti cognitivi degli studenti con particolare riferimento alle relative scelte di sistemi di amplificazione, schermi di proiezione e interventi di correzione acustica passiva. Si è prediletta una disposizione delle sedute che segue il lato lungo della sala, scartando la soluzione sul lato corto della platea perché i compiti visivi e uditivi non coinciderebbero. Infatti il processo di apprendimento nelle lezioni tradizionali, cioè un singolo oratore che parla a un pubblico, coinvolge principalmente due sensi: la vista e l'udito. La concentrazione dello studente,

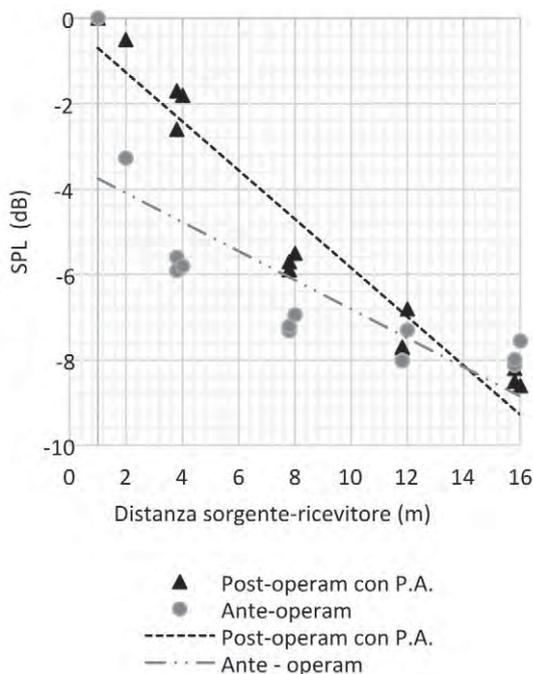
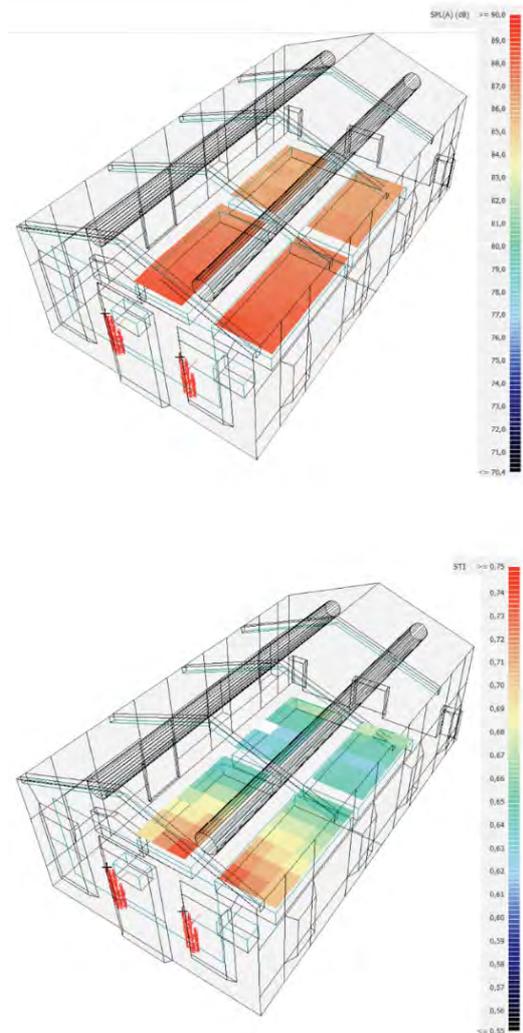


Fig. 9 – Confronto ante e post operam dei livelli di pressione sonora normalizzati (SPL) in funzione della distanza sorgente-ricevitore. I valori di SPL devono essere considerati solo qualitativamente perché non si riferiscono a una sorgente omnidirezionale nel caso post operam con l'introduzione di un sistema PA

Ante and post operam comparison of normalised sound pressure levels (SPLs) as a function of source-receiver distance. The SPL values should only be considered qualitatively because they do not refer to an omnidirectional source in the post operam case with the introduction of a PA system

supportata dalla percezione uditiva e visiva, può peggiorare se la situazione lo costringe a dividere l'attenzione per portare a termine un compito [19]. La percezione uditiva e visiva sono processi cognitivo-percettivi complessi. Anche i compiti uditivi più semplici in contesti reali richiedono una quantità significativa di elaborazione per decodificare suoni complessi, come il parlato [6-7] e [20]. Negli ambienti di apprendimento, la possibilità di vedere l'oratore rappresenta una condizione fondamentale per organizzare uno spazio confortevole per gli studenti o per migliorare le condizioni uditive in ambienti rumorosi [8,9]. Sulla base di queste considerazioni, l'orientamento della stanza diventa fondamentale perché veicola le informazioni visive e supporta la percezione del parlato.



**Fig. 10 – Distribuzione dei valori simulati di SPL(A) e di STI nei settori di sedute (Odeon).
Distribution of simulated SPL(A) and STI values in the seating areas (Odeon)**

La progettazione del sistema di amplificazione è stata integrata dagli impiantisti elettrici e gli installatori audio/video e si riporta in Fig. 11 la configurazione della disposizione dell'impianto audio realizzata nella sala. La cattedra del docente sarà fornita di una pulsantiera di controllo di tutto il sistema audio e video della sala.

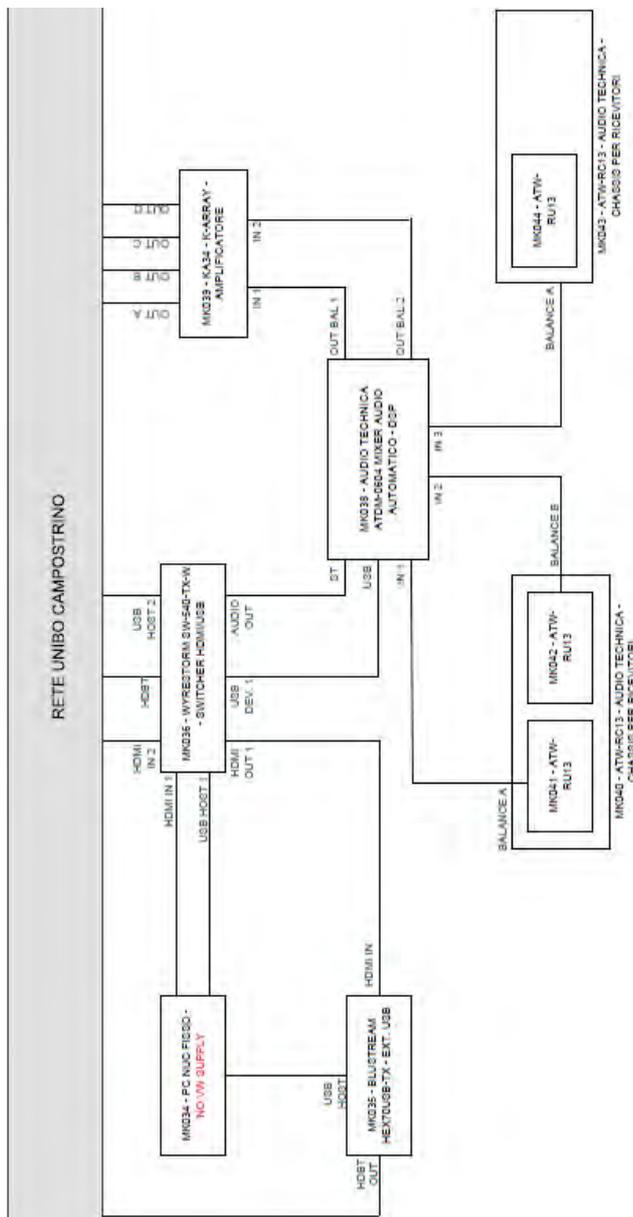


Fig. 11 - Schema di collegamento dell'impianto audio nell'aula
Sound system connection diagram in the classroom

6 | Conclusioni

Il presente lavoro riguarda la correzione acustica di una sala affinché, dopo il cambio di destinazione d'uso, da palestra diventi aula magna del Campus di Forlì. Secondo la norma ISO 3382, la condizione ante operam è stata qualificata attraverso misure di risposta all'impulso, dalle quali sono stati ricavati i valori dei criteri di intelligibilità T_{20} , C_{50} e STI. Il processo di progettazione si è basato sui valori di riferimento forniti dalla norma tecnica UNI 11532-2, ovvero il riferimento normativo indicato nei CAM per ambienti ad uso scolastico. La proposta è stata sviluppata utilizzando sia metodi previsionali, che simulazioni numeriche su un modello calibrato con un software di acustica geometrica. L'intervento ha previsto trattamenti acustici passivi – inserimento di 178 sedute – e attivi con l'in-

troduzione di un sistema line array con l'obiettivo di raggiungere un'adeguata intelligibilità del parlato, preservando allo stesso tempo i vincoli architettonici della sala. Le misurazioni post operam hanno confermato che i metodi di previsione analitici risultano essere a favore di sicurezza, mentre le simulazioni numeriche più aderenti ai risultati ottenuti in fase di collaudo.

Conclusions

The present work concerns the acoustic correction of a room so that, after a change of use, it becomes a lecture hall on the Forlì Campus. According to the ISO 3382 standard, the ante operam condition was qualified through impulse response measurements, from which the values of the T_{20} , C_{50} and STI intelligibility criteria were derived. The design process was based on the reference values provided by the technical standard UNI 11532-2, i.e. the normative reference indicated in CAM for school environments. The proposal was developed using both prediction methods and numerical simulations on a model calibrated with geometric acoustics software. The project included passive acoustic treatments – placement of 178 seats – and active with introduction of line array system with the aim of achieving adequate speech intelligibility while preserving the room's architectural constraints. Post operam measurements confirmed that analytical prediction methods are in favor of safety, while numerical simulations more closely match the results obtained during testing.

7 | Ringraziamenti

L'autrice vuole ringraziare il RUP del progetto Ing. Carla De Canditiis. Il progetto iniziale della sala con l'inserimento dei pannelli fonoassorbenti a soffitto è dell'Ing. Franca Conti (TCA).

Bibliografia

- [1] D.M. 11/10/17, Criteri ambientali minimi per l'affidamento di servizi di progettazione e lavori per la nuova costruzione, ristrutturazione e manutenzione di edifici pubblici, 2017.
- [2] UNI11532-2 Acustica in edilizia - Caratteristiche acustiche interne di ambienti confinati- Metodi di progettazione e tecniche di valutazione - Parte 2: Settore scolastico.
- [3] Sato H., Bradley J., Evaluation of acoustical conditions for speech communication in working elementary school classrooms, J. Acoust. Soc. Am., 123(4) (2008), 2064-2077, DOI: 10.1121/1.2839283.
- [4] Hodgson M., Nosal E., Effect of noise and occupancy on optimal reverberation times for speech intelligibility in classrooms, J. Acoust. Soc. Am., 111(2) (2002), 931-939, DOI: 10.1121/1.2839283.
- [5] 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.
- [6] Massaro, D.W., Simpson, J.A. (2014). Speech perception by ear and eye: A paradigm for psychological inquiry. Psychology Press, DOI: 10.4324/9781315808253.

- [7] Massaro, D.W., Palmer Jr, S.E. (1998). *Perceiving talking faces: From speech perception to a behavioural principle*. Mit Press.
- [8] 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.
- [9] Hodgson M., Experimental investigation of the acoustical characteristics of university classrooms, *J. Acoust. Soc. Am.*, 106(4) (1999), 1810-1819, DOI: 10.1121/1.427931.
- [10] UNI11532-1 *Acustica in edilizia - Caratteristiche acustiche interne di ambienti confinati - Metodi di progettazione e tecniche di valutazione - Parte 1: Requisiti generali*.
- [11] EN IEC 60268-16: *Sound system equipment - Part 16: Objective rating of speech intelligibility by speech transmission index*.
- [12] ISO 3382-1 *Acoustic: Measurement of room acoustic parameters Part 1 Performance spaces*.
- [13] ISO 3382-2 *Acoustic: Measurement of room acoustic parameters - Part 2 Reverberation time in ordinary rooms*.
- [14] Christensen CL., *ODEON Room Acoustics Software-version 12*. Lyngby, Denmark: Industrial, Auditorium and Combined Editions, 2013.
- [15] Fratoni, G., D'Orazio, D., Barbaresi, L., Garai, M., & Cappellini, L. (2023, February). Mixing materials in false ceilings to increase sound diffusion in education spaces. In *INTER-NOISE and NOISE-CON Congress and Conference Proceedings* (Vol. 265, No. 2, pp. 5002-5006). Institute of Noise Control Engineering, ISBN 978-190691342-7.
- [16] Cox T.J., D'Antonio P. (2009). *Acoustic Absorbers and Diffusers*, DOI: 10.1016/j.jsv.2006.01.055.
- [17] Sistemi fonoassorbenti, pannelli Soundless, AKIFIX Group.
- [18] Poltrone Antea, Audia Italia.6
- [19] Massaro, D.W., Warner, D.S. (1977). Dividing attention between auditory and visual perception. *Perception & Psychophysics*, 21(6), 569-574, DOI: 10.3758/BF03198739.
- [20] Lotto, A., Holt, L. (2011). *Psychology of auditory perception*. *Wiley Interdisciplinary Reviews: Cognitive Science*, 2(5), 479-489, DOI: 10.1002/wcs.123.
- [21] EN 12354-6:2003 *Building Acoustics - Estimation of acoustic performance of buildings from the performance of elements - Part 6: Sound absorption in enclosed spaces*.
- [22] UNI11532-1 *Acustica in edilizia - Caratteristiche acustiche interne di ambienti confinati - Metodi di progettazione e tecniche di valutazione - Parte 1*.

Association of psychoacoustic metrics with Italian words describing perceptual sound attributes

Raffaele Mariconte^{a*} | Giovanni Brambilla^b | Diego Annesi^c | Maurizio Diano^d |
Fabio Lo Castro^e | Claudia Giliberti^a

^a INAIL, DIT,
Via Roberto Ferruzzi, 38-40, 00143 Roma

^b DISAT, University of Milano-Bicocca,
Piazza della Scienza, 1, 20126 Milano

^c INAIL, DiMEILA
Via di Fontana Candida, 1, 00040
Monte Porzio Catone (Roma)

^d INAIL, Regional Directorates Calabria,
Via Vittorio Veneto, 60, 88100 Catanzaro

^e CNR-INM, Section of Acoustics
and Sensors O.M. Corbino,
Via del Fosso del Cavaliere, 100,
00133 Roma

* Corresponding author:
r.mariconte@inail.it

Ricevuto: 6/2/2024

Accettato: 20/5/2024

DOI: 10.3280/ria1-2024oa17236

ISSN: 2385-2615

Psychoacoustic parameters, being closely related to sound perception, are usually applied in product sound quality and, recently, also in environmental soundscape analysis or at workplace, to investigate its potential in describing acoustic comfort.

Lexicons of descriptive words of perceptual sound attributes are available in literature, but the language is often a crucial issue, being the translation not always easy to keep the original meaning.

This paper describes two different preliminary experiments dealing with such words in Italian and the evaluation of their association with psychoacoustic parameters. For these experiments, 12 sounds recorded in three different environments (at workplace, in nature and in the community) were selected and processed to determine some psychoacoustic parameters. These sounds were randomly played in a quiet room at the same equivalent level L_{eq} (dB) by headphone in the two experiments with the participation of two different groups of listeners, each formed by 24 subjects. Multivariate statistical analysis and correlation have been applied to compare their responses with some acoustic and psychoacoustic descriptors.

Keywords: psychoacoustics, sound quality, environmental noise, sound perception, descriptive words

Associazione di parametri psicoacustici con parole italiane descrittive di attributi sonori percepiti

I parametri psicoacustici, essendo correlati con la percezione del suono, sono di solito applicati alla qualità sonora del prodotto e, recentemente, anche nell'analisi del paesaggio sonoro ambientale o nell'esposizione sonora lavorativa, con l'intento di valutarne il loro potenziale nella descrizione del comfort acustico.

Lessici di parole descrittive della percezione di attributi sonori sono disponibili in letteratura, ma la lingua utilizzata è un fattore rilevante in quanto la traduzione da altre lingue, la più frequente è l'Inglese, non sempre è tale da mantenere il significato originario. Questo articolo descrive due esperimenti preliminari riguardanti l'uso di queste parole nella lingua italiana e la loro associazione con i parametri psicoacustici. A tale scopo, 12 suoni registrati in tre diversi ambienti (in ambiente di lavoro, in natura e nella comunità) sono stati selezionati ed elaborati per determinarne alcuni parametri psicoacustici. Questi suoni sono stati riprodotti allo stesso livello equivalente L_{eq} (dB) in cuffia con modalità casuale in una stanza quieta in entrambi i due esperimenti con la partecipazione di due differenti gruppi, ciascuno composto da 24 ascoltatori. Analisi statistiche sui descrittori acustici e i responsi soggettivi sono state applicate per valutare la loro associazione.

Parole chiave: psicoacustica, qualità sonora, rumore ambientale, percezione sonora, attributi sonori

1 | Introduction

Descriptive words of sound perception are largely context-dependent, and most of them have no clear relationship to properties that acousticians know how to measure. Furthermore, the variability in sound expertise among individuals is typically large, from sound experts (acousticians, sound engineers and sound designers) to non-experts (consumers, naive people). The application field involved is also different, from the assessment of sound reproduction quality to product sound quality and soundscape analysis. Another important

issue is the language, since the translation from other languages does not always keep the same concept and meaning. Indeed, the words must not only be translated well linguistically, but also must be adapted culturally to maintain the content validity at a conceptual level across different cultures [1]. For instance, dealing with soundscape the “Soundscape Attributes Translation Project” (SATP) [2] has been aimed at validating the first 15 translations of the soundscape attributes as reported in the ISO/TS 12913-2:2018 [3,4].

Consensus vocabularies are extensively applied in the field of sensory science [5].

As stated in [6], “Although language is not a very precise tool for characterizing sounds there are many words for describing sounds. Their meaning may not be precisely the same from person to person and there may be unambiguous relations between words and attributes. We may or may not have words for all attributes and often the words we have (descriptors or labels) are not one dimensional. Anyway, it may be worthwhile to create a lexicon of sound describing words”.

The benefits and desired characteristics of consensus vocabularies to define attributes or descriptors used by assessors to characterize the sound perceptual differences are described in [7,8].

The frameworks for the description of everyday sounds available in the literature differ greatly in terms of their methodology and complexity [9].

Lexicons of descriptive words of perceptual sound attributes are available in literature (e.g., [10]). In particular, a systematic literal survey has been carried out for the characterization of everyday sounds developed in several research fields, including auditory cognition, soundscape research, artificial hearing, sound design and so forth [11]. At the time of running the present experiments, only one lexicon was retrieved for Italian words, selected from Italian Web Corpus 2016®, and concerning the perception of sounds in areas surrounding ports [12].

The extension to further environmental contexts than those in [12] was deemed interesting towards the development of an Italian lexicon of perceptual sound attributes.

In this framework, the present work describes an experimental study to explore:

- Italian descriptive words of perceptual attributes of sounds;
- for some attributes determine their perceived extent (into three categorical intervals);
- association of the selected attributes with acoustic and psychoacoustic metrics.

Two laboratory listening experiments have been carried out using 12 sounds, recorded in three different environments. The subjective responses collected in the listening tests have been compared with some acoustic and psychoacoustic metrics by statistical analyses (e.g., multivariate and correlation analyses) implemented in the “R” software [13].

2 | Materials and methods

2.1 | Sound samples

A set of 12 sound stimuli were used in the two laboratory listening experiments, each lasting 10 s. This duration was short primarily to prevent hearing fatigue during the listening session. However, during the test the participant was allowed to listen in loop the sound until the submitted questionnaire was filled in. The sounds were recorded in three different environments, namely in a working environment (W), in nature (N) and in the community (C) (Tab. 1). Some of the recordings were binaural (the community sounds mainly), others stereo

or monoaural, as detailed in Table 1, being the last without spatial cues. However, this aspect was deemed not so crucial for the objectives of the listening tests, since none of the attributes proposed dealt with spatial sound features. Thus, for homogeneity purpose, the sound stimuli were processed into monoaural tracks (binaural tracks were previously appropriately equalized to compensate the effects of ear canal and pinna) and normalized at the same sound level (−30 dB rms) by the Audacity® audio editor. Afterwards, they were imported in ArtemiS Suite® v14.1, setting 0.1 s time resolution and Fast time weighting, to determine various acoustic descriptors and six psychoacoustic metrics [14], namely loudness N [15], sharpness S [16], fluctuation strength F [17], roughness R [18], tonality T [19] and impulsiveness I [20]. The last three metrics (R, T, I) were computed according to the Hearing Sottek Model HSM, implementing a large number of highly overlapped critical-bandwidth filters [21]. The centre of gravity G of the 1/3 octave spectrum was determined in the frequency range 16-20,000 Hz by:

$$G = \frac{\sum_{k=bl}^{bh} f_k \cdot 10^{(L_k/10)}}{\sum_{k=bl}^{bh} 10^{(L_k/10)}} \quad [\text{Hz}] \quad (1)$$

where bl and bh are the lowest and the highest frequency bands delimiting the spectrum, respectively, f_k is the central frequency of the k^{th} band and L_k is the corresponding band level.

Tab. 1 – Sound stimuli, type of recording and acoustic descriptors
Stimoli sonori, tecnica di registrazione e descrittori acustici

Environment	Sound	Descriptors
Work (W)	W1 Keyboard typing (MR)	
	W2 Weaving loom (MR)	
	W3 Diesel engine (MR)	L_{eq} [dB]
	W4 Fan (MR)	L_{Aeq} [dB(A)] Dev. st. sL_A [dB(A)]
Nature (N)	N1 Seagulls (MR)	N5 [sone GF]
	N2 River (MR)	S average [acum]
	N3 Rain (MR)	R* average [asper]
	N4 Sea waves (SR)	F average [Vacil] T* average [tu]
Community (C)	C1 Outdoor market (BR)	I* average [iu]
	C2 Indoor metro (SR)	1/3 octave spectrum and its centre of gravity G [Hz]
	C3 Urban square (BR)	
	C4 Urban street (BR)	

*Hearing Sottek Model HMS [20]

MR = monoaural recordings, SR = stereo recordings, BR = binaural recordings

Listening tests in laboratory quiet room are time consuming, especially when the people sample is not too small. To get a reasonable number of subjects in short time and to facilitate their participation, instead of a specific room a quiet ordinary one, at participants' convenience, was used to reduce transferring times to the laboratory. This approach required to setup a lightweight and portable sound reproduction system. The implemented system was formed by a digital audio player Crea-

tive Zen, connected to a semi-closed circumaural headphone AKG K 44. The system was calibrated in an anechoic chamber by a head and torso simulator (Fig. 1), and during the sound playback frequency equalization was applied to take into account the headphone frequency response.



Fig. 1 – Calibration of the sound reproduction system used for the listening tests

Calibrazione del sistema di riproduzione sonora utilizzato nelle prove di ascolto

2.2 | Listening tests

The 12 sounds were presented diotically by binaural headphone in a random order to minimize the bias on responses due to the presentation order [22]. The test room was quiet, without any significant sound interfering with the listening. The listening sound level was fixed and previously calibrated ($L_{eq10s} = 73$ dB). At the beginning of the listening test, after the introduction and the instructions given by the experimenter, each sound was one shot played for 10 s and, on participant request, loop listening was available until the questionnaire was filled in (Fig. 2).

In the selection of participants, those with high education were preferred, taking into account the task to be performed, requiring a deep knowledge of the language suitable to run the session without too much assistance of the experimenter.



Fig. 2 – Experimental setup of the listening test
Configurazione sperimentale delle prove di ascolto

2.2.1 | Experiment 1

In the questionnaire the participant was asked to select in a list of 22 Italian words (Tab. 2) those considered most appropriate to describe her/his perception of the sound just heard, without assigning any rank order among the selected ones. In Tab. 2 a possible English translation, within (), is reported only in order to be consistent with the language used to write this paper, but not shown to the listeners. The words in Italian were presented in alphabetical order. The option to indicate other words not present in the list was also available. In choosing the 22 descriptive words of sound perception, the outcome of the study in [12] was taken into account.

Tab. 2 – List of Italian words proposed to the participant to describe the sound attribute perception; English words within () not shown to the listeners

Elenco delle parole in italiano proposte al partecipante per descrivere gli attributi sonori percepiti; parole in inglese tra () non mostrate agli ascoltatori

Chiaro (clear)	Familiare (familiar)	Invadente (intrusive)	Squillante (shrill)
Confuso (blur)	Fastidioso (annoying)	Naturale (natural)	Stabile (steady)
Conosciuto (known)	Forte (loud)	Noioso (boring)	Variabile (fluctuating)
Cupo (dull)	Gradevole (nice)	Piacevole (pleasant)	Vivace (lively)
Debole (soft)	Innaturale (unnatural)	Sibilante (hissing)	Altro (other)
Discreto (fair)	Insolito (unusual)	Sgradevole (ugly)	

Twenty four subjects (average age 40 ± 14 years) participated to this experiment, 50% male and 54% with degree or PhD education. They self-reported an average noise sensitivity of $6.5 (\pm 1.8)$ on a scale from 1 (not at all) to 10 (very much). The average duration of the listening sessions was 9 minutes and 30 s, with an average response time of 30 s for the choice of each attribute. Notwithstanding the possibility to indicate other attributes not present in the proposed list, this option was chosen only by 8 (33.3%) participants for a total of 9 different descriptive words.

2.2.2 | Experiment 2

Among the various psychometric scaling [23], such those applied in [24,25], in this experiment the semantic differential bipolar scale [26] was used as tool to collect the perceived extent of antonymic sound attributes located at the opposite ends of the scale. Respondents were asked to choose one of the seven equal intervals on the bipolar scale indicating the perceived extent of the selected attribute. The central interval corresponds to the neutral “Neither/Nor” response and the answer coding was not shown to the participants but used only for rating processing (Fig. 3).

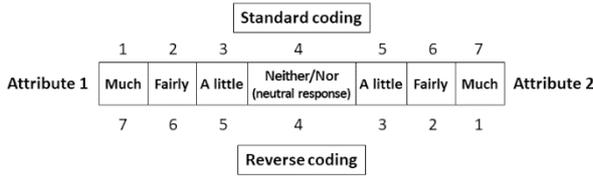


Fig. 3 – Semantic bipolar scale used in experiment 2
Scala semantica bipolare impiegata nell'esperimento 2

The proposed seven scales with perceptual attributes, in Italian words, are reported in Tab. 3 and they were chosen taking into account the outcome of experiment 1, with translation of the attributes in English words, reported within (), herewith given only in order to be consistent with the language used to write this paper, but not shown to the subjects.

Tab. 3 – Bipolar semantic scales in Italian used for the ratings; English words within () not shown to the subjects
Scale semantiche bipolari in italiano utilizzate per le valutazioni; parole in inglese tra () non mostrate ai partecipanti

Scale	Attribute 1	Attribute 2	Coding
S1	Sconosciuto (unknown)	Conosciuto (unknown)	Standard
S2	Cupo (dull)	Sibilante (hissing)	Standard
S3	Sgradevole (ugly)	Gradevole (nice)	Standard
S4	Stabile (steady)	Variabile (fluctuating)	Standard
S5	Noioso (boring)	Vivace (lively)	Standard
S6	Piacevole (pleasant)	Fastidioso (annoying)	Reverse
S7	Confuso (blur)	Chiaro (clear)	Standard

A group of 24 subjects (average age 35 ± 15 years) participated to this experiment, 50% male and 46% with degree or PhD education. None of these participants took part in the experiment 1. They self-reported an average noise sensitivity of $7.0 (\pm 2.1)$ on a scale from 1 (not at all) to 10 (very much).

The average duration of the listening sessions was 9 minutes and 10 s with an average response time of 46 s for each sound.

3 | Results and discussion

3.1 | Sound stimuli

Figure 4 shows the range of the L_{Aeq} levels in dB(A) of the sound stimuli versus their centre of gravity G, Eq. (1), of the 1/3 octave band spectrum, with the coloured scale reporting the standard deviation s of the $L_{A,0.1s}$ levels. A reasonable separation among sound stimuli and the recording environments is observed.

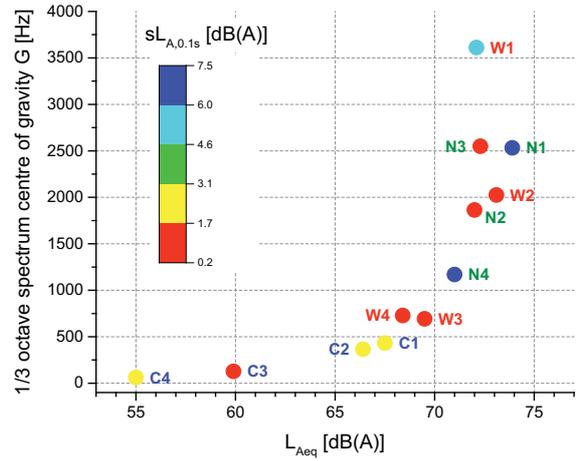


Fig. 4 – Range of sound L_{Aeq} levels in dB(A) versus the centre of gravity G of the 1/3 octave band spectrum
Variabilità dei livelli continui equivalenti L_{Aeq} in dB(A) con il centro di gravità G dello spettro a 1/3 di ottava

Further outcomes are provided by the Pearson's correlation matrix of the nine sound descriptors (Fig. 5), ordered by hierarchical clustering (agglomeration algorithm Ward D2 [27]) into four groups. The group at the top-left of the correlogram includes the continuous equivalent level L_{Aeq} and the 5th percentile of loudness N5, both describing the energy content of the sound. The frequency features of the sound are described by the group including sharpness S and spectrum centre of gravity G, as well as the group formed by roughness R and tonality T. The sound temporal features are represented by the group at the bottom-right of the correlogram, including impulsiveness I, standard deviation s of $L_{A,0.1s}$ sound levels and fluctuation strength F. This outcome confirms that at least three perceptive dimensions, namely the noise intensity, its temporal variations and its spectrum, emerge when dealing with sound environment assessments [28].

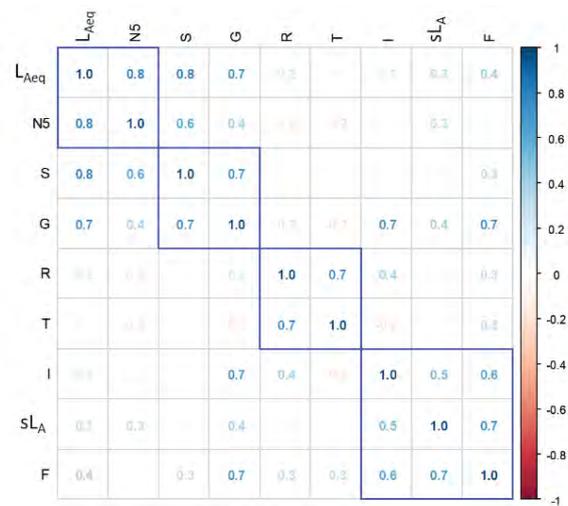


Fig. 5 – Pearson's correlation matrix of the 9 sound descriptors, ordered by Ward D2 hierarchical clustering into four groups
Matrice di correlazione di Pearson dei 9 descrittori acustici, aggregati nei quattro gruppi ottenuti con l'analisi gerarchica con algoritmo Ward D2

3.2 | Experiment 1

Dealing with the sound attributes selected by the participants, as shown in Fig. 6 the sounds were rather Familiar or Known to the participants (19.4% of all the 1159 responses). Thus, it may be plausible that the chosen attributes were the outcome of an aware selection rather than one by chance. The sounds recorded in the working environment were mainly described as Intrusive (82.4% of all the 51 selections of this attribute), Ugly (73.7% of all the 57 selections of this attribute) and Annoying (70.4% of all the 71 selections of this attribute). Natural sounds were described as Nice (73.8% of all the 65 selections of this attribute) and Pleasant (71.9% of all the 64 selections of this attribute). Community sounds were described mainly Blur (56.7% of all the 67 selections of this attribute) and Fluctuating (54.0% of all the 50 selections of this attribute), as well as more Lively (16.1% of all the 31 selections of this attribute) than Annoying (14.1%).

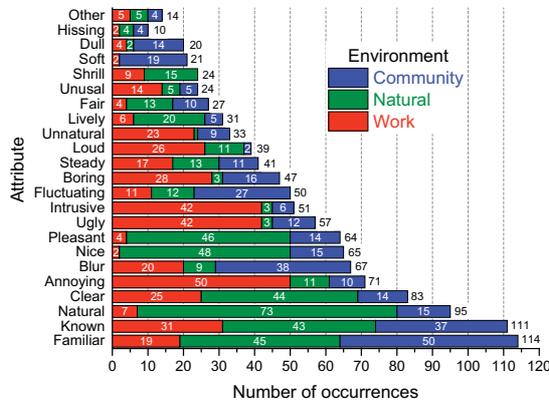


Fig. 6 – Number of occurrences of the selected attributes
Occorrenze degli attributi prescelti per i suoni

The attribute occurrences were also processed by the Principal Component Analysis [29], an unsupervised learning algorithm technique used to examine the interrelations

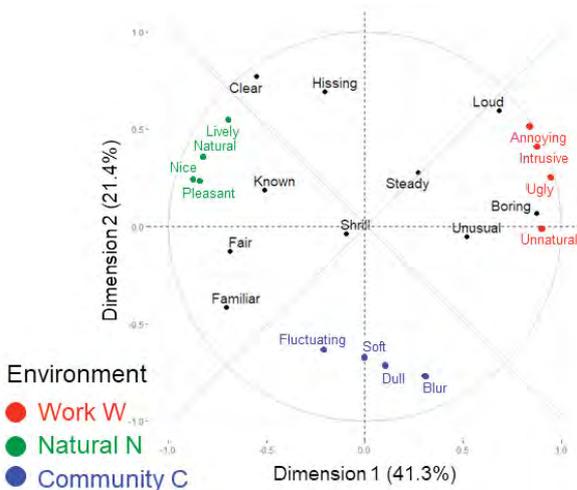


Fig. 7 – First two PCA components of the attributes based on their occurrences
Prime due componenti dell'analisi PCA sugli attributi in base alle loro occorrenze

among a set of variables. For this purpose the package FactoMineR was used [30]. For each attribute, the occurrence values observed for the twelve sounds were normalized by subtracting their mean and dividing by their standard deviation. The outcome of the first two PCA dimensions, explaining 62.7% of the dataset variability, is reported in Figure 7.

Attributes distant from the circle centre are well represented on the factor map. Those giving similar information are grouped together (like Nice/Pleasant and Intrusive/Annoying), and if negatively correlated they are positioned on opposite sides of the circle centre (like Pleasant/Annoying), in diagonally opposed quadrants (like Clear/Bur).

Table 4 reports for each recording environment the four most occurred attributes with their percentage referred to the total responses on each attribute.

Tab. 4 – Four most occurred attributes (percentage referred to the total responses on each attribute) for each recording environment
Quattro attributi più ricorrenti (percentuale riferita al totale delle risposte per ciascun attributo) per ciascun ambiente dei suoni

Environment	First four most occurred attributes (percentage referred to the total responses on each attribute)
Work (W)	Intrusive (82.4%) Ugly (73.7%) Annoying (70.4%) Unnatural (69.7%)
Nature (N)	Natural (76.8%) Nice (73.8%) Pleasant (71.9%) Lively (64.5%)
Community (C)	Soft (90.6%) Dull (70.0%) Blur (56.7%) Fluctuating (54.0%)

The four most occurred attributes of sounds in the working environment are in the top-right quadrant, opposite to that top-left where the four most occurred attributes of natural sounds are located, whereas the four most occurred attributes of community sounds are in-between in the bottom quadrants.

A further analysis dealt with the Spearman rank correlation matrix on all the variables, that is attributes and noise descriptors (Fig. 8), where the variables are displayed according to their hierarchical clustering order (Ward D2 agglomeration method) considering two groups, highlighted by the two rectangles with blue borders. For instance, a sound described as Natural is positively correlated with Pleasant ($r = 0.9$) and Lively ($r = 0.8$), whereas r is negative for Ugly (-0.8) and Boring (-0.7). The correlation points out also the correspondence among synonyms (e.g., Nice and Pleasant with $r = 0.9$).

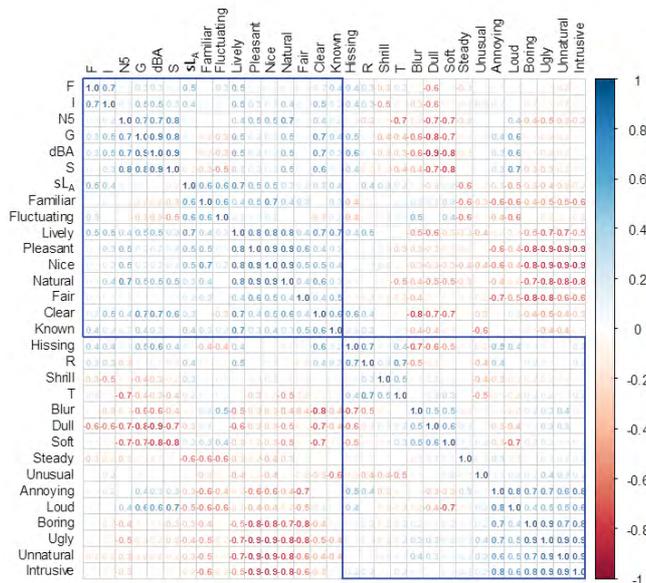


Fig. 8 – Spearman rank correlation matrix on all the variables (attributes and acoustic descriptors)
Correlogramma di Spearman tra tutte le variabili (attributi e descrittori acustici)

On the whole, the Sea Waves (N4) was the sound rated mostly Nice and Pleasant (23.1% and 21.9% of all the 65 and 64 selections of these attributes, respectively). On the contrary, the Diesel Engine (W3) was the sound rated mostly Intrusive and Ugly (29.4% and 28.1% of all the 15 and 16 selections of these attributes, respectively). Regarding these two sounds, Fig. 9 and 10 report the FFT spectrograms and the 1/3 octave band spectrum of L_{eq} , respectively.

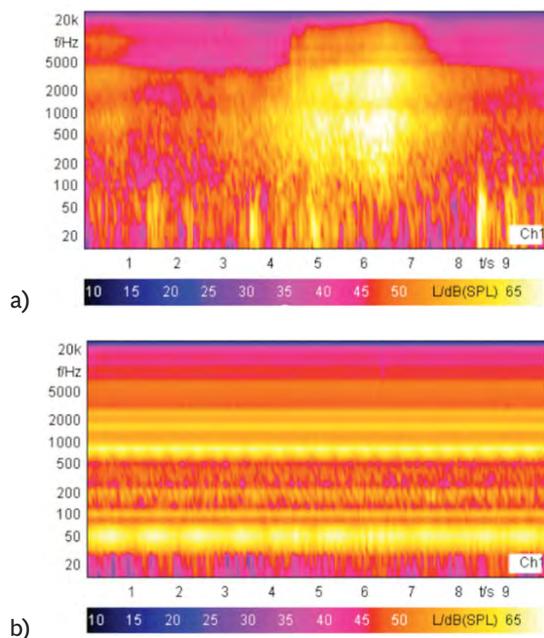
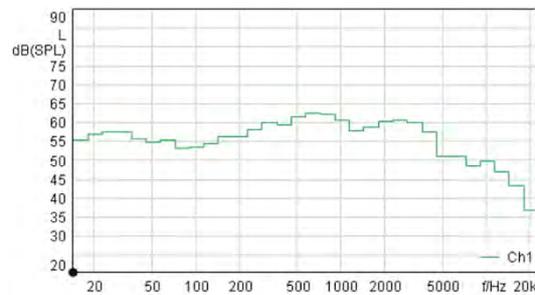
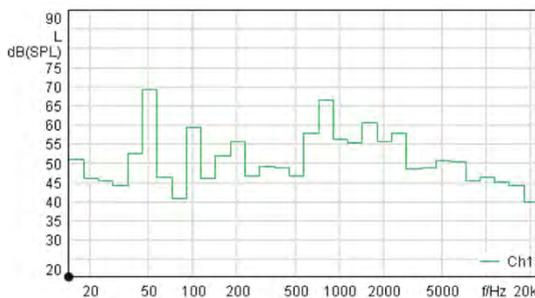


Fig. 9 – The FFT spectrograms of sounds: Sea Waves (a) and Diesel Engine (b)
Spettrogrammi FFT dei suoni: Onde marine (a) e Motore Diesel (b)



a)



b)

Fig. 10 – 1/3 octave band spectrum of L_{eq} : Sea Waves (a) and Diesel Engine (b)
Spettri L_{eq} a 1/3 di ottava: Onde Marine (a) e Motore Diesel (b)

The spectrum of diesel engine shows tonal components not present in the one of sea waves and their presence in the former confirms the enhanced annoyance they produce, in addition to the type of source and its semantic content.

3.3 | Experiment 2

Figure 11 reports the percentages of occurrences observed for each bipolar scale pooling all the responses to all sounds. Most of the stimuli were much (60.1%) and fairly (19.1%) Known for the participants. It may be plausible that their ratings could not be influenced by hearing unknown sounds. Moreover, the neutral response Neither/Nor was reported only 12.7% of the 2014 collected ratings, instead of the potential 2016 due to two missing responses, indicating that the participants were often

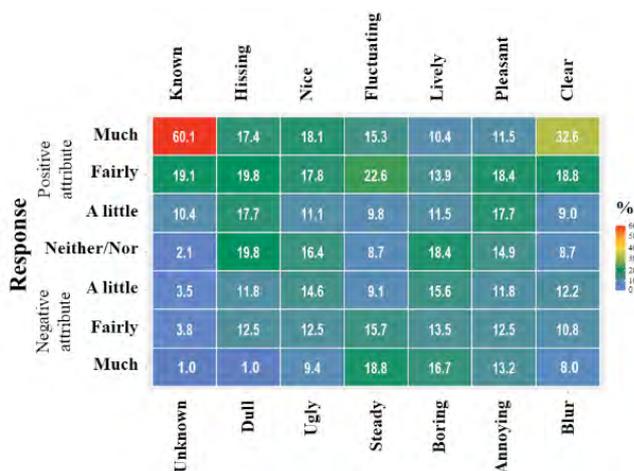


Fig. 11 – Percentages of occurrences for each bipolar scale pooling all the responses to all sounds
Percentuali di occorrenze per ciascuna scala bipolare di tutte le risposte all'insieme dei suoni

able to select the magnitude of the proposed attributes on the semantic scales. This could be likely also because a large part of respondents (43.1%) found the sounds fairly (18.8%) or much Clear (32.6%), rather than fairly (10.8%) or much (8.0%) Blur.

The highest percentage of neutral response Neither/Nor (19.8%) was observed for the scale Dull/Hissing. The 12 sounds were, overall, more often Annoying (45.8%) than Pleasant (35.8%).

More hints may be drawn considering the mean scores on the seven scales, versus the three different sound recording environment (Fig. 12). It is clear that the perception of natural sounds was rated more positively (37.0%) than that in the working environment, whereas the sounds in the community is rated in-between. The less clear sounds were those recorded in the community environment but, still, close to the neutral response ($\overline{S7} = 3.9$), whereas those in the working environment are the most Annoying ($\overline{S6} = 2.9$) and Ugly ($\overline{S3} = 3.1$).

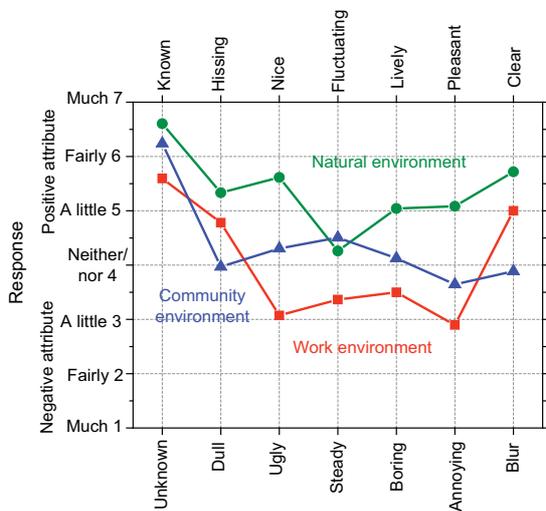


Fig. 12 – Mean score for each bipolar scale versus the sound recording environment

Valutazione media per ciascuna scala bipolare di tutte le risposte diversificate per l'ambiente dei suoni

A more detailed analysis has been performed for the sounds recorded in the same environment, as shown in Fig. 13. Regarding the work environment (Fig. 13a), the diesel engine noise (W3) was rated the most Annoying, Ugly and Steady, whereas the fan noise (W4) was the most Unknown, Dull and rated as neutral on the scale Blur/Clear ($\overline{S7} = 4.0$). The natural sounds were rated positively almost on all the scales (Fig. 13b). It is confirmed that people enjoy the perception of natural sounds. The highest overall mean scores were observed for the seagull sound (N1), namely for Hissing ($\overline{S2} = 6.3$), Fluctuating ($\overline{S1} = 5.0$), Lively ($\overline{S5} = 6.1$), and Clear ($\overline{S7} = 6.2$) attributes, whereas the rain sound (N3) was rated slightly Steady ($\overline{S1} = 3.8$), Lively ($\overline{S5} = 4.2$), Pleasant ($\overline{S6} = 4.5$) and Clear ($\overline{S7} = 5.1$). The outcomes observed for community noises are in-between the previous ones (Fig. 13c). The urban square sound (C3) was the most Nice ($\overline{S3} = 5.4$) and the outdoor market sound (C1) was rated the most Lively ($\overline{S5} = 4.2$).

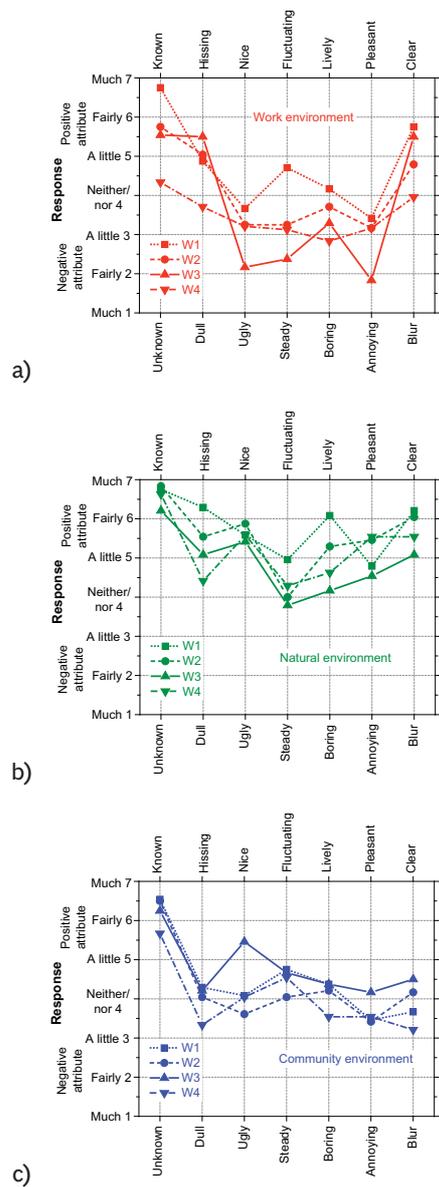


Fig. 13 – Mean score for each bipolar scale S for each sound in the three recording environments

Valutazione media per ciascuna scala bipolare S per ciascun suono nei tre diversi ambienti

Moreover, the Spearman rank correlation matrix (Fig. 14) was computed considering the mean of coded scores obtained on the bipolar semantic scales for each sound and the corresponding acoustic parameters listed in Table 1. The variables are displayed according to their hierarchical clustering order (Ward's D2 agglomeration method) considering two groups, highlighted by the two rectangles with blue borders.

In the top-left group, only positive correlations are observed between two scales (S2 and S7) and four acoustic descriptors, namely loudness $N5$, sharpness S , L_{Aeq} and spectrum centre of gravity G . In particular, scale S2 (Dull/Hissing) has a good correlation ($r = 0.85$) with S7 (Blur/Clear), L_{Aeq} ($r = 0.81$), S ($r = 0.70$), G ($r = 0.69$) and $N5$ ($r = 0.50$). It is worth to note that sharpness S and perceived hissing feature of sound, rated on scale S2, are positively correlated ($r = 0.70$).

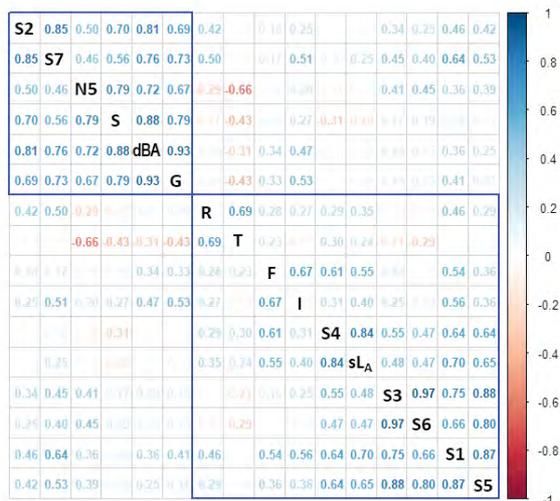


Fig. 14 – Spearman rank correlation matrix between mean scores on semantic scales and acoustic descriptors

Correlogramma di Spearman tra le valutazioni medie sulle scale semantiche e i descrittori acustici

The remaining five scales are in the bottom-right group of the correlation matrix, including also roughness R, tonality T, fluctuation strength F, impulsiveness I and standard deviation s of sound level $L_{A,0.1s}$. As expected, scales S3 (Ugly/Nice) and S6 (Annoying/Pleasant) are well correlated ($r = 0.97$), as well as with S5 (Boring/Lively) with $r = 0.88$ (S3/S5) and $r = 0.80$ (S6/S5). Thus, a sound perceived as Lively is likely to be rated as Pleasant and Nice. The standard deviation of sound level $sL_{A,0.1s}$ is positively correlated ($r = 0.84$) with scale S4 (Steady/Fluctuating).

The above results show that the set of acoustic descriptors considered can be reasonably associated to the descriptive words of sound perception as reported by participants in these two experiments, and they can quantify the various perceptual dimensions (e.g., time and frequency patterns, semantic content).

4 | Conclusions

The two experiments above described are a preliminary approach towards the development of a lexicon of Italian descriptive words of the perception of environmental sounds.

Even though the results cannot be generalized, due to the small number of sound samples and limited to three different contexts only, they show that the set of acoustic descriptors considered correspond satisfactorily to the perceptual sound attributes selected and quantified by the participants to describe the various perceptual dimensions, namely the noise intensity, its temporal variations and its spectrum.

Further investigations are planned to enlarge the sample of sounds under test and the listening panel, to improve the perceptual descriptive words set and to apply further experimental protocols and statistical analyses.

Conclusions

I due esperimenti descritti costituiscono la fase preliminare di uno studio volto a formulare un lessico di parole italiane descrittive della percezione di suoni ambientali.

Allo stato attuale i risultati ottenuti, pur se non generalizzabili per il numero ridotto dei suoni e dei contesti di registrazione esaminati, sono interessanti. L'insieme dei descrittori acustici considerati, infatti, appare abbastanza associabile agli attributi prescelti e quantificati dai partecipanti per descrivere la loro percezione sonora in termini di intensità, andamento nel tempo e in frequenza.

Si intende pianificare ulteriori esperimenti per ampliare sia l'insieme dei suoni da analizzare che il gruppo di ascoltatori al fine di approfondire il lessico da sviluppare, utilizzando anche ulteriori protocolli sperimentali e analisi statistiche.

References

- [1] D.E. Beaton, C. Bombardier, F. Guillemin, M.B. Ferraz, Guidelines for the process of cross-cultural adaptation of self-report measures, *Spine* 2000, 25, pp 3186–91, DOI: 10.1097/00007632-200012150-00014.
- [2] F. Aletta et al., Soundscape assessment: towards a validated translation of perceptual attributes in different languages, *Proc. 49th InterNoise*, Seoul, Korea, 23-26 August 2020.
- [3] ISO/TS 12913-2:2018, Acoustics-Soundscape Part 2: Data collection and reporting requirements.
- [4] G.E. Puglisi, L. Shtrepi, M.C. Masoero, A. Astolfi, Evaluating soundscape in the Italian language: Validation of the translation of the English standardized perceptual attributes of the ISO/TS 12913-2:2018 and comparison with other Romance languages, *Applied Acoustics* 222, 11050, 2024, DOI: 10.1016/j.apacoust.2024.110050.
- [5] H.T. Lawless, H. Heymann, *Sensory evaluation of food – Principles and practices*, 2010, Springer.
- [6] T.H. Pedersen, N. Zacharov, How many psycho-acoustic attributes are needed?, *Proc. Acoustics '08*, Paris, France, 29 June-4 July 2008.
- [7] N. Zacharov, T.H. Pedersen, C. Pike, A common lexicon for spatial sound quality assessment – latest developments, 2016 Eighth International Conference on Quality of Multimedia Experience (QoMEX), Lisbon, Portugal, 2016, DOI: 10.1109/QoMEX.2016.7498967.
- [8] T.H. Pedersen, N. Zacharov, The development of a sound wheel for reproduced sound, 138th Conv. Audio Eng. Soc., 2015, Warsaw, Poland, 7-10 May.
- [9] C. Guastavino, Everyday sound categorization, in *Computational Analysis of Sound Scenes and Events*, Eds T. Virtanen, M. D. Plumbley, D. Ellis, New York, NY: Springer International Publishing, 2018, pp. 183–213, DOI: 10.1007/978-3-319-63450-0.
- [10] T.H. Pedersen, *Lexicon of Sound-Describing Words – Version 1*, Delta Report AV 11/05 THP, 2008.
- [11] B.L. Giordano, R. de Miranda Azevedo, Y. Plasencia-Calaña, E. Formisano, M. Dumontier, What do we mean with sound semantics, exactly? A survey of taxonomies and ontologies of everyday sounds, *Front. Psychol.*, 13, 2022, DOI: 10.3389/fpsyg.2022.964209
- [12] A. Magrini, G. Di Feo, A. Cerniglia, Questionnaire analysis survey for acoustic investigation-Preliminary considerations, *Proc. 48th InterNoise*, Madrid, Spain, 16-19 June 2019.

- [13] R Core Team, R: A language and environment for statistical computing, R Foundation for Statistical Computing, Vienna, Austria, 2021.
- [14] H. Fastl, E. Zwicker, Psychoacoustics. Facts and Models, Springer Berlin, Heidelberg, 2007.
- [15] DIN 45631/A1:2010-03, Calculation of loudness level and loudness from the sound spectrum – Zwicker method – Amendment 1: Calculation of the loudness of time-variant sound.
- [16] DIN 45692:2009-08, Measurement technique for the simulation of the auditory sensation of sharpness.
- [17] R. Sottek, J. Becker, T. Lobato, Progress in Roughness Calculation, Proc. 49th InterNoise, Seoul, South Korea, 23-26 August 2020.
- [18] H. Fastl, E. Zwicker, Fluctuation Strength, Chap. 10 in Psychoacoustics. Facts and Models, Springer Berlin, Heidelberg, 2007.
- [19] ECMA-418-2, Psychoacoustic metrics for ITT equipment — Part 2 (models based on human perception), 2020.
- [20] R. Sottek, T. Moll, Perception and modeling of impulsive sounds, Proc. Euronoise 2015, Maastricht, Netherlands, 31 May-3 June 2015.
- [21] R. Sottek, K. Genuit, Models of signal processing in human hearing, AEU – International Journal of Electronics and Communications, 59(3), pp. 157-165, 2005.
- [22] R. Zeelenberg, D. Pecher, A method for simultaneously counterbalancing condition order and assignment of stimulus materials to conditions, Behav. Res., 47 (127), pp. 127-133, 2015.
- [23] A. Magrini, G. Di Feo, A. Cerniglia, Acoustic Quality of the External Environment: Indications on Questionnaire Structure for Investigating Subjective Perception, J. Otorhinolaryngol. Hear. Balance Med., 4, 4, 2023, DOI: 10.3390/ohbm4010004.
- [24] U. Ayr, E. Cirillo, F. Martellotta, Disturbo da rumore. Verifica sperimentale di una scala per la valutazione soggettiva, CDA, Sezione Ricerca, Settembre 2000, pp. 925-932.
- [25] D. Dal Palù, B. Lerma, L. Actis Grosso, L. Shtrepi, M. Gasparini, C. De Giorgi, A. Astolfi, Sensory evaluation of the sound of rolling office chairs: an exploratory study for sound design, Applied Acoustics 130, pp. 195-203, 2018, DOI: 10.1016/j.apacoust.2017.09.027.
- [26] C.E. Osgood, The nature and measurement of meaning. Psychol. Bull. 49, pp. 197-237, 1952.
- [27] J.H. Ward Jr, Hierarchical Grouping to Optimize an Objective Function, Journal of the American Statistical Association, 58, pp. 236-244, 1963, DOI: 10.1080/01621459.1963.10500845
- [28] A. Can, P. Aumond, S. Michel, B. de Coensel, C. Ribeiro, D. Botteldooren, C. Lavandier, Comparison of noise indicators in an urban context, Proc. 45th InterNoise, Hamburg, Germany, 21-24 August 2016.
- [29] I.T. Jolliffe, J. Cadima, Principal component analysis: a review and recent developments, Phil. Trans. R. Soc. A, 374, 20150202, 2016, DOI: 10.1098/rsta.2015.202.
- [30] S. Lê, J. Josse, F. Husson, FactoMineR: A Package for Multivariate Analysis. Journal of Statistical Software, 25, pp. 1-18, 2008, DOI: 10.18637/jss.v025.i01.

Design di pannelli fonoassorbenti sostenibili costituiti da macroalga bruna *Sargassum*

Francesco Pompoli^{a*} | Ilaria Dicarlantonio^b | Joselina Hernandez^b | Cristina Marescotti^a

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

^b Corso di Laurea in Design del Prodotto Industriale, Università degli Studi di Ferrara, Via Ghiara, 36, 44121 Ferrara

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

Ricevuto: 29/2/2024

Accettato: 10/5/2024

DOI: 10.3280/ria1-2024oa17362

ISSN: 2385-2615

L'alga marina bruna *Sargassum* costituisce un problema ambientale sempre più importante sulle coste affacciate all'Oceano Atlantico, ed in particolare nella zona caraibica e nell'Africa equatoriale. Enormi distese galleggianti di queste alghe si ammassano in mare e lungo le coste rendendo più difficile le attività turistiche e di pesca. Negli ultimi anni si è cercato di sviluppare diversi progetti che consentano l'utilizzo di tali alghe come risorsa per varie applicazioni industriali. In questo ambito, nel seguente articolo verrà proposto un percorso di design di pannelli fonoassorbenti ricavati a partire da *Sargassum* essiccato al sole, che comprende una caratterizzazione acustica e fisica del materiale in funzione della sua densità apparente, una modellazione analitica del campo acustico all'interno del materiale considerato come un fluido dissipativo equivalente ed una proposta prototipale di pannelli modulari fonoassorbenti con notevole contenuto di design.

Parole chiave: assorbimento acustico, sostenibilità, materiale poroso, alga *Sargassum*

Design of sustainable sound-absorbing panels based on *Sargassum* brown macroalgae

The brown seaweed *Sargassum* poses an increasingly significant environmental challenge along the coasts bordering the Atlantic Ocean, particularly in the Caribbean and in the equatorial Africa. Vast floating expanses of this seaweed accumulate in the sea and along the coasts, posing obstacles to fishing and tourism activities. In recent years, efforts have been underway to develop various projects aimed at utilizing these algae as a resource for various industrial applications. In this context, the following article will propose a design approach for sound-absorbing panels made from sun-dried *Sargassum*. This approach includes an acoustic and physical characterization of the material as a function of its bulk density, an analytical modeling of the acoustic field within the material considered as an equivalent dissipative fluid, and a prototype proposal for modular sound-absorbing panels with a significant design content.

Keywords: sound absorption, sustainability, porous material, *Sargassum* algae

1 | Introduzione

L'obiettivo di riduzione mondiale delle emissioni di CO₂ ha dato grande impulso alla ricerca di materiali fonoassorbenti sostenibili, ricavati dal riciclo di materiali a fine-vita, da scarti di lavorazione oppure da piante invasive che rappresentano un problema ambientale.

In letteratura sono presenti molti articoli di review che raccolgono numerose ricerche sulle proprietà fonoassorbenti di materiali sostenibili, ed in particolare [1] e [2] si concentrano sui materiali di origine naturale (vegetale e animale). Alcuni di questi materiali derivano da scarti di lavorazione agricola (residui di foglie di tè [3], foglie di ananas [4], fibre di paglia e residui di potatura di ulivo [5], fibre di cocco [6]) mentre altri da piante invasive che non hanno altre applicazioni (Ginestra [7], *Yucca gloriosa* [8]).

Esigui risultano invece gli studi per l'utilizzo di materiali di scarto di origine marina, nonostante i mari ricoprano il 70% della superficie terrestre. In [9] vengono studiate le proprietà acustiche delle fibre di *Posidonia*, pianta marina endemica del Mediterraneo che produce, a seguito di mareggiate, grandi

quantitativi di residui fogliari che si spiaggiano sulle coste costituendo un problema per lo sfruttamento turistico degli arenili. In [10] vengono presentati alcuni risultati di fonoassorbimento ottenuti su diverse tipologie di alghe essiccate raccolte sulle coste ucraine del mare di Azov.

L'idea alla base di questa ricerca deriva dal problema ambientale costituito dall'enorme incremento di distese galleggianti di *Sargassum*, una macroalga bruna diffusa nella zona caraibica dell'Oceano Atlantico ed ultimamente in espansione sulle coste africane equatoriali (Fig. 1). Queste alghe, presenti come specie pelagiche *Fluitans* III, *Natans* I e *Natans* VIII, si ammassano in mare e lungo le coste rendendo difficili le attività di pesca e turistiche (Fig. 2) [11].

Occorre precisare che il *Sargassum* in natura è sempre esistito, principalmente nel Golfo del Messico e nel Mar dei Sargassi; esso viene descritto da Colombo nel suo primo viaggio di "scoperta" del 1492 [12]:

"Dopo cento miglia con vele spiegate, il vento cala e il mare si calma. [...] Ci siamo diretti con cautela verso la strana massa. Lentamente, abbiamo scoperto che c'erano

alghe galleggianti, ovunque, a perdita d'occhio. Abbiamo iniziato a tagliare le alghe, la barca ha rallentato gradualmente, finché non siamo rimasti intrappolati. [...] Ci sono volute diverse settimane per navigare attraverso questo strano tappeto, alla ricerca di Antilla. Lentamente, abbiamo affrontato la verità e siamo tornati a nord-est per trovare un po' di vento. Lentamente, la copertura di alghe si è diradata, lasciando qua e là chiazze isolate, e all'improvviso non c'era più."



Fig. 1 – Fotografia del Sargasso, Miami, Florida, 15 maggio 2023
Sargassum photography, Miami, Florida, May 12, 2023



Fig. 2 – Sargassum spiaggiato, foto concesse da SOS Carbon
Sargassum beached, photos courtesy of SOS Carbon

Questa macro alga bruna ricordava agli esploratori un'uva presente in Portogallo, chiamata "salgazo" ed i relativi banchi fluttuanti vengono denominati "Saraçãos". Il mare caratterizzato dalla presenza di queste alghe prende da esse il nome di Mar dei Sargassi. Esistono inoltre numerosi riferimenti storici all'impiego di alghe spiaggiate da parte delle popolazioni costiere; ad esempio nell'arte pittorica si trovano riferimenti in dipinti che hanno rappresentato l'attività di raccolta delle alghe, utilizzate per fertilizzare il terreno o per integrare la dieta di animali erbivori. Si vedano ad esempio i dipinti del XIX secolo riportati in Figg. 3 e 4.



Fig. 3 – Georges Clairin, Inceneritore di alghe a Point du Raz, Museo d'arte e di storia, Saint-Brieuc, Francia, 1882.
Ph. Credit: Gérard Yvergniaux
Georges Clairin, Kelp-burning at the Point du Raz, Musée d'art et d'histoire, Saint-Brieuc, France, 1882.
Ph. Credit: Gérard Yvergniaux



Fig. 4 – Henry George Todd, Raccoglitori di alghe, Bury Art Museum England, ca 1847–1898. Ph. credit: Bury Art Museum
Henry George Todd, Seaweed Gatherers, Bury Art Museum England, ca 1847–1898. Ph. credit: Bury Art Museum

Negli ultimi anni, a causa dei cambiamenti climatici, si è assistito ad un progressivo aumento della presenza di Sar-

gassum nei mari e dei fenomeni di spiaggiamento sulle coste, ed una estensione delle zone di diffusione di queste alghe nell'Atlantico fino a raggiungere le coste africane occidentali (Fig. 5).

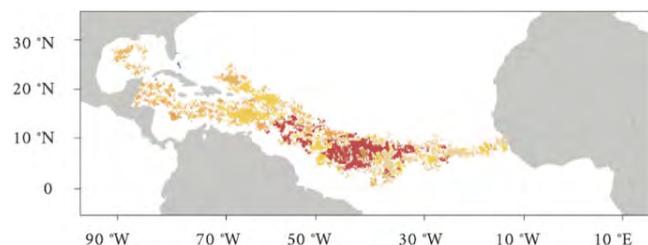


Fig. 5 – La Grande Cintura Atlantica di Sargasso, luglio 2022, riprogettazione grafica delle autrici a partire da NOAAclima
The Great Atlantic Sargassum Belt, July 2022, graphic redesign by the authors starting from NOAAclima

L'invasiva presenza di Sargassum rappresenta una "nuova normalità" a cui le comunità locali devono adattarsi. L'incessante inondazione delle spiagge con biomasse di alghe crea una situazione di emergenza in termini di impatto ambientale ed economico. La rimozione della biomassa in decomposizione è costosa ed è diventata un onere sia per l'industria turistica che per i governi locali. Tipicamente, il Sargassum recuperato viene inviato in discarica o lasciato degradare in cumuli vicino alla spiaggia; gli effetti generati dal Sargassum in decomposizione come il rilascio di anidride carbonica e idrogeno solforato sono probabilmente eterni in alcune aree, dove interi ecosistemi costieri sono stati alterati [13], [14].

La grande disponibilità di Sargassum ha stimolato un forte interesse nel suo utilizzo come materia prima per realizzare un'ampia gamma di prodotti, trasformando così un rifiuto in una risorsa. Imprenditori e gruppi di ricerca lavorano allo sviluppo di imprese e progetti innovativi [13], [15], [16].

Varie sono le tecniche e le metodologie prese in considerazione, dalla digestione anaerobica agli estratti cosmetici, della produzione di plastica ai materiali da costruzione. D'altra parte la variabilità in termini di quantità, qualità e ubicazione crea una profonda incertezza per lo sviluppo di processi industriali affidabili: non conoscere i volumi approssimativi di alga bruna che si presenteranno in un determinato luogo e in un determinato tempo rende molto difficile determinarne l'impiego industriale. Questo, inoltre, limita la capacità dei potenziali investitori di eseguire proiezioni e analisi complete dei costi per valutare la fattibilità economica e la sostenibilità delle iniziative proposte. Altro fattore fondamentale riguarda la variabilità compositiva. Le specie Sargassum, citate inizialmente, sono pelagiche: non essendo ancorate ai fondali marini percorrono grandi distanze dalla loro sorgente nell'Atlantico equatoriale alle diverse località di spiaggiamento lungo le coste caraibiche per mezzo delle correnti oceaniche. Pertanto, i diversi "lotti" differiscono nella loro composizione chimica e, in particolare, nel carico di microinquinanti, richiedendo test continui.

In questo ambito, nel presente articolo verrà proposto un percorso di design di pannelli fonoassorbenti ricavati a partire da Sargassum essiccato al sole, fornito da SOS Carbon, una organizzazione spinoff del Dipartimento di Ingegneria Meccanica del Massachusetts Institute of Technology (MIT) operante a Santo Domingo [17].

La ricerca si è sviluppata in due fasi successive: una prima caratterizzazione acustica del materiale essiccato, volta a costruire un modello analitico che consenta di ottimizzare le proprietà acustiche dei pannelli proposti, ed una successiva che ha riguardato lo sviluppo di una proposta di design di un possibile prodotto finale realizzato con materiale a base di Sargassum. In questa seconda fase aspetti importanti hanno riguardato la valorizzazione della sostenibilità e dell'origine naturale del materiale, e l'individuazione di un legante di origine naturale che consenta di realizzare un pannello dimensionalmente stabile e definito.

È importante sottolineare che negli ultimi anni sono stati sviluppati diversi prodotti fonoassorbenti di design basati su materiali naturali, soprattutto nei paesi nord-europei.

L'esempio più vicino al prodotto proposto in questa ricerca è costituito dal pannello Sould [18] a base di erba del mare del nord (*eelgrass*) e prodotto dall'omonima ditta danese.

Altri esempi di pannelli ispirati a materiali naturali sono basati su:

- aghi di conifera (prodotti dalla ditta russa Eoacoustic [19];
- muschio verde (prodotti su misura dalla ditta tedesca Freund [20];
- lana e polpa di legno (prodotti dalla ditta svedese Baux [21];
- sughero (prodotti dalla ditta portoghese Gencork [22].

Ciò che accomuna tali prodotti è l'attenzione al design, in termini di resa estetica, valore architettonico e al richiamo alla natura e alla sostenibilità; questo conferisce ai prodotti un altissimo valore aggiunto che consente di commercializzarli a cifre notevolmente maggiori rispetto ai materiali fonoassorbenti tradizionali.

Le fasi di questa ricerca, illustrate nei paragrafi successivi, sono state le seguenti:

- caratterizzazione acustica e fisica del materiale in funzione della sua densità apparente, in forma sciolta (cioè privo di legante);
- modellazione analitica del campo acustico all'interno del materiale considerato come un fluido dissipativo equivalente, finalizzata alla individuazione delle densità apparente ottimali del materiale per ottenere determinate prestazioni acustiche;
- proposta prototipale di pannelli modulari fonoassorbenti con notevole contenuto di design, legati con resina di pino per mantenere la sostenibilità del prodotto finito; su tali pannelli sono stati condotti test acustici volti a valutare l'effetto del legante sulla prestazione del pannello.

È importante sottolineare che questo studio è stato sviluppato nell'ambito di una tesi di Design Industriale senza il coinvolgimento di aziende interessate alla produzione

industriale dei pannelli: esso è pertanto limitato agli aspetti di ottimizzazione acustica e di design del prodotto, e non ha approfondito altri aspetti fondamentali per la loro commercializzazione come ad esempio la resistenza al fuoco, all'umidità, all'invecchiamento o l'emissione di odori.

2 | Materiale e metodi

2.1 | Descrizione dei campioni di Sargassum

Il materiale utilizzato nell'ambito di questo progetto è costituito di Sargassum essiccato al sole, fornito dalla organizzazione spin-off SOS Carbon, che lo raccoglie direttamente in mare sulla superficie d'acqua con mezzi navali attrezzati. Si tratta di una organizzazione fondata da ricercatori e docenti del Dipartimento di Ingegneria Meccanica del Massachusetts Institute of Technology (MIT) che ha sviluppato una tecnica di raccolta economica ed a basso impatto ambientale che utilizza un macchinario chiamato Littoral Collection Module (LCM). Tale sistema può essere montato su una qualsiasi imbarcazione artigianale presente nei Caraibi e consente di raccogliere le alghe off-shore senza presenza di sabbia (Fig. 6). L'alga è stata infine essiccata al sole per 48 ore.

I test acustici sperimentali sono stati inizialmente condotti sul materiale privo di leganti (Fig. 7), inserendo un quantitativo di alghe essiccate noto in peso e comprimendolo progressivamente per misurarne le proprietà per diverse densità apparente (range compreso tra 94 kg/m^3 e 240 kg/m^3).



Fig. 6 – Processo di raccolta del Sargassum in mare, foto concesse da SOS Carbon
Harvesting process of Sargassum in the sea, photos courtesy of SOS Carbon

Successivamente sono state svolte prove al fine di realizzare un pannello di design compatto e resistente. Il processo proposto per la realizzazione di questi pannelli modulari verrà descritto nel paragrafo 2.3.



Fig. 7 – Sargassum essiccato privo di leganti oggetto dei test
Binder-free dried Sargassum tested

2.2 | Caratterizzazione fisica ed acustica dei campioni di Sargassum

Obiettivo della prima fase della ricerca è stato quello di sviluppare un modello analitico che consenta di calcolare le proprietà acustiche del Sargassum essiccato al variare della densità apparente del campione. Le misure sperimentali di assorbimento acustico sono state condotte su aggregati sciolti di Sargassum, privi di legante. Uno schema del processo di caratterizzazione e modellazione è riportato in Fig. 8.



Fig. 8 – Schema del processo di caratterizzazione e modellazione acustica

Diagram of the acoustic characterization and modeling process

La procedura utilizzata prevede l'inserimento di un peso noto di fibre all'interno di un porta-campione cilindrico, il cui spessore viene progressivamente ridotto in modo da ottenere

misure sperimentali a densità apparente variabile. Le misure del coefficiente di assorbimento acustico ad incidenza normale sono state condotte secondo la norma ISO 10534-2 [23] in un range di densità apparente ρ_a compreso tra 94 kg/m³ e 240 kg/m³ ed un range in frequenza compreso tra 100 Hz e 4300 Hz (diametro del campione cilindrico pari a 45 mm). Per comprimere progressivamente il campione durante i test sul lato esposto al campo acustico è stata applicata una rete metallica fissa priva di effetti acustici sulla misura (Fig. 9).



Fig. 9 – Apparato di misura del coefficiente di assorbimento acustico ad incidenza normale e modalità di montaggio del campione
Apparatus for measuring the sound absorption coefficient at normal incidence and sample mounting method

Sul materiale è stata inoltre effettuata una misura sperimentale di porosità utilizzando un'apparecchiatura basata sul metodo della compressione d'aria di un volume noto [24]. Attraverso questa misura, descritta in [25] e [26], è possibile ricavare la densità media della struttura del materiale ρ_m (risultata pari a 1191 kg/m³) e da questa calcolare la porosità dei campioni al variare del grado di compressione attraverso la formula:

$$\phi = 1 - \frac{\rho_a}{1191} \quad (1)$$

Il modello analitico adottato per la propagazione acustica nel materiale è quello proposto da Johnson-Champoux-Allard [27], [28] per fluido dissipativo equivalente.

Esso esprime la densità effettiva complessa ρ e il modulo di compressibilità complesso K in funzione di cinque parametri: porosità ϕ , resistività al flusso σ , tortuosità α_∞ , lunghezza caratteristica viscosa Λ e termica Λ' :

$$\rho(\omega) = \frac{\alpha_\infty \rho_0}{\phi} + \frac{\sigma}{i\omega} \sqrt{1 + \frac{4i\alpha_\infty^2 \eta \rho_0 \omega}{\sigma^2 \Lambda^2 \phi^2}} \quad (2)$$

$$K(\omega) = \frac{\gamma P_0}{\phi} \left[\gamma - (\gamma - 1) \left(1 + \frac{8\eta}{i\rho_0 \omega N_{Pr} \Lambda'^2} \sqrt{1 + \frac{i\rho_0 \omega N_{Pr} \Lambda'^2}{16\eta}} \right)^{-1} \right]^{-1} \quad (3)$$

dove ρ_0 è la densità, η la viscosità, P_0 la pressione statica e γ il rapporto dei calori specifici dell'aria.

Dalla densità effettiva e dal modulo di compressibilità è possibile calcolare l'impedenza caratteristica Z_c e la costante di propagazione del mezzo k_c :

$$Z_c = \sqrt{\rho K} \quad (4)$$

$$k_c = \omega \sqrt{\frac{\rho}{K}} \quad (5)$$

e da queste, per uno spessore h del materiale, l'impedenza superficiale Z_s e l'assorbimento acustico ad incidenza normale α_n :

$$Z_s = -iZ_c \cot(k_c h) \quad (6)$$

$$\alpha_n = \frac{4 \operatorname{Re} \left(\frac{Z_s}{\rho_0 c_0} \right)}{\left| \frac{Z_s}{\rho_0 c_0} \right|^2 + 2 \operatorname{Re} \left(\frac{Z_s}{\rho_0 c_0} \right) + 1} \quad (7)$$

I parametri fisici inseriti nel modello di JCA sono stati calcolati per inversione dalle misure acustiche sperimentali, attraverso il metodo numerico descritto in [29]: esso prevede la minimizzazione numerica dello scarto quadratico medio tra una curva sperimentale (assorbimento acustico o impedenza superficiale) e la curva analitica calcolata con il modello di fluido dissipativo equivalente. L'unico parametro fissato per ciascuna densità apparente è la porosità, misurata sperimentalmente e calcolata secondo la relazione (1), mentre gli altri quattro parametri sono stati calcolati nel processo di minimizzazione.

2.3 | Design di pannelli modulari a base di Sargassum

Il ruolo del design nella ricerca è legato ai principi di un design per il territorio, volto a sostenere le iniziative per uno sviluppo locale, che agisce nella direzione della salvaguardia ambientale. Il designer, infatti, ha il compito di pensare per un mondo che non deve crescere all'infinito, ma deve preoccuparsi delle difficoltà esistenti. L'intero studio segue le logiche del "design sistemico": dalle cause che generano l'approdo sulle spiagge fino alla raccolta, l'essiccazione e la valorizzazione. Dunque, una rivalutazione dello scarto marino e la sua conversione in pannelli fonoassorbenti, al fine di sfruttare al meglio le proprietà del materiale di partenza.

La geometria dei pannelli di design trae ispirazione da forme organiche presenti in natura, in particolar modo dalle vesciche circolari chiamate pneumotocisti che rappresentano

una vera e propria particolarità del Sargassum: bolle d'aria che permettono il galleggiamento. Il pannello proposto (Fig. 10) ha una geometria modulare che permette di realizzare superfici a parete di dimensione variabile che rappresentino un elemento di arredo.



Fig. 10 – Prototipo di pannello modulare
Modular panel prototype

Dopo un primo studio legato alle proprietà acustiche di fibre di Sargassum sciolte si è passati al processo di realizzazione del pannello prototipale/artigianale realizzando uno stampo in due semi-gusci e definendo un processo di trattamento del Sargassum con un legante sciolto in acqua (Fig. 11).

Per raggiungere un risultato ottimale è stata presa in considerazione l'ipotesi di utilizzare leganti naturali, in particolare la resina di pino. Questo fa sì che vengano tenuti saldi gli obiettivi principali del progetto: un prodotto sostenibile dal punto di vista ambientale e biodegradabile.

Per verificare il processo di realizzazione dei pannelli e l'effetto sulle performance acustiche della resina aggiunta come legante, sono stati realizzati dei campioni cilindrici con diametro di 100 mm e spessore nominale pari a 60 mm. L'alga essiccata è stata mescolata con resina di pino fusa in acqua (*Kiefernharz aus Portugal*, prodotta da *beegut GmbH*), poi compressa in uno stampo cilindrico per circa 48 ore (Fig. 12) e lasciata asciugare con ventilazione forzata per altre 48 ore.

Per verificare l'effetto della resina sono stati realizzati tre diversi campioni a partire da 66 g di alga: uno privo di resina, per verificare se la presenza della resina fosse necessaria alla realizzazione del pannello ed avere una misura acustica di riferimento, uno con 50 g di resina (rapporto 1:0.75) ed uno con 75 g di resina (rapporto 1:1.14). Si sono ottenuti così tre campioni con densità effettiva crescente tra 150 e 300 kg/m³.



Fig. 11 – Foto sulla realizzazione dei prototipi
Photos of the creation of the prototypes



Fig. 12 – Compressione del campione nello stampo
Compression of the sample in the mold

3 | Risultati sperimentali sul materiale sciolto

In questo paragrafo verranno presentati i risultati sperimentali e la modellazione acustica ottenuti sui campioni di materiale sciolto.

3.1 | Misure di assorbimento acustico

In Fig. 13 vengono riportate le curve di fonoassorbimento ad incidenza normale dei campioni testati, al variare di densità apparente e spessore. Si tratta di una prova a compressione progressiva pertanto le densità apparenti minori si riferiscono a campioni di spessore maggiore, e viceversa.

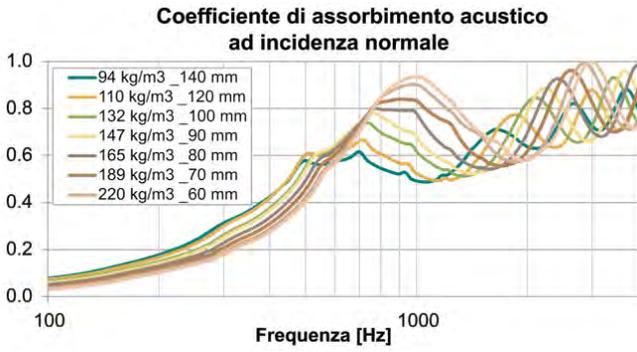


Fig. 13 – Assorbimento acustico per diverse combinazioni di densità apparente e spessore
Sound absorption for different combinations of bulk density and thickness

Dalle curve si può notare che per raggiungere valori massimi di assorbimento elevati è necessario utilizzare densità apparenti maggiori di 200 kg/m³.

3.2 | Inversione dei parametri fisici e loro interpolazione in funzione della densità apparente

In Tab. 1 vengono riportati i risultati delle inversioni effettuate sulle misure di assorbimento in funzione della densità apparente. Il valore della porosità è stato fissato per ciascuna inversione in quanto misurato sperimentalmente e calcolato tramite la formula (1). Gli altri quattro parametri fisici sono stati ricavati con un processo di minimizzazione numerica dello scarto tra la curva di assorbimento acustico sperimentale e quella calcolata con il modello analitico descritto nel paragrafo 2.2.

Per poter estendere il modello analitico a qualsiasi densità apparente, è necessario interpolare i risultati delle inversioni con formule analitiche funzione della densità apparente. La struttura delle formule utilizzate è proposta in [26], mentre i coefficienti sono stati calcolati tramite minimizzazione dello scarto quadratico medio rispetto ai valori di Tab. 1.

Tab. 1 – Parametri fisici del Sargassum al variare della densità
Physical parameters of Sargassum as density varies

Densità [kg/m ³]	σ [Ns/m ⁴]	ϕ [-]	α_{∞} [-]	Λ [μ m]	Λ' [μ m]
94.3	336	0.92	1.29	631	949
110.0	660	0.91	1.38	516	991
132.0	1143	0.89	1.46	412	835
146.7	1216	0.88	1.55	386	607
165.0	1270	0.86	1.62	279	897
188.6	2253	0.84	1.73	255	581
220.1	3384	0.82	1.9	203	518
240.1	3686	0.80	2	177	460

Il processo di interpolazione ha portato alle seguenti relazioni:

$$\sigma = \frac{\eta}{(2a)^2} \frac{\sqrt{1-(1-\phi)}}{0.21 \left(\frac{0.71}{1-\phi} - 3 \sqrt{\frac{0.71}{1-\phi} + 3} - \frac{1-\phi}{\sqrt{0.71}} \right)} \text{ [Ns/m}^4\text{]} \quad (8)$$

con $a = 120 \mu\text{m}$,

$$\alpha_{\infty} = \left(\frac{1}{\phi} \right)^{3,178} \text{ [-]} \quad (9)$$

$$\Lambda = 20,92(1 - \phi)^{-1,35} \text{ [\mu m]} \quad (10)$$

$$\Lambda' = 135,3(1 - \phi)^{-0,79} \text{ [\mu m]} \quad (11)$$

Nelle figure successive sono riportati confronti tra le curve ottenute dalle formule analitiche ed i dati ottenuti dalle inversioni e presentati in Tab. 1.

Come si può notare, per tutti i parametri le interpolazioni risultano ottimali e quindi le equazioni proposte sono idonee a calcolare i parametri fisici al variare della densità apparente del materiale sciolto.

La determinazione dei parametri fisici del materiale permette di comprendere il motivo della prestazione acustica ridotta del materiale, almeno alle densità inferiori: si può notare come la resistività al flusso d'aria del materiale sia molto bassa e cominci ad essere significativa (>3 kNs/m⁴) soltanto sopra i 200 kg/m³. Questa bassa resistività è dovuta alla dimensione molto elevata dei filamenti delle alghe essiccate, che determina una elevata grandezza caratteristica viscosa, dell'ordine delle centinaia di micron contro le decine di micron di materiali fibrosi tradizionali.

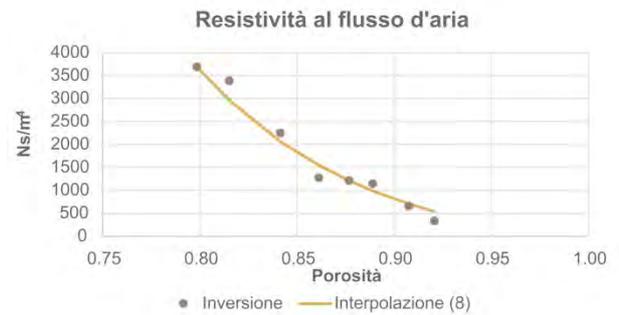


Fig. 14 – Confronto tra la resistività al flusso d'aria ottenuta per inversione dalle misure sperimentali e l'interpolazione (8)
Comparison between the airflow resistivity obtained by inversion from the experimental measurements and the interpolation (8)

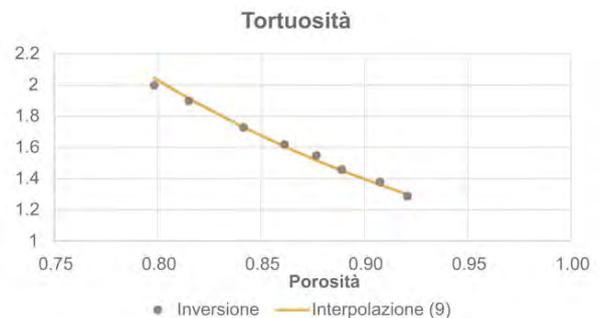


Fig. 15 – Confronto tra la tortuosità ottenuta per inversione dalle misure sperimentali e l'interpolazione (9)
Comparison between the tortuosity obtained by inversion from the experimental measurements and the interpolation (9)

Altri due parametri che si discostano molto dai materiali fibrosi tradizionali sono la porosità (piuttosto bassa quando si comprime il materiale) e la tortuosità che tende notevolmente a salire per alti gradi di compattazione. Questo dimostra come la struttura del materiale compresso sia più simile ad un materiale poroso aggregato piuttosto che un materiale fibroso, e la curva di assorbimento altamente fluttuante ne è la dimostrazione.

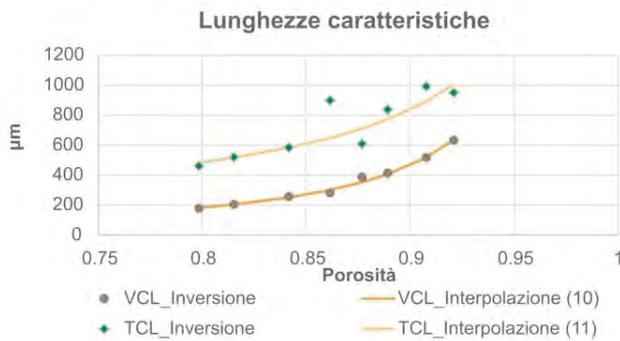


Fig. 16 – Confronto tra le grandezze caratteristiche viscosa (VCL) e termica (TCL) ottenute per inversione dalle misure sperimentali e l'interpolazioni (10) e (11)
Comparison between the viscous (VCL) and thermal (TCL) characteristic length obtained by inversion from the experimental measurements and the interpolation (10) and (11)

3.3 | Confronto tra modello analitico e misure sperimentali e simulazioni a parità di spessore

In Fig. 17 viene riportato un confronto tra le misure sperimentali e quelle ottenute dall'utilizzo del modello analitico proposto, per alcune delle densità apparenti testate.

Si può osservare che il modello è in grado di prevedere con ottima precisione il fonoassorbimento del materiale alle diverse densità apparenti.

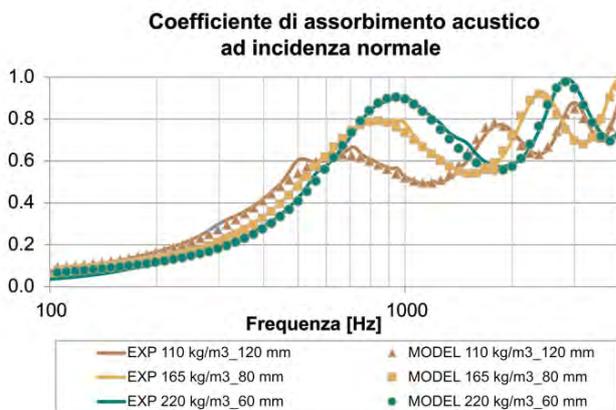


Fig. 17 – Confronto tra l'assorbimento acustico sperimentale e quello calcolato dal modello analitico proposto
Comparison between the experimental sound absorption and that calculated by the proposed analytical model

Per un confronto più immediato si può utilizzare il modello analitico per calcolare le curve di assorbimento a parità di spessore (ad esempio 50 mm) al variare della densità apparente (Fig. 18): è possibile notare che per raggiungere buone prestazioni fonoassorbenti con questo spessore il materiale necessita di elevata densità apparente, maggiore di 200 kg/m³.

Nella Fig. 18 le prestazioni del Sargassum sono confrontate con un materiale tradizionale come le fibre di roccia (densità 50 kg/m³). È evidente che il comportamento acustico del Sargassum presenta un assorbimento più selettivo caratterizzato da un picco di assorbimento vicino all'unità ma che poi tende a scendere prima e dopo del picco e fluttuare alle alte frequenze, mentre per un materiale fibroso tradizionale l'assorbimento acustico copre una banda in frequenza più ampia e l'oscillazione ad alta frequenza è limitata e intorno a valori unitari.

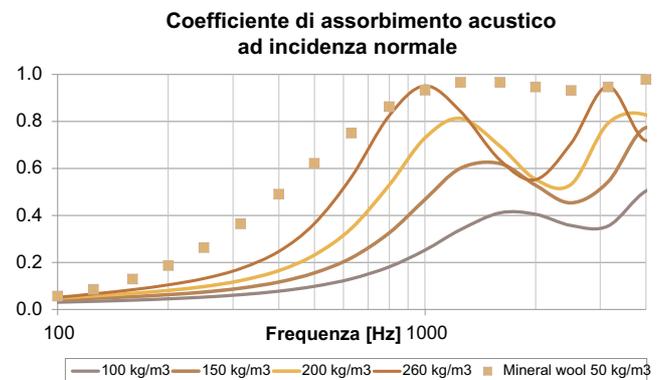


Fig. 18 – Coefficiente di assorbimento acustico al variare della densità a parità di spessore e confronto con materiale tradizionale (lana di roccia con densità 50 kg/m³)
Sound absorption coefficient as density varies with the same thickness and comparison with traditional material (mineral wool with density 50 kg/m³)

4 | Risultati sperimentali sui pannelli

La realizzazione di pannelli prototipali basati sul Sargassum, descritta nel paragrafo 2.3, può impattare sul comportamento acustico del pannello stesso, principalmente per la presenza di legante che può alterare la geometria della struttura e quindi le proprietà fisiche che determinano il fonoassorbimento; sono pertanto stati testati tre campioni cilindrici con spessore pari a 60 mm e quantitativo variabile di resina, in modo da determinare l'effetto della presenza del legante e di verificare la rigidità del materiale risultante.

In Fig. 19 sono riportate le curve di assorbimento acustico sperimentali per i tre campioni: risulta evidente che l'uso della resina determina un progressivo incremento del fonoassorbimento, dovuto principalmente ad un aumento della resistività al flusso d'aria del campione.

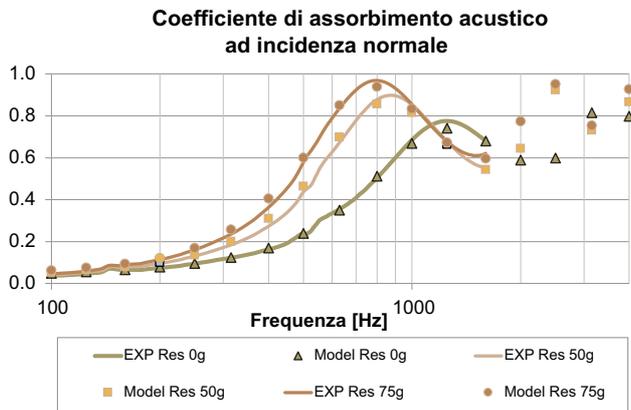


Fig. 19 – Variazione del fonoassorbimento ad incidenza normale in funzione della quantità di resina applicata
Variation of normal incidence sound absorption as a function of the quantity of resin applied

In Tab. 2 sono infatti riportati i valori dei parametri fisici ricavati per inversione [28] dalle misure acustiche. Nella stessa Fig. 19 sono riportate anche le curve di assorbimento ottenute dal modello di JCA con i parametri di Tab. 2, come validazione del processo di inversione.

Tab. 2 – Parametri fisici dei campioni di pannello di Sargassum al variare della quantità di resina
Physical parameters of Sargassum panel samples as the amount of resin varies

Densità [kg/m ³]	σ [N s/m ²]	φ [-]	α_{∞} [-]	Λ [μ m]	Λ' [μ m]
155	1085	0.89	1.36	236	735
240	3299	0.85	1.93	232	985
300	3991	0.82	1.9	170	868

Per valutare le potenzialità tecnico-commerciali di pannelli modulari realizzati con Sargassum, si è calcolato il possibile coefficiente di assorbimento ad incidenza casuale ed il relativo α_{w} determinabile secondo la norma ISO 11654 [30].

Per effettuare questo calcolo si utilizza la formula di London [31], che consente di calcolare per una lastra infinita il coefficiente di assorbimento ad incidenza casuale a partire dall'impedenza superficiale calcolata per incidenza normale, e si applica una correzione per dimensione finita del pannello proposta da Rhazi [32] e calcolata in questo caso per una dimensione pari a 1.79 x 1.25 m (immaginando una applicazione a muro di 34 moduli come da Fig. 11 e trascurando il fatto che il perimetro dei pannelli non è rettangolare ma ha una geometria più complessa).

In Fig. 20 vengono riportate le curve di assorbimento ad incidenza diffusa per tre diversi spessori dei pannelli (40 mm, 60 mm e 80 mm) ed una superficie pari a 2.24 m², ipotizzando l'impiego del quantitativo di resina massimo testato (75 g su 66 g di Sargassum essiccato). Si noti che valori del coefficiente di assorbimento acustico in campo diffuso maggiori di uno sono determinati dall'effetto della dimensione finita (ridotta) del pannello.

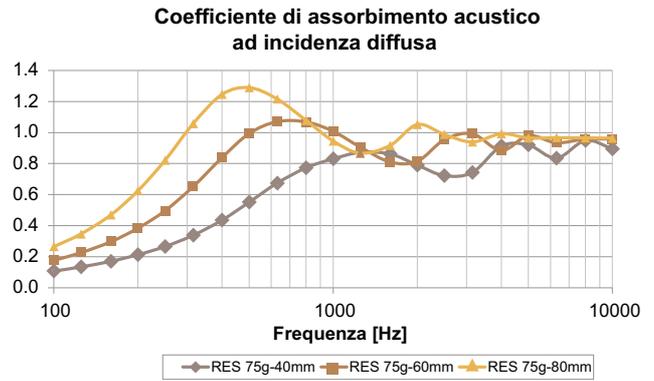


Fig. 20 – Variazione del fonoassorbimento ad incidenza diffusa in funzione della quantità di resina applicata
Variation of diffuse incidence sound absorption as a function of the quantity of resin applied

In Fig. 21 viene riportato un esempio di calcolo di α_{w} , per il pannello con maggior quantitativo di resina, uno spessore di 80 mm ed una superficie pari a 12 m² (come da procedura di misura secondo ISO 354 [33]).

Il risultato in termine di α_{w} è piuttosto elevato, pari a 0.90, e corrisponde ad un materiale di classe A. Il pannello a base di Sargassum pertanto presenta ottime potenzialità fonoassorbenti, raggiunte grazie alla presenza della resina che incrementa la prestazione acustica del materiale di base aumentandone la resistività al flusso d'aria.

Occorre sottolineare che il processo di realizzazione studiato in questa ricerca non è di tipo industriale ma volto semplicemente ad esplorare le potenzialità dell'applicazione. Nel caso di una futura produzione del pannello occorrerà studiare un procedimento industriale ed il suo effetto sulle prestazioni acustiche finali.

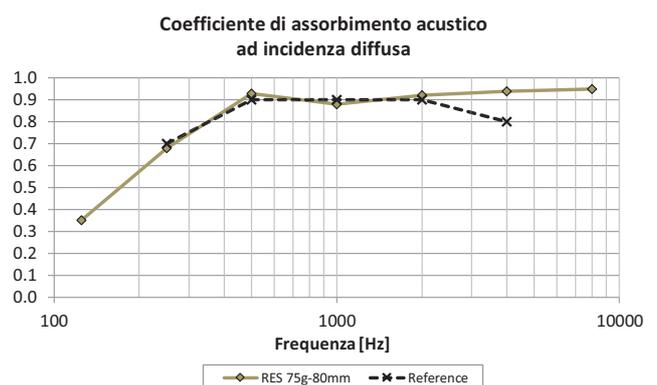


Fig. 21 – Determinazione del valore di $\alpha_{w}=0.9$
Determination of the $\alpha_{w}=0.9$

5 | Conclusioni

Alla base di questa ricerca vi è un'idea di progettazione che parte dall'ambiente e dai problemi ad esso correlati, seguendo una progettazione circolare, che implichi condivisione, prestito,

riutilizzo e riciclo dei materiali il più a lungo possibile, soprattutto se si tratta di materiali di origine naturale. Le fibre naturali hanno acquisito un'importanza significativa nel mondo di oggi per diversi motivi. Innanzitutto il loro aspetto legato alla sostenibilità non può essere sottovalutato. Con la crescente attenzione sulle questioni ambientali, le fibre naturali forniscono un'alternativa sostenibile alle fibre sintetiche, grazie a un'impronta di carbonio inferiore rispetto alle loro controparti sintetiche, che sono tipicamente derivate da fonti non rinnovabili come i combustibili fossili. La biodegradabilità delle fibre naturali è un altro fattore cruciale, a differenza delle fibre sintetiche che possono persistere nell'ambiente per centinaia di anni.

Lo studio è partito da uno specifico problema ambientale, localizzato sulle coste atlantiche dei Caraibi e dell'Africa equatoriale, ed è orientato a proporre un possibile riutilizzo delle alghe di Sargassum che attualmente costituiscono un rifiuto difficilmente gestibile nei paesi interessati.

Questo materiale, una volta raccolto ed essiccato al sole, potrebbe costituire la materia prima per realizzare pannelli fonoassorbenti da applicare a parete.

Nella prima parte della ricerca, dedicata alla caratterizzazione e modellazione acustica del materiale sciolto, si sono evidenziate le proprietà ed i limiti di tale materiale, riassumibili sostanzialmente in una necessità di raggiungere elevate densità apparenti per poter ottenere risultati acustici interessanti.

Una volta sviluppato un modello analitico che consenta di dimensionare pannelli di qualsiasi spessore e densità, si è passati ad una seconda fase, nella quale si sono pensate soluzioni di design che potessero valorizzare i pannelli, proponendo un sistema modulare con una geometria che ricorda il materiale di base.

Per realizzare questi pannelli, si è investigato sull'utilizzo di un legante naturale, a base di resina di pino, che, disciolto in acqua, consente di compattare le alghe essiccate e mantenerne la geometria. Sono stati fatti alcuni test per valutare il quantitativo di resina necessario ed il relativo effetto sulle prestazioni acustiche, da cui si è notato che la resina incrementa significativamente la resistività al flusso d'aria del campione e le proprietà fonoassorbenti del pannello.

Sulla base dei prototipi realizzati si è visto che un pannello con spessore 80 mm può raggiungere un $\alpha_w=0.90$ e quindi essere classificato come materiale di classe A secondo la norma [30].

Si può quindi concludere che questo progetto ha confermato la possibilità di realizzare pannelli fonoassorbenti basati su questo materiale, e che le prestazioni acustiche finali dipendono dal processo di realizzazione del pannello: sarà quindi fondamentale, in una eventuale industrializzazione del prodotto, valutare l'effetto acustico del processo di realizzazione dei pannelli, compresa la tipologia di legante utilizzato, seguendo la metodologia illustrata in questo articolo.

Sarà inoltre necessario approfondire aspetti fondamentali quali la resistenza al fuoco, all'umidità, all'invecchiamento di questi pannelli poiché tali aspetti non sono stati affrontati nell'ambito della tesi di laurea in Design Industriale che ha sviluppato il progetto illustrato in questo articolo.

Conclusions

At the basis of this research there is a design idea that starts from the environment and related problems to it, following a circular design, which implies sharing, borrowing, reusing and recycling materials for as long as possible, especially if these are materials of natural origin. Natural fibers have gained significant importance in today's world for several reasons. First of all, their sustainability aspect cannot be underestimated. With growing attention on environmental issues, natural fibers provide a sustainable alternative to synthetic fibres, thanks to a lower carbon footprint than their synthetic counterparts, which are typically derived from non-renewable sources such as fossil fuels. The biodegradability of natural fibers is another crucial factor, unlike synthetic fibers which can persist in the environment for hundreds of years.

This study started from a specific environmental problem, located on the Atlantic coasts of the Caribbean and equatorial Africa, and is aimed at proposing a possible reuse of Sargassum algae which currently constitute waste that is difficult to manage in the countries concerned.

This material, once collected and dried in the sun, could constitute the raw material for making sound-absorbing panels to be applied to walls.

In the first part of the research, dedicated to the characterization and acoustic modeling of the loose material, the properties and limitations of this material were highlighted, which can essentially be summarized in a need to achieve high apparent densities in order to obtain interesting acoustic results.

Once an analytical model was developed that allows panels of any thickness and density to be sized, we moved on to a second phase, in which design solutions were thought of that could enhance the panels, creating a modular system with a geometry that recalls the nature of the material.

To create these panels, the use of a natural binder, based on pine resin, was investigated: this resin, dissolved in water, allows the dried algae to be compacted and its geometry maintained. Some tests were carried out to evaluate the quantity of resin necessary and the relative effect on the acoustic performance, from which it was noted that the resin significantly increases the airflow resistivity of the sample and the sound-absorbing properties of the panel.

On the basis of the prototypes created, it was seen that a panel with a thickness of 80 mm can reach an $\alpha_w=0.90$ and therefore be classified as a class A material according to the standard [29].

It can therefore be concluded that this project has confirmed the possibility of creating sound-absorbing panels based on Sargassum algae, and that the final acoustic performances depend on the panel manufacturing process: it will therefore be fundamental, in a possible industrialization of the product, to evaluate the acoustic effect of the panel manufacturing process, including the type of binder used, following the methodology illustrated in this article.

It will also be necessary to delve into fundamental aspects such as the resistance to fire, humidity and aging of these panels since these aspects were not addressed in the degree thesis in Industrial Design which developed the project illustrated in this article.

Bibliografia

- [1] T. Yang, L. Hu, X. Xiong, M. Petru, M.T. Noman, R. Mishra, J. Militký, Sound Absorption Properties of Natural Fibers: A Review, *Sustainability* 12 (2020). <https://doi.org/10.3390/su12208477>
- [2] S. Bousshine, M. Ouakarrouch, A. Bybi, N. Laaroussi, M. Garoum, A. Tilioua, Acoustical and thermal characterization of sustainable materials derived from vegetable, agricultural, and animal fibers, *Appl. Acoust.* 187 (2022). <https://doi.org/10.1016/j.apacoust.2021.108520>
- [3] X. Tang, X. Liu, X. Yan, Investigation on the Sound Absorption Properties of Waste Green Tea Residues Covered by Woven Fabric, *J. Nat. Fibers* 19 (2020) 1323–1332. <https://doi.org/10.1080/15440478.2020.1764455>
- [4] A. Putra, K.H. Or, M.Z. Selamat, M.J.M. Nor, M.H. Hassan, I. Prasetyo, Sound absorption of extracted pineapple-leaf fibres, *Appl. Acoust.* 136 (2018) 9–15. <https://doi.org/10.1016/j.apacoust.2018.01.029>
- [5] S. Liuzzi, C. Rubino, F. Martellotta, P. Stefanizzi, C. Casavola, G. Pappaletta, Characterization of biomass-based materials for building applications: The case of straw and olive tree waste, *Industrial Crops and Products* 147 (2020). <https://doi.org/10.1016/j.indcrop.2020.112229>
- [6] H. Bhingare Nirmala, S. Prakash, An experimental and theoretical investigation of coconut coir material for sound absorption characteristics, *MaterialsToday:Proceedings* 43 (2021) 1545–1551. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2016.12.033>
- [7] G. Iannace, G. Ciaburro, A. Trematerra, Modelling sound absorption properties of broom fibers using artificial neural networks, *Appl. Acoust.* 163 (2020). <https://doi.org/10.1016/j.apacoust.2020.107239>
- [8] 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, *Appl. Acoust.* 157 (2020). <https://doi.org/10.1016/j.apacoust.2019.106999>
- [9] F. Pompoli, Acoustical Characterization and Modeling of Sustainable Posidonia Fibers, *Appl.Sci.* 13 (2023). <https://doi.org/10.3390/app13074562>
- [10] T. Astrauskas, V. Monin, T. Januševičius, Sound absorption of dried brown, red, green algae, *Proceedings of Forum Acusticum 2023, Torino 11-15 Settembre 2023*.
- [11] D. Robledo, E. Vázquez-Delfín, Y. Freile-Pelegrín, R.M. Vázquez-Elizondo, Z.N. Qui-Minet, A. Salazar-Garibay, Challenges and Opportunities in Relation to Sargassum Events Along the Caribbean Sea, *Front. Mar. Sci.* (2021). <https://doi.org/10.3389/fmars.2021.699664>
- [12] W. Cristoforo Colombo Melcer, *Il libro delle profezie, Novecento* (1995), ISBN-13: 9788837301514
- [13] A. Desrochers, S.-A. Cox, H.A. Oxenford, B. van Tussenbroek, Pelagic sargassum – A guide to current and potential uses in the Caribbean, *FAO* (2022), ISBN: 978-92-5-137320-0. <https://doi.org/10.4060/cc3147en>
- [14] J.T. Arita, L.A.R. Iporac, N.K. Bally, M.T. Fujii, L. Collado-Vides, Integrative Literature Analysis of Holopelagic Sargassum (Sargasso) in the Western Atlantic (2011–2022): Status, Trends, and Gaps. *Phycology* 2023, 3, 447–458. <https://doi.org/10.3390/phycolgy3040030>
- [15] J.L. López Miranda, L.B. Celis, M. Estévez, V. Chávez, B.I. van Tussenbroek, A. Uribe-Martínez, E. Cuevas, I. Rosillo Pantoja, L. Masia, C. Cauch-Kantun, R. Silva, Commercial Potential of Pelagic Sargassum spp. in Mexico, *Front. Mar. Sci.* (2021). <https://doi.org/10.3389/fmars.2021.768470>
- [16] H. Affan, K. Touati, M.-H. Benzaama, D. Chateigner, Y. El Mendili, Earth-Based Building Incorporating Sargassum muticum Seaweed: Mechanical and Hygrothermal Performances, *Buildings* 13 (2023). <https://doi.org/10.3390/buildings13040932>
- [17] SOS Carbon, Copyright © 2022 SOS Carbon – All Rights Reserved. <https://soscarbon.com/>
- [18] Søuld, Copyright © Søuld – All Rights Reserved. www.sould.dk/contact
- [19] EOACOUSTIC, Copyright © 2018 EOACOUSTIC – All Rights Reserved. www.eoacoustic.com/
- [20] FREUND – material fur ideen, Copyright © FREUND – All Rights Reserved. <https://freundgmbh.com/en/>
- [21] BAUX AB, Copyright © 2024 BAUX AB – All Rights Reserved. www.baux.com/
- [22] GENCORK, Copyright © 2022 GENCORK/SOFALCA – All Rights Reserved. www.gencork.com/2020/
- [23] ISO 10534-2:2023, Acoustics – Determination of acoustic properties in impedance tubes. Part 2: Two-microphone technique for normal sound absorption coefficient and normal surface impedance. www.iso.org/standard/81294.html
- [24] Y. Champoux, M.R. Stinson, G.A. Daigle, Air-based system for the measurement of porosity, *J. Acoust. Soc. Am.* 89 (1991). <https://doi.org/10.1121/1.1894653>
- [25] F. Pompoli, P. Bonfiglio, Apparecchiatura per la misura della porosità di materiali a cella aperta, *ATTI 34° Convegno AIA, Firenze 13-15 Giugno 2007*.
- [26] F. Pompoli, Acoustical Characterization and Modeling of Sustainable Posidonia Fibers, *Appl. Sci.* 13 (2023). <https://doi.org/10.3390/app13074562>
- [27] 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>
- [28] Y. Champoux, J.F. Allard, Dynamic Tortuosity and Bulk Modulus in Air-Saturated Porous Media, *J. Appl. Phys.* 70 (1991), 1975–1979. <https://doi.org/10.1063/1.349482>
- [29] P. Bonfiglio, F. Pompoli, Inversion problems for determining physical parameters of porous materials: Overview and comparison between different methods, *Acta Acust. United Acust.* 99 (2013), 341–351. <https://doi.org/10.3813/AAA.918616>
- [30] ISO 11654:1997, Acoustics – Sound absorbers for use in buildings – Rating of sound absorption www.iso.org/standard/19583.html
- [31] A. London, "The determination of reverberant sound absorption coefficient from acoustic impedance measurements", *Journal of Acoustical Society of America*, 22(2), 263–269 (1950). <https://doi.org/10.1121/1.1906600>
- [32] D. Rhazi, N. Atalla, Transfer matrix modeling of the vibroacoustic response of multi-materials structures under mechanical excitation, *J.Sound Vib.*, 329 (2010), 2532–2546. <https://doi.org/10.1121/1.3280237>
- [33] ISO 354:2003, Acoustics – Measurement of sound absorption in a reverberation room www.iso.org/standard/34545.html

Normativa acustica ISO 22955:2021 e protocollo volontario WELL per gli uffici open plan: verifica dei criteri di progettazione acustica

Virginia Tardini

Dipartimento di Ingegneria Industriale,
Università di Bologna,
Via Zamboni, 33, 40126 Bologna
virginia.tardini2@unibo.it

Ricevuto: 27/2/2024

Accettato: 30/4/2024

DOI: 10.3280/ria1-2024oa17366

ISSN: 2385-2615

Il comfort acustico nei luoghi di lavoro, quali gli uffici, garantisce il benessere dei lavoratori, migliorando la concentrazione e la produttività. Norme recenti come la ISO 22955:2021 e protocolli volontari come la certificazione WELL (WELL V2 – Sound) offrono linee guida per raggiungere il comfort acustico attraverso una corretta progettazione dell'ambiente. Le sfide sorgono soprattutto in ambienti con vincoli architettonici durante i lavori di ristrutturazione. L'analisi preliminare del presente lavoro prevede la configurazione degli ambienti in base agli standard, alla letteratura, e in ultimo da casi di studio in situ di uffici *open plan* esistenti. Gli ambienti considerati sono privi di arredi e il trattamento acustico è limitato ai controsoffitti, in conformità alla norma ISO 22955:2021. I parametri includono la valutazione dell'effetto Lombard – l'aumento involontario dello sforzo vocale del parlatore in presenza di elevato rumore ambientale – per garantire il comfort acustico negli uffici *open plan*. L'intero studio è volto ad analizzare la sinergia tra standard normativi (ISO) e protocolli volontari (WELL) al fine di individuare compatibilità nell'applicazione di entrambi i documenti.

Parole chiave: uffici open plan, compatibilità tra WELL e ISO 22955:2021, comfort, privacy

ISO 22955:2021 acoustic standard and voluntary WELL protocol for open plan offices: verification of acoustic design criteria

Acoustic comfort in workplaces such as offices ensures the well-being of workers by improving concentration and productivity. Recent standards such as ISO 22955:2021 and voluntary protocols such as the WELL certification (WELL V2 – Sound) offer guidelines for achieving acoustic comfort through proper design of the environment. Challenges arise, especially in architecturally constrained environments during renovations. Preliminary analysis of the present work involves room configuration based on standards, literature, and ultimately, from in situ case studies of existing open-plan offices. The rooms considered are devoid of furniture, and acoustic treatment is limited to suspended ceilings in accordance with ISO 22955:2021. Parameters include assessment of the Lombard effect and the involuntary increase in speech effort of the speaker in the presence of high ambient noise to ensure acoustic comfort in open-plan offices. The study analyzes the synergy between normative standards (ISO) and voluntary protocols (WELL) to identify compatibility when applying both documents.

Keywords: open-plan offices, compatibility between WELL e ISO 22955:2021, comfort, privacy

1 | Introduzione

La questione dell'acustica negli uffici è complessa, con diversi aspetti critici da considerare. È fondamentale garantire un adeguato trattamento acustico per migliorare la privacy, la concentrazione e la produttività dei lavoratori. Negli ultimi anni, sono state sviluppate normative e protocolli internazionali, come la ISO 22955:2021 [1], e il protocollo volontario WELL [2], che pongono particolare attenzione agli uffici open plan.

Le normative e i protocolli variano da paese a paese, considerando le caratteristiche degli ambienti lavorativi. Ad esempio, negli Stati Uniti, gli standard come ASTM [3] sono diversi rispetto a quelli europei, influenzando il modo in cui gli ambienti sono progettati e valutati.

Le norme ISO e il protocollo WELL definiscono obiettivi e criteri per il controllo del rumore negli uffici, ma hanno ap-

procci diversi. Mentre la ISO 22955 si concentra sull'acustica generale degli uffici, il protocollo WELL offre criteri misurabili per il comfort acustico [1,2].

È importante considerare le differenze tra norme e protocolli e adattarli alle specifiche esigenze e contesti geografici. Ad esempio, gli uffici europei e quelli americani possono avere caratteristiche architettoniche e pratiche diverse che influenzano le strategie di progettazione acustica.

Inoltre, per affrontare il rumore indesiderato, come quello generato dalla cosiddetta conversazione irrilevante, sono necessari interventi indiretti come l'uso di *baffle*, schermi e trattamenti acustici.

L'analisi approfondita delle normative e dei protocolli, insieme alla comprensione dei contesti geografici e delle esigenze specifiche, è essenziale per sviluppare progetti di uffici

che garantiscano un ambiente acusticamente confortevole per i lavoratori.

In sintesi, i punti chiave riguardanti la norma internazionale ISO 22955:2021 e il protocollo volontario a punti WELL per la caratterizzazione acustica degli uffici sono:

- La ISO 22955:2021 è una normativa internazionale ma sviluppata sostanzialmente in ambiente europeo. È pensata per essere aspirazionale e non cogente e riporta, i valori di progettazione acustica e di verifica di collaudo per contenere il livello di rumore ambientale all'interno di uffici. I valori che indica non sono quindi valori limite, ma sono valori cui si ambisce di arrivare [1].
- Il WELL è un protocollo volontario a punti sviluppato in ambito US [3] con riferimenti anche agli standard locali dell'Oceania [4]. Nei criteri definiti nella categoria Sound, riporta una serie di requisiti piuttosto semplici da quantificare preliminarmente, e/o da collaudare in opera. Il rispetto di ciascuno di questi criteri porta all'acquisizione di un punteggio, spesso con valori bonus qualora il criterio sia raggiunto con un certo margine [2].

L'obiettivo di questa ricerca, partendo dalla base dei dati raccolti e dai risultati ottenuti, è quello di analizzare le caratteristiche WELL per gli *open plan* e confrontarle con i requisiti della norma ISO 22955:2021, al fine di individuare la compatibilità delle applicazioni e sviluppare alcune possibili considerazioni per una corretta progettazione degli uffici [1,2].

2 | Materiali e metodi

Il WELL V2 Sound definisce sei caratteristiche, tra cui la *feature S04 – Reverberation Time* e la *feature S05 – Sound Reducing Surfaces*. Ogni caratteristica si ispira ad altri standard tecnici locali. I requisiti per la *feature S04 – Reverberation Time* sono definiti secondo tre diverse fasce di volumi (piccoli, medi, grandi), a cui corrispondono tre diverse fasce di requisiti di tempo di riverberazione in condizioni di ambiente arredato e non occupato, come riportato in Tab. 1. [2]

Tab. 1 – Limiti del tempo di riverberazione secondo la caratteristica S04 del protocollo volontario a punti WELL [2]
Reverberation time limits according to feature S04 of the voluntary point protocol WELL [2]

Space type	Space Volume, v $ft^3(m^3)$	Reverberation Time, t (seconds)
Areas for learning and conferencing	$v < 10000 ft^3 (280 m^3)$	$t \leq 0.6$
	$10000 ft^3 (280 m^3) \leq v \leq 20000 ft^3 (570 m^3)$	$0.5 \leq t \leq 0.8$
	$v > 20000 ft^3 (570 m^3)$	$0.6 \leq t \leq 1.0$

La *feature S05 – Sound Reducing Surfaces* del WELL identifica due possibilità diverse a seconda del punteggio che si vuole raggiungere.

Per il raggiungimento di 1 punto, si ha (1):

$$\frac{A}{S_{floor}} > 0.6 \quad [-] \quad (1)$$

Per il raggiungimento di 2 punti, si ha (2):

$$\frac{A}{S_{floor}} > 0.9 \quad [-] \quad (2)$$

dove:

- A è l'area di assorbimento equivalente (m^2);
- S_{floor} è la superficie del pavimento (m^2).

La *feature S05* è definita in condizioni di ambiente vuoto; quindi, non prende in considerazione i miglioramenti che si otterrebbero in condizione arredata. Lo standard ISO 22955:2021, per gli stessi ambienti di lavoro, richiede una quantità di area di assorbimento equivalente pari ad almeno il 90% della superficie del pavimento. Si ha così il risultato di mantenere il livello di rumore sotto controllo, garantendo il benessere dei lavoratori all'interno degli spazi, e di contenere l'effetto Lombard. Vale dunque la stessa relazione espressa dall'equazione 2 riferita al protocollo WELL.

L'analisi dei requisiti acustici per la caratterizzazione di uffici *open plan* è stata sviluppata considerando lo stato dell'arte, dati sperimentali raccolti con una *literature review*, e 14 casi studio misurati in sito. Ciascun ambiente è stato considerato piccolo ($V < 280 m^3$), medio ($280 \leq V \leq 570 m^3$) o grande ($V > 570 m^3$), secondo *WELL feature S04 – Reverberation Time*. I calcoli vengono condotti ad ambiente vuoto, non arredato e non occupato, e con il solo trattamento assorbente a controsoffitto, in conformità a quanto prescritto dalla ISO 22955 e dal WELL [1,2].

L'approccio seguito nei calcoli si articola come di seguito, ed è illustrato graficamente in Fig. 1:

1. Si calcola l'assorbimento di progetto in funzione dei requisiti fissati dalle normative.
2. Si calcola il corrispondente tempo di riverberazione, verificando se esso risulta idoneo in relazione ai requisiti fissati dal WELL.
3. Si calcola (e si discute) il coefficiente di assorbimento medio corrispondente.

Durante l'analisi gli ambienti utilizzati sono stati divisi come riportato in Tab. 2.

Tab. 2 – Riepilogo della suddivisione degli ambienti utilizzati in funzione dei range di volume definiti dalla feature S04 del protocollo WELL [2]

Summary of the environments' subdivision according to the volume ranges defined by feature S04 of the WELL protocol [2]

	Piccole dimensioni ($V < 280 m^3$)	Medie dimensioni ($280 \leq V \leq 570 m^3$)	Grandi dimensioni ($V > 570 m^3$)
Stato dell'arte	A, B, C	D, E, F	G, H, I
Literature review	A, B, C	/	D, E, F, G, H, I
Casi studio (in sito)	Uffici 10, 11, 12, 13, 14	Ufficio 7	Uffici 1, 2, 3, 4, 5, 6, 8, 9

Gli uffici *open plan* definiti secondo lo stato dell'arte e gli esempi ritrovati in letteratura si assume che siano di forma parallelepipedica e realizzati con proporzioni definite (1:4) per soddisfare le ipotesi della formula di Sabine. Questa semplificazione nasce in quanto nel primo caso si fa riferimento a geometrie ideali, e nel secondo non sempre le informazioni necessarie per ricostruire correttamente l'ambiente considerato erano definite in modo chiaro. Al contrario, per i casi studio in sito sono state considerate le dimensioni reali, direttamente misurate.

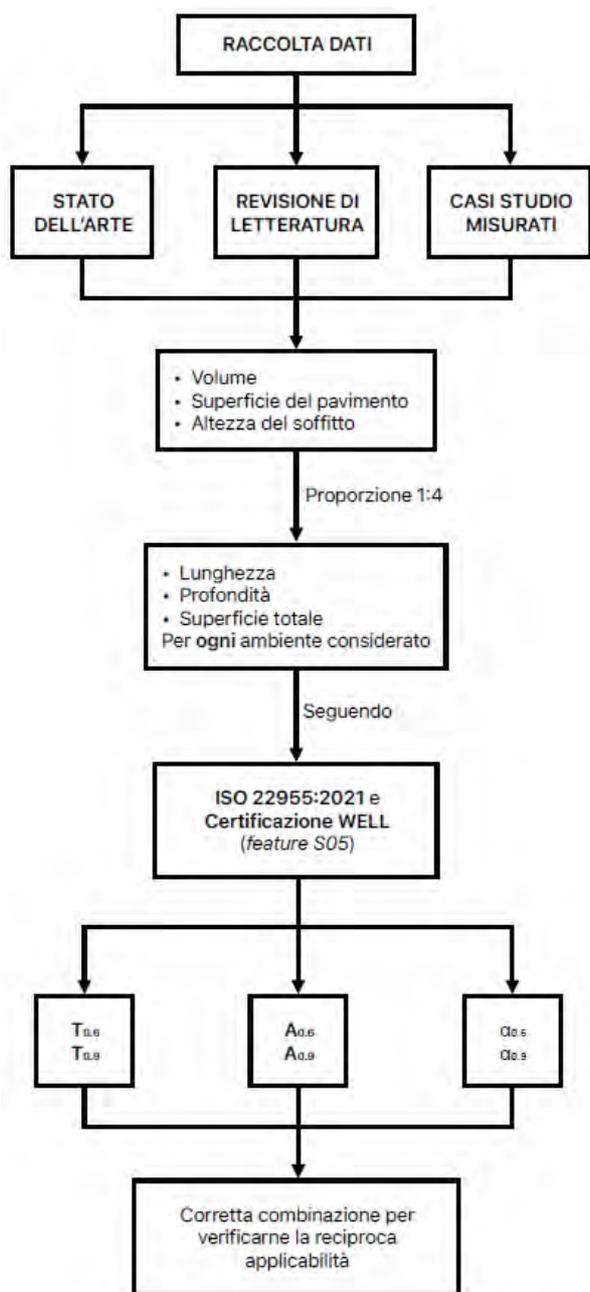


Fig. 1 – Flow chart illustrante in dettaglio il procedimento seguito per lo sviluppo dell'intera analisi, delineando le fasi, le interconnessioni e le decisioni coinvolte nel processo di elaborazione e valutazione dei dati
Flow chart detailing the process of developing the entire analysis, outlining the steps, interconnections, and decisions involved in the data processing and evaluation process

2.1 | Caratterizzazione di un ufficio *open plan* definito secondo lo stato dell'arte

Il metodo applicato per la definizione delle geometrie prevede l'ipotesi di nove configurazioni di uffici ideali, caratterizzati da tre volumi specifici (250, 450, 650 m³) e tre altezze (2.70, 3.00, 3.30 m), sulla base delle categorie di volume indicate dal WELL [2], come si vede in Tab. 3. Tutte le geometrie studiate hanno le altezze descritte, con proporzione tra lunghezza e profondità di 1:4.

Tab. 3 – Geometrie dei casi studio ideali ipotizzati secondo le categorie di volumi identificati dal protocollo volontario WELL [2].
Geometries of the ideal case studies hypothesized according to the volume categories identified by the voluntary WELL protocol [2]

Areas for learning, lectures, and conferencing						
	V (m ³)	h (m)	S _{floor} (m ²)	l ⁽¹⁾ (m)	w ⁽¹⁾ (m)	S _{tot} (m ²)
A	250	2.70	92.6	19.2	4.8	315.1
B		3.00	83.3	18.3	4.6	303.6
C		3.30	75.8	17.4	4.4	295.1
D	450	2.70	166.7	25.8	6.5	507.6
E		3.00	150.0	24.5	6.1	483.7
F		3.30	136.4	23.4	5.8	465.4
G	650	2.70	240.7	31.0	7.8	690.9
H		3.00	216.7	29.4	7.4	654.1
I		3.30	197.0	28.1	7.0	625.5

⁽¹⁾ calcolato con proporzione 1:4

2.2 | Caratterizzazione di un ufficio *open plan* definito secondo la raccolta di dati sperimentali

Il metodo applicato per la definizione delle geometrie fa riferimento ai dati sperimentali raccolti attraverso una revisione di letteratura considerando quanti più articoli possibili pubblicati negli ultimi anni sull'argomento *open plan offices*.

Le parole chiave, in inglese, per eseguire questa ricerca sono state:

- *Open-plan offices;*
- *Open workspaces;*
- *ISO 3382-3:2021;*
- *Measurements;*
- *Standards published after 2012.*

Dalla lettura di 84 abstract di articoli pubblicati dal 2017 al 2023, cercando misure e dati di progetto, sono stati selezionati 31 articoli, per un totale di 130 casi studio di uffici *open plan* [5-9]. Analizzando gli articoli scelti, emerge che i parametri presi in considerazione in questi anni per i vari *workplaces* – misure o simulazioni di laboratorio – da diversi paesi in tutto il mondo, possono essere suddivisi in due macrocategorie:

1. Sintesi di sintesi dei parametri geometrici degli uffici.
2. Sintesi delle categorie per tipologia di intervento acustico (numero totale e percentuale).

Per ognuna di queste due sottocategorie sono stati definiti i parametri da indagare. Infatti, per la prima – *statistiche di sintesi dei parametri degli uffici* – sono stati individuati:

- numero di postazioni di lavoro (-)
- densità delle postazioni di lavoro (numero/m²);
- altezza del soffitto (m);
- superficie (m²).

Per ognuno di questi parametri e per ogni ufficio analizzato sono state calcolate la media, la deviazione standard, la mediana e la deviazione assoluta mediana. I risultati ottenuti sono riassunti in Tab. 4.

Tab. 4 – Statistiche di sintesi dei parametri geometrici delle postazioni di lavoro all'interno degli uffici open plan, raccolti attraverso literature review
Summary statistics of geometric parameters of workstations within open plan offices, collected through literature review

Statistiche di sintesi dei parametri degli uffici				
Parametri	media	deviazione standard	mediana	deviazione assoluta mediana
N. di postazioni di lavoro (-)	26.4	33.7	15	7
Densità delle postazioni di lavoro (num/m ²)	0.3	0.3	0.15	0.07
h _{soffitto} (m)	3.2	0.7	2.9	0.3
S _{pavimento} (m ²)	267.2	228.2	186.9	83.9

Si osservi che tra tutti gli ambienti analizzati:

- per 5 uffici il numero di postazioni di lavoro non è definito;
- per 5 uffici non è definito il numero di densità delle postazioni di lavoro;
- per 27 uffici non è definita l'altezza del soffitto;
- per 6 uffici non è definita la superficie.

Mentre per il secondo – *sintesi delle categorie* – sono stati individuati:

- Tipo di controsoffitto;
- Moquette;
- *Activity-based workplace* (ABW);
- Divisori/schermi.

Per ognuno di questi parametri sono stati analizzati il soffitto, il pavimento, il luogo di lavoro (ABW) e la presenza di schermi tra le postazioni di lavoro.

Si noti che non tutti i parametri sopra elencati sono esattamente definiti per ogni ambiente e dove l'informazione non è riportata in letteratura, in fase di raccolta dati viene identificata come "non definita". In ogni caso, si tratta di una percentuale molto ridotta di dati rispetto al totale, come è possibile vedere in Fig. 2. Non sono stati riportati grafici a torta del parametro ABW, poiché in letteratura esso compare solo in 3 dei 31 articoli analizzati e senza informazioni significative [5-9].

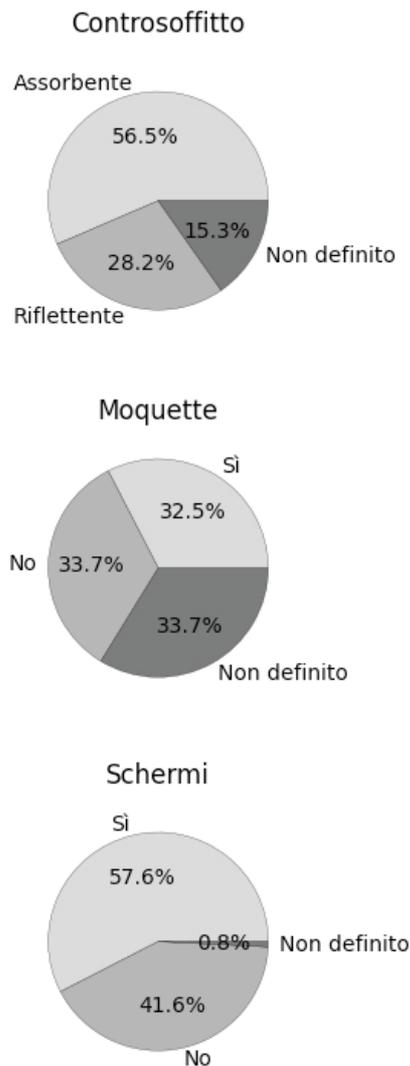


Fig. 2 – Grafici a torta con le percentuali dei materiali e delle caratteristiche degli uffici analizzati durante la revisione di letteratura, utili per avere una visione macroscopica a livello Europeo e non Europeo delle diverse configurazioni di uffici open plan

Pie charts with the percentages of office materials and characteristics analyzed during the literature review, helpful in getting a macroscopic view at the European level and not European of different open plan office configurations

Dalla revisione di letteratura sembra emergere che da un lato, il controsoffitto è il primo intervento che viene preso in considerazione, mentre il trattamento del pavimento non è così frequente. D'altra parte, l'uso di schermi sembra essere un elemento comune.

Partendo dai dati raccolti in Tab. 4, come nel paragrafo precedente, si è proceduto al confronto, prendendo in considerazione il valore medio della superficie del pavimento e dell'altezza, a cui si è sommata e sottratta la rispettiva deviazione standard. Questo ha permesso di identificare diverse superfici del pavimento (38.9, 267.2, 495.4 m²), considerando per ognuna di queste tre diverse altezze (2.4, 3.2, 3.9 m), ottenendo nove configurazioni diverse. Le caratteristiche geometriche degli ambienti analizzati sono riportate di seguito in Tab. 5.

Tab. 5 – Geometrie dei casi studio ipotizzati secondo le categorie di volumi identificati con la raccolta dati sviluppata mediante literature review, mantenendo invariata la divisione dei volumi degli ambienti definita dal protocollo volontario WELL [2]

Geometries of the hypothesized case studies according to the volume categories identified with the data collection developed through literature review, keeping the volume division of environments defined by the voluntary WELL protocol unchanged [2]

Areas for learning, lectures, and conferencing						
	S_{floor} (m ²)	h (m)	V (m ³)	$l^{(1)}$ (m)	$w^{(1)}$ (m)	S_{tot} (m ²)
A		2.4	94.5	25.0	6.2	462.9
B	38.9	3.2	123.2	25.0	6.2	508.8
C		3.9	151.8	25.0	6.2	554.7
D		2.4	648.9	65.4	16.3	2534.3
E	267.2	3.2	845.6	65.4	16.3	2654.6
F		3.9	1042.3	65.4	16.3	2775.0
G		2.4	1203.2	89.0	22.3	4503.8
H	495.4	3.2	1568.0	89.0	22.3	4667.7
I		3.9	1932.7	89.0	22.3	4831.6

⁽¹⁾ calcolato con proporzione 1:4

I dati raccolti aiuteranno la ricerca a definire correttamente di diverse configurazioni di ambienti (9) simili a quelli esistenti in altri Paesi, diversi dall'Italia. Questo è fondamentale per avere una visione più ampia possibile del panorama globale degli uffici *open plan*.

2.3 | Caratterizzazione di un ufficio *open plan* definito secondo misure in situ di casi studio

Tab. 6 – Geometrie dei casi studio ipotizzati secondo le categorie di volumi identificati con la raccolta dati sviluppata mediante misure in situ mantenendo invariata la divisione dei volumi degli ambienti definita dal protocollo volontario WELL [2]

Geometries of the hypothesized case studies according to the volume categories identified with the data collection developed through in situ measurements, keeping the volume division of the environments defined by the voluntary WELL protocol unchanged [2]

Areas for learning, lectures, and conferencing						
	V (m ³)	h (m)	S_{floor} (m ²)	l (m)	w (m)	S_{tot} (m ²)
U1	885	3	248	33	7.5	738
U2	1668	4	417	26.2	15	1163.6
U3	2680	4	670	51.8	12.9	1857.7
U4	920	4	230	30.3	7.6	763.3
U5	1600	4	400	40.0	10.0	1200.0
U6	760	4	190	27.6	6.9	655.7
U7	520	4.35	120	21.9	5.5	478.3
U8	770	4.35	177	26.6	6.7	643.4
U9	730	3.8	192	27.7	6.9	647.3
U10	32	3	11	6.6	1.7	71.7
U11	44	3	15	7.7	1.9	88.1
U12	44	3	15	7.7	1.9	88.1
U13	26	3	9	6.0	1.5	63.0
U14	142	4.35	33	11.5	2.9	190.9

Per dare una maggiore solidità allo studio, sono stati analizzati 14 uffici *open plan* misurati *in situ* e appartenenti a diverse aziende. Le informazioni generali emerse sono:

- da 26 a 61 postazioni di lavoro;
- superficie del pavimento da 192 a 417 m²;
- soffitto trattato con materiali fonoassorbenti;
- pareti di vetro lungo i lati principali e tra alcuni uffici;
- schermi di diverse altezze tra le scrivanie.

Le geometrie di ciascun *open plan* misurato sono raccolte in Tab. 6.

3 | Risultati

La grande quantità di dati ottenuti dalla creazione di geometrie ideali, dall'analisi di letteratura e dai casi studio ha permesso di avere una visione globale e completa di quella che è la situazione, ad oggi, degli uffici *open plan* ed avere una visione d'insieme quanto più veritiera possibile.

Il confronto è sviluppato considerando:

- l'ambiente con il controsoffitto trattato acusticamente, in condizioni non arredate e non occupate;
- i valori di tempo di riverberazione secondo la *feature S04 – Reverberation Time* del WELL [2];
- i requisiti di A/S_{floor} secondo WELL (*feature S05 – Sound Reducing Surfaces*) [2] e la ISO 22955:2021 [1].

In questa fase di elaborazione dei risultati, sono state utilizzate famiglie di ambienti suddivise come precedentemente riportato in Tab. 2.

3.1 | Risultati ottenuti dalla caratterizzazione di un ufficio *open plan* definito secondo lo stato dell'arte

Di seguito si riporta il confronto sviluppato attraverso le nove diverse configurazioni ideali, precedentemente definite (Tab. 3).

I risultati ottenuti sono riportati di seguito in Tab. 7.

Tab. 7 – Risultati ottenuti dalle elaborazioni dei dati definiti dalle geometrie dei casi studio ideali ipotizzati secondo le categorie di volumi identificati dal protocollo volontario WELL e dalla ISO 22955:2021 [1,2]

Results from the data processing defined by the geometries of the ideal case studies assumed according to the volume categories identified by the voluntary WELL protocol and ISO 22955:2021 [1,2]

	$A_{0.6}$ (m ²)	$A_{0.9}$ (m ²)	$T_{0.6}$ (s)	$T_{0.9}$ (s)	$\bar{\alpha}_{0.6}$ (-)	$\bar{\alpha}_{0.9}$ (-)
A	56	83	0.72	0.48	0.18	0.26
B	50	75	0.80	0.53	0.16	0.25
C	45	68	0.88	0.59	0.15	0.23
D	100	150	0.72	0.48	0.20	0.30
E	90	135	0.80	0.53	0.19	0.28
F	82	123	0.88	0.59	0.18	0.26
G	144	217	0.72	0.48	0.21	0.31
H	130	195	0.80	0.53	0.20	0.30
I	118	177	0.88	0.59	0.19	0.28

Dal confronto di $T_{0,6}$ e $T_{0,9}$, con i limiti WELL, si ha che in $T_{0,6}$ gli uffici A, B, C (250 m³) hanno tempi di riverberazione superiori al valore massimo consentito (0.6 secondi), ma aggiungendo gli arredi questo valore tenderà a diminuire, e a rientrare nel limite. Lo stesso vale per gli ambienti E, F (450 m³). Nel caso di $T_{0,9}$ per gli ambienti D (450 m³) e G, H, I (650 m³) il tempo di riverberazione è inferiore ai limiti minimi definiti dal WELL ($0.5 \leq t \leq 0.8$ s in D e $0.6 \leq t \leq 1$ s in G, H, I). Pertanto, aggiungendo l'arredo, $T_{0,9}$ continuerà a diminuire, allontanandosi sempre di più dal limite minimo [2].

I tempi di riverberazione hanno un andamento a ramo di iperbole, come si nota in Fig. 3.

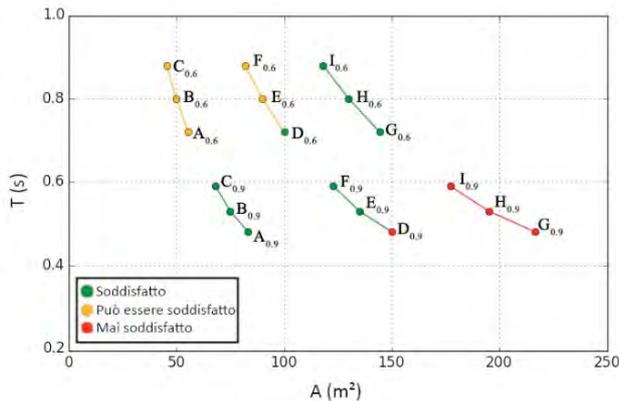


Fig. 3 – Andamento del tempo di riverberazione calcolato nelle nove configurazioni di casi ideali (da A a I), per ognuna delle due disuguaglianze ($A/S_{floor} > 0.6$ e $A/S_{floor} > 0.9$) definite da ISO 22955:2021 e WELL V2 – Sound [1,2]

Trend of reverberation time calculated in the nine ideal case configurations (A to I) for each of the two inequalities ($A/S_{floor} > 0.6$ and $A/S_{floor} > 0.9$) defined by ISO 22955:2021 and WELL V2 – Sound [1,2]

È importante notare che, come mostrato in Fig. 4, i coefficienti di assorbimento acustico $\bar{\alpha}_{0,9}$ sono indicativi di un allontanamento dalle ipotesi su cui si basano le formule previsionali della ISO 12354-6 [10]. Ciò avviene per due motivi principali:

- i coefficienti di assorbimento sono superiori alla regione di validità sabiniana ($\bar{\alpha} < 0.2$);
- il valore di $\bar{\alpha}$ è distribuito in modo non omogeneo, poiché l'assorbimento acustico è concentrato sul soffitto.

Le curve, mostrate in Fig. 4, ottenute dall'interpolazione dei valori di $(\bar{\alpha}_{0,6}, A_{0,6})$ e $(\bar{\alpha}_{0,9}, A_{0,9})$ decrescono con un andamento non lineare. Per il caso $A/S_{floor} > 0.6$, $\bar{\alpha}_{0,6}$ in media è pari a 0.18, mentre per il caso $A/S_{floor} > 0.9$, $\bar{\alpha}_{0,9}$ in media è pari a 0.28.

I valori di $T_{0,6}$ in alcune configurazioni sono superiori ai limiti WELL [2]. Al contrario, in alcuni casi $T_{0,9}$ presenta valori inferiori al requisito minimo e l'aggiunta di arredi e occupazione contribuirà a diminuire sempre più i valori di $T_{0,9}$ aumentando l'allontanamento dal limite minimo. A questi valori di $T_{0,9}$ corrispondono valori di $\bar{\alpha}_{0,9}$ maggiori o uguali a 0.3, che, come si nota in Fig. 4, sono i più lontani dalla regione di Sabine.

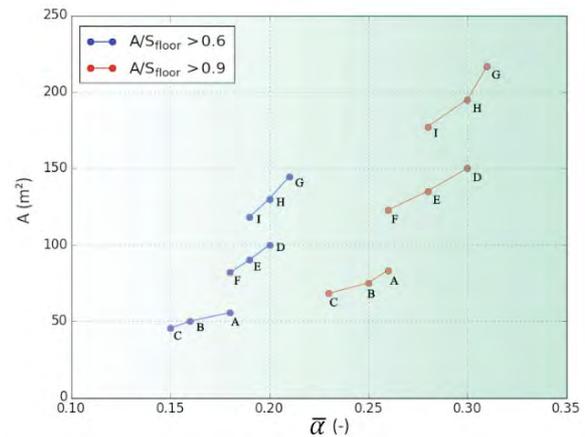


Fig. 4 – Andamento dell'area di assorbimento equivalente, in relazione al coefficiente di assorbimento medio, calcolato nelle nove configurazioni di casi ideali (da A a I), per ognuna delle due disuguaglianze ($A/S_{floor} > 0.6$ e $A/S_{floor} > 0.9$) definite da ISO 22955:2021 e WELL V2 – Sound [1,2]

Trend of the equivalent absorption area, in relation to the average absorption coefficient, calculated in the nine ideal case configurations (A to I), for each of the two inequalities ($A/S_{floor} > 0.6$ and $A/S_{floor} > 0.9$) defined by ISO 22955:2021 and WELL V2 – Sound [1,2]

3.2 | Risultati ottenuti dalla caratterizzazione di un ufficio open plan definito secondo la raccolta di dati sperimentali

Per effettuare i calcoli, sono state seguite le prescrizioni fornite da WELL e ISO 22955:2021, precedentemente descritte [1,2]. Tutti i risultati ottenuti sono raccolti in Tab. 8 [5-9].

Tab. 8 – Risultati ottenuti dalle elaborazioni dei dati definiti dalle geometrie dei casi studio definiti tramite raccolta dati sperimentale, eseguita in fase di literature review, secondo le categorie di volumi identificati dal protocollo volontario WELL e dalla ISO 22955:2021 [1,2,5-9]

Results obtained from data processing defined by case study geometries defined through experimental data collection, performed in the literature review, according to the volume categories identified by the voluntary WELL protocol and ISO 22955:2021 [1,2,5-9]

	$A_{0,6}$ (m ²)	$A_{0,9}$ (m ²)	$T_{0,6}$ (s)	$T_{0,9}$ (s)	$\bar{\alpha}_{0,6}$ (-)	$\bar{\alpha}_{0,9}$ (-)
A	23.4	35.0	0.65	0.43	0.05	0.08
B	23.4	35.0	0.84	0.56	0.05	0.07
C	23.4	35.0	1.04	0.69	0.04	0.06
D	160.3	240.4	0.65	0.43	0.06	0.09
E	160.3	240.4	0.84	0.56	0.06	0.09
F	160.3	240.4	1.04	0.69	0.06	0.09
G	297.2	445.9	0.65	0.43	0.07	0.10
H	297.2	445.9	0.84	0.56	0.06	0.10
I	297.2	445.9	1.04	0.69	0.06	0.09

Gli uffici open plan ottenuti dalla analisi di letteratura possono essere classificati, in base alle geometrie che presentano secondo WELL, come:

- A, B, C: Uffici open plan di piccole dimensioni ($V < 280$ m³);

- D, E, F, G, H, I: Uffici *open plan* di grandi dimensioni ($V > 570 \text{ m}^3$).

Dove sei uffici su nove sono *open plan* di grandi dimensioni.

Gli uffici *open plan* considerati in letteratura provengono da diversi paesi, tra cui Finlandia, Germania, Austria, Spagna e Gran Bretagna fino ad Australia, Cina e Corea [5-9]. La maggior parte di questi ha il pavimento interamente rivestito di moquette, un soffitto completamente assorbente e gli schermi quasi sempre presenti.

Qui è interessante spostare l'attenzione sugli uffici di grandi dimensioni ($0.6 \leq t \leq 1.0 \text{ s}$). Alcune configurazioni presentano lo stesso problema in termini di rispetto dell'intervallo di T per gli ambienti di grandi dimensioni rilevato precedentemente per $T_{0.9}$. Infatti:

- D con $T_{0.9} = 0,43 \text{ s}$;
- E con $T_{0.9} = 0,56 \text{ s}$;
- G con $T_{0.9} = 0,43 \text{ s}$;
- H con $T_{0.9} = 0,56 \text{ s}$.

Tutte queste configurazioni hanno un tempo di riverberazione inferiore al limite minimo. Pertanto, aggiungendo arredi e considerando il contributo di assorbimento delle persone, il tempo di riverberazione tenderà a diminuire maggiormente, come mostrato in Fig. 5.

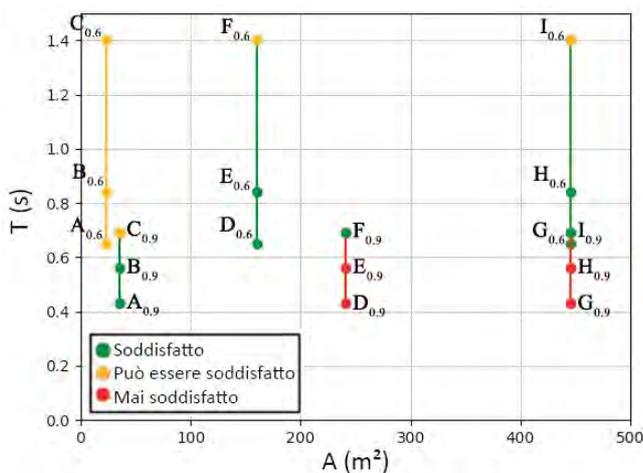


Fig. 5 – Andamento del tempo di riverberazione calcolato nelle nove configurazioni di ambienti con geometrie definite mediante la raccolta dati sperimentale (da A a I), per ognuna delle due disuguaglianze ($A/S_{\text{floor}} > 0.6$ e $A/S_{\text{floor}} > 0.9$) definite da ISO 22955:2021 e WELL V2 – Sound [1,2,5-9]

Calculated reverberation time trends in the nine-room configurations with geometries defined by experimental data collection (A to I) for each of the two inequalities ($A/S_{\text{floor}} > 0.6$ and $A/S_{\text{floor}} > 0.9$) defined by ISO 22955:2021 and WELL V2 – Sound [1,2,5-9]

Per valutare A/S_{floor} i calcoli sono stati eseguiti partendo dai dati di S_{floor} ottenuti dalla Literature review (38.9, 267.2, 495.4 m²) [5-9].

I risultati ottenuti per ogni configurazione sono riportati in Fig. 6.

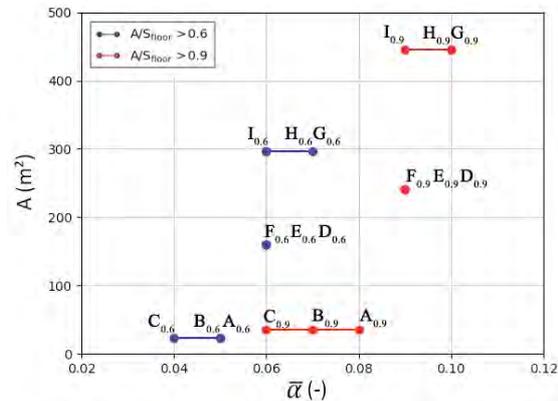


Fig. 6 – Andamento dell'area di assorbimento equivalente, in relazione al coefficiente di assorbimento medio, calcolato nelle nove configurazioni di ambienti con geometrie definite mediante la raccolta dati sperimentale (da A a I), per ognuna delle due disuguaglianze ($A/S_{\text{floor}} > 0.6$ e $A/S_{\text{floor}} > 0.9$) definite da ISO 22955:2021 e WELL V2 – Sound [1,2,5-9]

Trend of the equivalent absorption area, in relation to the average absorption coefficient, calculated in the nine-room configurations with geometries defined by experimental data collection (A to I) for each of the two inequalities ($A/S_{\text{floor}} > 0.6$ and $A/S_{\text{floor}} > 0.9$) defined by ISO 22955:2021 and WELL V2 – Sound [1,2,5-9]

In entrambi i casi i coefficienti $\bar{\alpha}_{0.6}$ e $\bar{\alpha}_{0.9}$ in condizioni non arredate e non occupate rientrano nella regione di validità di Sabine ($\bar{\alpha} < 0.2$), quindi considerando il contributo di arredi e persone, la A aumenterà e l'ambiente tenderà a non essere più sabiniano.

3.3 | Risultati ottenuti dalla caratterizzazione di un ufficio *open plan* definito secondo le misure in sito

Partendo dai dati raccolti dalle misure in sito, per effettuare i calcoli, sono state seguite le prescrizioni, precedentemente

Tab. 9 – Risultati ottenuti dalle elaborazioni dei dati definiti dalle geometrie dei casi studio definiti tramite misure in sito, secondo le categorie di volumi identificati dal protocollo volontario WELL e ISO 22955:2021 [1,2]

Results obtained from data processing defined by case study geometries defined by in situ measurements, according to the volume categories identified by the voluntary WELL protocol and ISO 22955:2021 [1,2]

	$A_{0.6} \text{ (m}^2\text{)}$	$A_{0.9} \text{ (m}^2\text{)}$	$T_{0.6} \text{ (s)}$	$T_{0.9} \text{ (s)}$	$\bar{\alpha}_{0.6} \text{ (-)}$	$\bar{\alpha}_{0.9} \text{ (-)}$
U1	148.5	222.8	0.95	0.64	0.20	0.30
U2	250.2	375.3	1.07	0.71	0.22	0.32
U3	402.0	603.0	1.07	0.71	0.22	0.32
U4	138.0	207.0	1.07	0.71	0.18	0.27
U5	240.0	360.0	1.07	0.71	0.20	0.30
U6	114.0	171.0	1.07	0.71	0.17	0.26
U7	72.0	108.0	1.16	0.77	0.15	0.23
U8	106.2	159.3	1.16	0.77	0.17	0.25
U9	115.2	172.8	1.01	0.68	0.18	0.27
U10	6.6	9.9	0.78	0.52	0.09	0.14
U11	9.0	13.5	0.78	0.52	0.10	0.15
U12	9.0	13.5	0.78	0.52	0.10	0.15
U13	5.4	8.1	0.77	0.51	0.09	0.13
U14	19.8	29.7	1.15	0.76	0.10	0.16

descritte, fornite da WELL e ISO 22955:2021 [1,2]. Una volta note le geometrie degli ambienti, sono stati determinati l'area di assorbimento equivalente, il tempo di riverberazione e il coefficiente di assorbimento medio, come riportato in Tab. 9.

In questo caso, al contrario rispetto ai precedenti, la situazione più critica potrebbe essere quella relativa agli ambienti di piccole dimensioni ($V < 280 \text{ m}^3$), infatti qui il tempo di riverberazione $T_{0,9}$ è già inferiore al limite minimo.

I risultati dei tempi di riverberazione sono raccolti in diversi grafici, rispetto a $A/S_{\text{floor}} > 0.6$ (Fig. 7) e $A/S_{\text{floor}} > 0.9$ (Fig. 8).

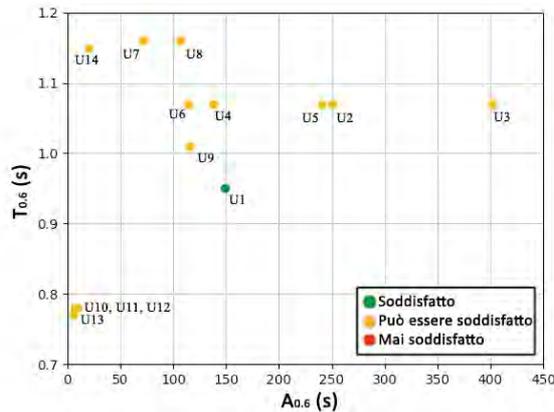


Fig. 7 – Andamento del tempo di riverberazione calcolato nelle quattordici configurazioni di ambienti con geometrie definite mediante misure in sito (da U1 a U14), per la disuguaglianza $A/S_{\text{floor}} > 0.6$ definita da WELL V2 – Sound [2].

Trend of reverberation time calculated in the fourteen room configurations with geometries defined by in situ measurements (U1 to U14) for the inequality $A/S_{\text{floor}} > 0.6$ defined by WELL V2 – Sound [2]

In Fig. 7, si vede che solo l'ufficio U1 è subito verificato rientrando nell'intervallo $0.6 \leq t \leq 1 \text{ s}$. Gli altri uffici hanno tutti un tempo di riverberazione superiore al limite, che però considerando l'arredo e l'occupazione tenderanno a rientrare nell'intervallo prescritto.

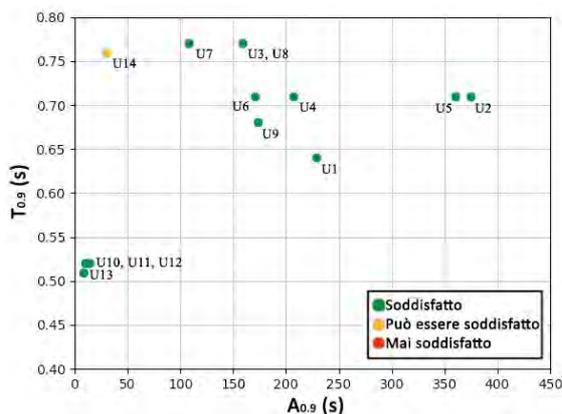


Fig. 8 – Andamento del tempo di riverberazione calcolato nelle quattordici configurazioni di ambienti con geometrie definite mediante misure in sito (da U1 a U14), per la disuguaglianza $A/S_{\text{floor}} > 0.9$ definita da ISO 22955:2021 e WELL V2 – Sound [1,2]

Trend of reverberation time calculated in the fourteen room configurations with geometries defined by in situ measurements (U1 to U14) for the inequality $A/S_{\text{floor}} > 0.9$ defined by ISO 22955:2021 and WELL V2 – Sound [1,2]

In Fig. 8 si vede che quasi tutti i $T_{0,9}$, ad eccezione di U14, hanno valori che soddisfano i limiti definiti dal WELL [2]. In questo caso, l'aggiunta dei mobili e l'assorbimento delle persone tenderanno a far abbassare il tempo di riverberazione, che potrebbe risultare inferiore al minimo prescritto.

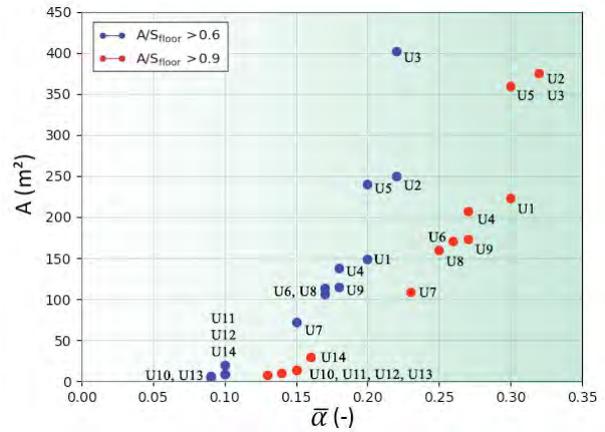


Fig. 9 – Andamento dell'area di assorbimento equivalente, in relazione al coefficiente di assorbimento medio, calcolato nelle quattordici configurazioni di ambienti con geometrie definite mediante misure in sito (da U1 a U14), per ognuna delle due disuguaglianze ($A/S_{\text{floor}} > 0.6$ e $A/S_{\text{floor}} > 0.9$) definite da ISO 22955:2021 e WELL V2 – Sound [1,2]

Trend of the equivalent absorption area, in relation to the average absorption coefficient, calculated in the fourteen room configurations with geometries defined by on-site measurements (U1 to U14) for each of the two inequalities ($A/S_{\text{floor}} > 0.6$ and $A/S_{\text{floor}} > 0.9$) defined by ISO 22955:2021 and WELL V2 – Sound [1,2]

In Fig. 9, la configurazione $A/S_{\text{floor}} > 0.6$ ha un $\bar{\alpha}$ in media pari a 0.15, quindi la maggior parte dei valori di $\bar{\alpha}_{0,6}$ ricade all'interno della regione di validità di Sabine ($\bar{\alpha} < 0.2$), ad eccezione di U2 e U3, leggermente più alti. La configurazione $A/S_{\text{floor}} > 0.9$ presenta un $\bar{\alpha}$ in media pari a 0.23, e la metà degli uffici, soprattutto quelli di piccole dimensioni, hanno un $\bar{\alpha}_{0,9}$ inferiore a 0.2 ricadendo nella regione di Sabine, mentre i restanti *open plan* hanno valori superiori a 0.2 allontanandosi dalla regione di Sabine [1,2].

In conclusione, dai risultati ottenuti dall'analisi delle tre caratterizzazioni di uffici considerate emerge che la progettazione acustica basata su standard e protocolli volontari citati in alcuni casi potrebbe condurre a tempi di riverberazione troppo bassi, soprattutto nel caso di ambienti di grandi dimensioni in condizioni arredate e occupate.

4 | Discussione

L'applicabilità e la compatibilità dei protocolli americani in Italia, è legata ai vincoli storici e architettonici a cui gli ambienti progettati sono soggetti, infatti i requisiti WELL [2] sono basati prevalentemente sull'applicazione di parametri provenienti da norme ASTM statunitensi [3], australiane e neozelandesi [4]. In molti di questi paesi gli uffici presentano pavimenti rivestiti con moquette, hanno una consistente

ventilazione forzata e una consolidata abitudine al *masking noise*. Al contrario, il contesto europeo vede pavimenti lisci, differente abitudine nel trattamento aria e assenza di *masking noise*. C'è poi una consistente differenza tra nord e sud dell'Europa nell'uso della voce in ufficio e nell'abitudine a lavorare con schermi più o meno alti. Questi contesti producono logiche molto differenti nell'applicazione delle norme e dei protocolli, in funzione della regione geografica. Quindi, lo stesso progetto di ufficio, efficace negli Stati Uniti, può non esserlo in ambito mediterraneo, né in quello scandinavo, e viceversa.

I risultati indicano che i valori calcolati in funzione di $A/S_{\text{floor}} > 0.6$ non presentano problemi critici rispetto ai requisiti. I tempi di riverberazione $T_{0,6}$, ad ambiente vuoto e con il solo controsoffitto trattato acusticamente, tendono ad essere più alti dei limiti WELL [2]. Qui, l'aggiunta di arredi e persone può aiutare a rispettare tali limiti. Tuttavia, i risultati per $A/S_{\text{floor}} > 0.9$ hanno $T_{0,9}$ più critici, soprattutto per gli ambienti di grandi dimensioni; quindi, la progettazione acustica basata sugli standard e i protocolli citati potrebbe in alcuni casi condurre a tempi di riverberazione troppo bassi, soprattutto in sale arredate e piene.

5 | Conclusioni

In conclusione, l'analisi condotta evidenzia la complessità e le sfide nell'applicazione dei protocolli americani, come la Certificazione WELL, in contesti italiani, soprattutto quando si considerano i vincoli storici e architettonici degli edifici. L'interazione tra standard come la ISO 22955:2021 e protocolli volontari come il WELL ha rivelato discrepanze significative, soprattutto riguardo al comfort acustico nei luoghi di lavoro.

È emerso che, sebbene i protocolli definiscano requisiti precisi per garantire il comfort acustico, come il T e il rapporto A/S_{floor} , le loro applicazioni in ambienti reali possono essere complesse. Ad esempio, il tempo di riverberazione calcolato in base ai requisiti di A/S_{floor} può risultare al di sopra o al di sotto dei limiti definiti dalla certificazione WELL per gli ambienti di grandi dimensioni.

In particolare, nelle situazioni in cui il tempo di riverberazione tende a essere inferiore al limite minimo imposto dalla certificazione WELL, si potrebbe creare un ambiente troppo secco, compromettendo il comfort, la privacy e la concentrazione dei lavoratori. D'altra parte, quando il tempo di riverberazione supera il limite massimo, si potrebbe compromettere l'intelligibilità del parlato.

Questa ricerca sottolinea l'importanza di considerare attentamente le specificità dei contesti locali e gli aspetti architettonici quando si applicano protocolli internazionali. Talvolta può essere necessario sviluppare approcci più flessibili e adattabili che tengano conto dei vincoli storici e delle caratteristiche degli edifici italiani, al fine di garantire un ambiente lavorativo ottimale in termini di comfort acustico, privacy e produttività.

Conclusions

In conclusion, the analysis highlights the complexity and challenges in applying American voluntary protocols, such as WELL Certification, in Italian contexts, especially when considering buildings' historical and architectural constraints. The interaction between standards such as ISO 22955:2021 and voluntary protocols such as the WELL revealed significant discrepancies regarding workplace acoustic comfort.

It turned out that although the protocols define precise requirements for ensuring acoustic comfort, such as T and A/S_{floor} ratio, their applications in real environments can be complex. For example, reverberation time calculated from A/S_{floor} requirements may be above or below the limits defined by WELL certification for large rooms.

In situations where reverberation time tends to be below the minimum limit imposed by the WELL certification, it could create an environment that is too dry, compromising the comfort, privacy, and concentration of workers. On the other hand, when reverberation time exceeds the maximum limit, speech intelligibility could be compromised.

This research emphasizes the importance of considering the specifics of local contexts and architectural aspects when applying international protocols. Sometimes, it may be necessary to develop more flexible and adaptable approaches.

Bibliografia

- [1] ISO 22955:2021, Acoustics – Acoustic quality of open office spaces. www.iso.org/standard/74237.html
- [2] WELL Building Standard V2, Q4 2020, International WELL Building Institute, 2020. <https://v2.wellcertified.com/en/wellv2/overview>
- [3] ASTM E1374, Standard Guide for Open Office Acoustics and Applicable. ASTM Standards. www.astm.org/e1374-18e01.html
- [4] AS/NZS 2107:2016, Acoustics – Recommended design sound levels and reverberation times for building interiors. www.standards.govt.nz/shop/asnz-21072016/
- [5] D., Cabrera, M., Yadav, D., Protheroe, Critical methodological assessment of the distraction distance used for evaluating room acoustic quality of open-plan offices, *Appl. Acoust.* 140 (2018) 132-142. [https://doi.org/10.1016/S0022-460X\(81\)80020-X](https://doi.org/10.1016/S0022-460X(81)80020-X)
- [6] J. Selzer, F. Schelle. Practical aspects of measuring acoustics in German open plan offices, In 11th European Congress and Exposition on Noise Control Engineering (Euronoise), Crete May 27-31 2018.
- [7] M. Yadav, D. Cabrera, J. Love, J. Kim, J. Holmes, H. Caldwell, R. de Dear, Reliability and repeatability of ISO 3382-3 metrics based on repeated acoustic measurements in open-plan offices, *Appl. Acoust.* 150 (2019) 138-146. <https://doi.org/10.1016/j.apacoust.2019.02.010>
- [8] G. Lüthi, V. Desarnaulds. Analysis of open plan acoustic parameters based on Swiss and international databases of in situ measurements, *Proceedings of the ICSV27, Prague, Czech Republik, July 12-16 2020.*
- [9] S. Kang, C.M. Mak, D. Ou, Y. Zhang, An investigation of acoustic environments in large and medium-sized open-plan offices in China, *Appl. Acoust.* (2022) 186 108447. <https://doi.org/10.1016/j.apacoust.2021.108447>
- [10] ISO 12354-6:2003, Building Acoustics – Estimation of acoustic performance of buildings from performance of elements – Sound absorption in enclosed spaces. <https://store.uni.com/uni-en-12354-6-2006>

Coherence-based Beamforming algorithm for vehicle cabin acoustic comfort evaluation

Francesco Uffreduzzi^{a*} | Alessandro Aquili^a | Raj Mattias Mehta^a

^a Pininfarina SpA,
Via Nazionale, 30, 10020 Cambiano (TO)

* Corresponding author:
f.uffreduzzi@pininfarina.it

Ricevuto: 13/3/2024

Accettato: 10/5/2024

DOI: 10.3280/ria1-2024oa17464

ISSN: 2385-2615

The growing importance of electric vehicles in the global market makes the reduction of wind noise a crucial point for investing money and resources. To improve vehicle acoustic comfort, it is increasingly important to identify aeroacoustic noise sources around the vehicle, many of which were previously masked by engine noise. The Beamforming techniques are widely used methods that, thanks to one or more arrays of microphones, localize the noise sources on a virtual plane close to the object. However, not all the sources highlighted infiltrate the vehicle cabin and affect its acoustic comfort. Based on these considerations, the Pininfarina Wind Tunnel developed an algorithm capable of correlating the various sound sources detected by the Conventional Beamforming technique to the noise measured inside the vehicle cabin. Unlike conventional approaches, this so-called Coherence Beamforming algorithm was successfully able to remove the uncorrelated aerodynamic noise contributions, isolating the major noise sources responsible for passenger discomfort.

Keywords: acoustic comfort, aeroacoustics, automotive, coherence beamforming, microphone array, wind tunnel

Algoritmo di Beamforming coerente per la valutazione del comfort acustico interno di un veicolo

La crescente importanza dei veicoli elettrici nel mercato globale rende la riduzione del rumore aerodinamico un argomento cruciale su cui investire denaro e risorse. Per migliorare il comfort acustico di un'automobile è ora più che mai necessario identificare correttamente le sorgenti sonore aeroacustiche attorno al veicolo, molte delle quali in precedenza mascherate dal rumore del motore. Le tecniche di Beamforming sono generalmente utilizzate per localizzare le sorgenti di rumore su un piano virtuale in prossimità di un oggetto, elaborando i segnali acquisiti da uno o più array di microfoni. Non tutte le sorgenti rilevate, però, sono in grado di raggiungere l'abitacolo dell'auto e di influenzarne il comfort acustico. Sulla base di queste considerazioni, la galleria del vento Pininfarina ha sviluppato un algoritmo in grado di correlare le varie sorgenti aeroacustiche identificate dalla tecnica di Beamforming Convenzionale con il rumore misurato all'interno dell'auto. A differenza degli approcci convenzionali, il cosiddetto algoritmo di Beamforming Coerente ha rimosso con successo il contributo del rumore aerodinamico non coerente, isolando le principali sorgenti in grado di influire negativamente sul comfort dei passeggeri.

Parole chiave: comfort acustico, aeroacustica, automotive, Beamforming coerente, array di microfoni, galleria del vento

1 | Introduction

The automotive industry has greatly benefited from the improvements in microphone array techniques over the last two decades. The most common wind tunnel application for wind noise investigation is the use of out-of-flow planar beamforming arrays to localize and quantify exterior aeroacoustic noise sources such as side-view mirror, A-pillar, wheelhouse arch etc. [1–3].

Through continuous development, the sound maps of today are significantly more detailed than previous methods: dynamic and spatial resolution of acoustic maps has been improved thanks to the introduction of optimized geometries of arrays [4] and with the formulation of deconvolution algorithms such as DAMAS, CLEAN, CLEAN-SC etc. [5,6]. Nevertheless, classical Beamforming formulations cannot evaluate

the real impact of exterior noise sources on interior noise level.

Beamforming using a spherical array of microphones installed inside the car cabin allows for the identification of the areas that contribute most to the interior noise level [7]. However, this characterization is not sufficiently accurate to localize the exterior aeroacoustic sources responsible for these emissions.

To overcome these limitations, several approaches have been introduced to determine the contribution of exterior aeroacoustic sources on interior noise [8–11]. The purpose of the present work, itself an extension of previous research [12], was to develop an algorithm capable of identifying the aeroacoustic sources that penetrate the cabin and impact passenger comfort. This was achieved by correlating external array signals with an additional microphone installed inside the vehicle.

2 | Coherence Beamforming

2.1 | Pininfarina wind tunnel facility

Since 2005, Pininfarina has utilized a Beamforming system based on microphone arrays to investigate the external noise sources of vehicles in the full-scale wind tunnel. This system identifies noise sources in a virtual plane close to the vehicle and parallel to the one on which the microphones lie. The wind tunnel is equipped with:

- An overhead array (Fig. 1), located on the ceiling of the test section (4 m from the floor), which consists of 78 Brüel & Kjær Type 4951 microphones whose specifications are reported in Tab. 1.
- A lateral array (Fig. 1), placed on the side wall of the test section, with 66 Brüel & Kjær Type 4951 microphones whose characteristics are the same already introduced in Tab. 1.
- A smaller frontal array (Fig. 2), installed above the nozzle exit, with 15 Brüel & Kjær Type 4189 microphones whose specifications are summarized in Tab. 2.

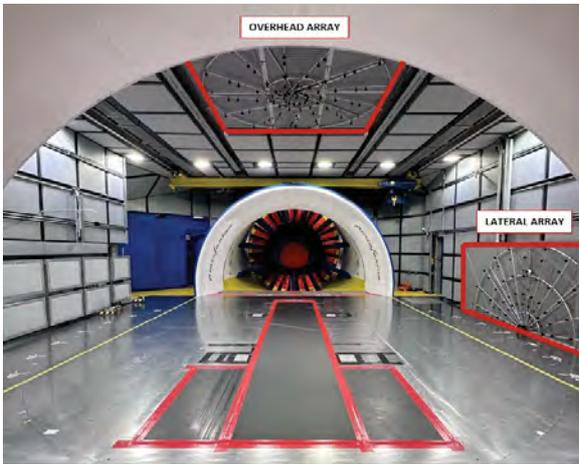


Fig. 1 – Pininfarina side and overhead arrays
Array laterale e superiore Pininfarina

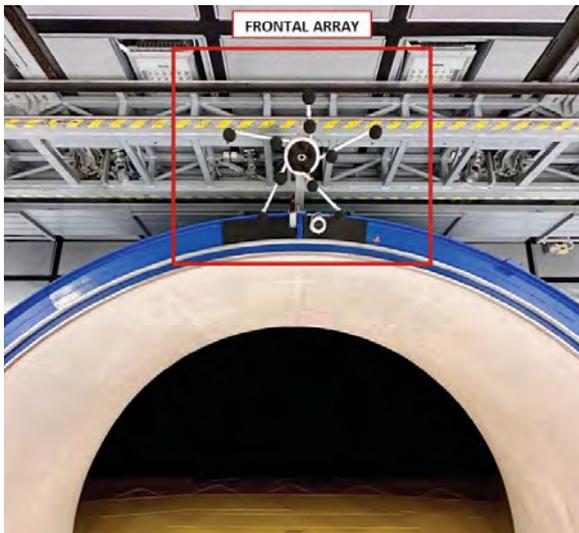


Fig. 2 – Pininfarina frontal array
Array frontale Pininfarina

Tab. 1 – Brüel & Kjær 4951 specifications
Specifiche Brüel & Kjær 4951

Sensitivity	6.3 mV/Pa
Frequency	100 Hz – 20 kHz
Dynamic Range	35 – 140 dB
Temperature	-10 °C to +55 °C
Polarization	prepolarized

Tab. 2 – Brüel & Kjær 4189 specifications
Specifiche Brüel & Kjær 4189

Sensitivity	50 mV/Pa
Frequency	6.3 Hz – 20 kHz
Dynamic Range	14.6 – 146 dB
Temperature	-30 °C to +150 °C
Polarization	prepolarized

2.2 | Algorithm

The Pininfarina Conventional Beamforming algorithm is based on the cross-spectral imaging function, deeply described in [13]. The Coherence Beamforming technique introduced here takes inspiration from [14] and makes use of an additional reference microphone recorded synchronously with the external arrays. The coherent beamformer power output requires the computation of a cross-spectral matrix defined, for a single frequency and a single microphone, as follows:

$$C_{xy}(i_{Mik}, f) = \frac{1}{N_w} \sum_{k=1}^{N_w} P_{i_{Mik}}(f) P_{Ref}(f)^* \quad (1)$$

where $P_{i_{Mik}}(f)$ is the two-sided Fast Fourier Transform (FFT) of the i^{th} microphone, P_{Ref} is the two-sided FFT of the reference microphone and the symbol $(\cdot)^*$ stands for the complex-conjugate operator. The single-sided form of the cross spectral matrix is then obtained by multiplying each frequency by two and discarding the second half of the array. This formulation leads to an output influenced by the arrays' signals, tending to amplify the coherent beamformer power output inside the cabin when there is high coherence between the internal recorded signal and the external ones. To avoid this, the cross spectral matrix has been rescaled as follows:

$$\overline{C_{xy}(i_{Mik}, f)} = \frac{1}{N_w} \sum_{k=1}^{N_w} 2 \cdot \frac{P_{i_{Mik}}(f) P_{Ref}(f)^*}{\sqrt{P_{i_{Mik}} i_{Mik}}(f)} \quad (2)$$

where $P_{i_{Mik}} i_{Mik}$ is the i^{th} microphone average power spectrum computed as:

$$P_{i_{Mik}} i_{Mik}(f) = \frac{1}{N_w} \sum_{k=1}^{N_w} P_{i_{Mik}}(f) P_{i_{Mik}}(f)^* \quad (3)$$

The coherent beamformer power output, for a single grid point x_G and a single frequency f , is then obtain from:

$$P_{Coh}(x_G, f) = \frac{1}{N_{Miks}} \sum_{i_{Mik}=1}^{N_{Miks}} \overline{C_{xy}} e^{j2\pi f \frac{d_{i_{Mik}}}{c}} \quad (4)$$

where d_{iMik} is the distance of the i^{th} microphone from the grid point x_G , c is the speed of sound and $\overline{C_{xy}} = \overline{C_{xy}(l_{Mik}, f)}$ is the rescaled cross spectral matrix defined in Eq. (2).

A validation campaign was performed to assess the validity of this new methodology prior to its use during the wind tunnel sessions. The following paragraphs present the most important results obtained from the testing campaign. A real test case on a production car will be also introduced to show the advantages of using this formulation.

3 | Validation campaign

3.1 | Experimental set-up

The validation campaign was performed using a Brüel & Kjær Omnisource Sound Source Type 4295. The size and shape of its orifice have been carefully engineered to radiate sound evenly in all directions. Thus, Type 4295 fulfils the national and international standards for omnidirectional sound sources, as reported in Fig. 3 and Fig. 4.

The experimental set-up, shown in Fig. 5 and Fig. 6, was arranged in order to replicate real automotive test conditions (in terms of distances between the source and the arrays).

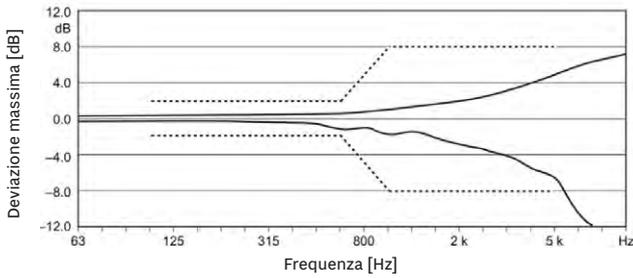


Fig. 3 – Maximum allowed directional deviation of an omnidirectional sound source according to ISO 140 (averaged over ‘gliding’ 30° arcs in a free sound field). Upper and lower dotted curves are the ISO tolerances

Deviazione direzionale massima consentita rispetto ad una sorgente omnidirezionale in accordo con la ISO 140 (media su archi di 30° in campo sonoro libero). Le curve tratteggiate superiore e inferiore sono le tolleranze della normativa ISO

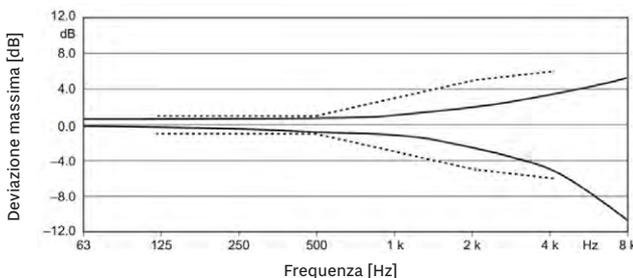


Fig. 4 – Maximum allowed directional deviation of an omnidirectional sound source according to ISO 3382-1 (averaged over ‘gliding’ 30° arcs in a free sound field). Upper and lower dotted curves are the ISO tolerances

Deviazione direzionale massima consentita rispetto ad una sorgente omnidirezionale in accordo con la ISO 3382-1 (media su archi di 30° in campo sonoro libero). Le curve tratteggiate superiore e inferiore sono le tolleranze della normativa ISO

For the first test, the Brüel & Kjær Omnisource Sound Source Type 4295 was placed at 3 m from the centre of the side array and at 2.8 m from the overhead array.

The second test assessed the performance of the frontal array. In this case, the Brüel & Kjær Omnisource Sound Source Type 4295 was positioned at 2.4 m from it.

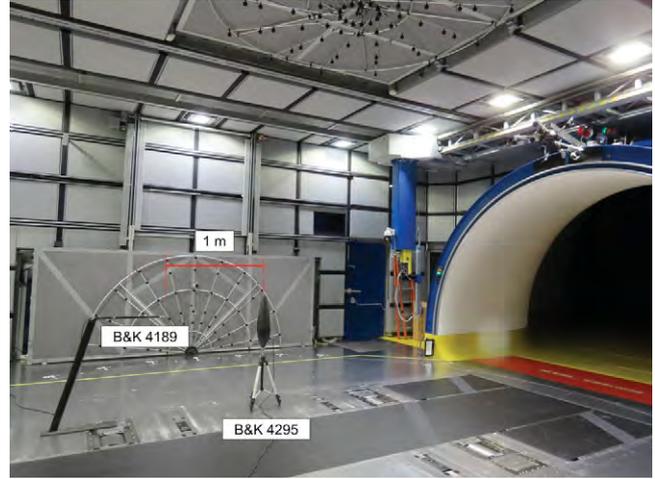


Fig. 5 – Side and overhead array validation test case experimental set-up

Set-up sperimentale per il caso di validazione dell’array laterale e superiore

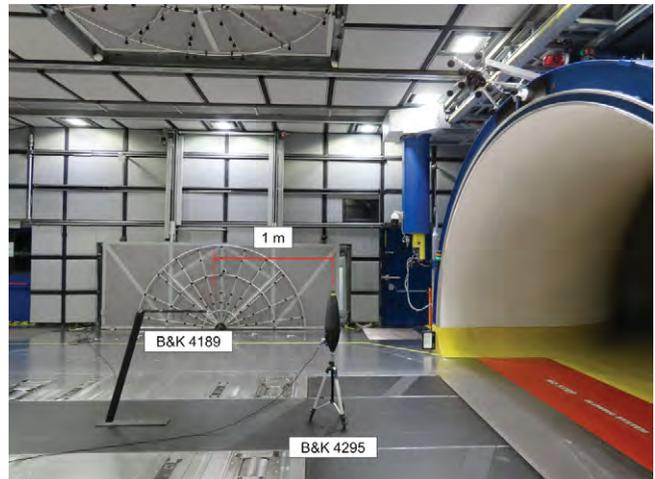


Fig. 6 – Frontal array validation test case experimental set-up

Set-up sperimentale per il caso di validazione dell’array frontale

In both cases, a Brüel & Kjær 4189 free field reference microphone was positioned at 1 m from the source. The microphone specifications are the same already introduced in Tab. 2 and its typical free field response is depicted in Fig. 7.

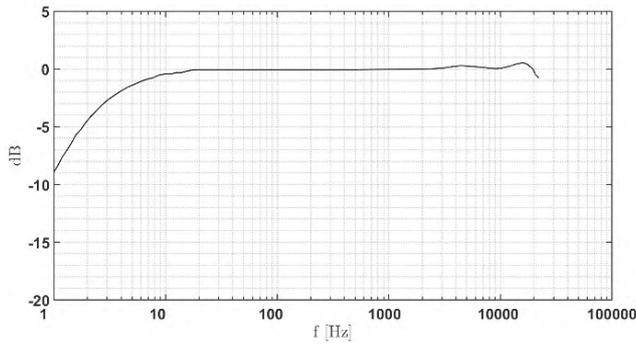


Fig. 7 – Typical free-field response of Brüel & Kjær 4189 microphone with protection grid

Tipica risposta in campo libero del microfono Brüel & Kjær 4189 con griglia di protezione

3.2 | Results

In order to validate the algorithm, a white noise signal was used. The reference microphone was synchronously acquired along with the arrays' receivers, considering an acquisition time $T = 6.25$ s and a sampling frequency $f_s = 32768$ Hz. The frequency range of interest span from 250 Hz to 5000 Hz.

Fig. 8 shows a comparison between the source Sound Pressure Level (SPL) measured by the reference microphone and the one obtained through the Conventional and Coherence Beamforming algorithm, for all the three arrays. All the arrays' spectra are calculated at 1 m from the source. The curves retrieved by the two Beamforming algorithms are plotted considering the maximum SPL value obtained on the zone of interest for each frequency.

As seen in Fig. 8, all the curves are in good agreement over the whole frequency range and the Coherence Beamforming algorithm results closely follow the reference microphone SPL for all the three arrays.

Focusing on the sound maps, the Coherence Beamforming algorithm results match the conventional methodology in terms of source localization, providing slightly different SPL values since the arrays signals are statistically conditioned by the correlations with the reference microphone.

Examples of sound maps obtained with the two different algorithms for the one-third octave band centered at $f = 2500$ Hz are reported in Fig. 9, Fig. 10 and Fig. 11.

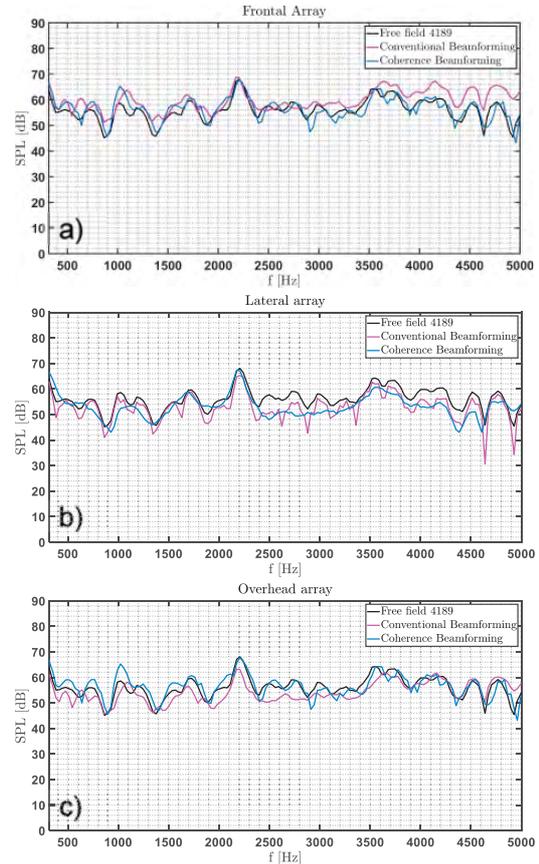


Fig. 8 – SPL at 1 m from the source. Conventional and Coherence Beamforming algorithm vs reference microphone for frontal (a), lateral (b) and overhead array (c)

Livello di pressione sonora a 1 m dalla sorgente. Beamforming Convenzionale e Coerente vs microfono di riferimento per l'array frontale (a), laterale (b) e superiore (c)

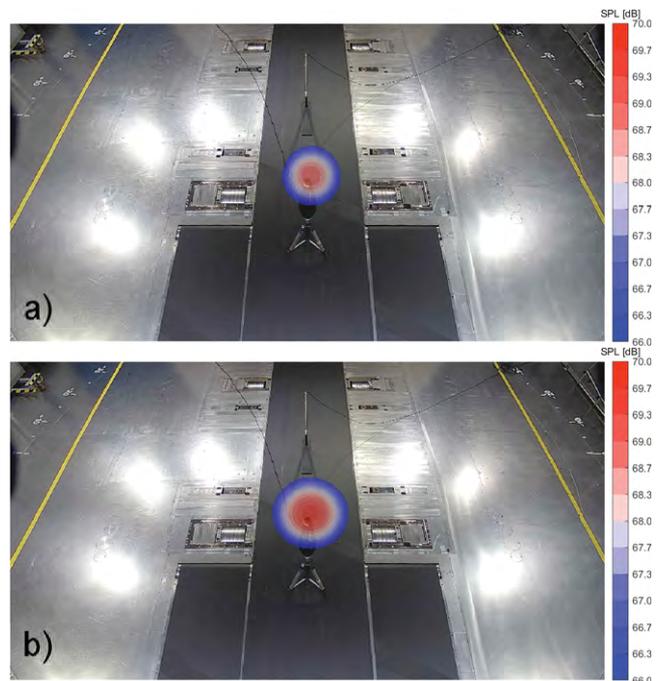


Fig. 9 – Frontal array conventional (a) vs coherent (b) sound map for the 2500 Hz one-third octave band
Mappa acustica convenzionale (a) e coerente (b) dell'array frontale per il terzo di ottava 2500 Hz

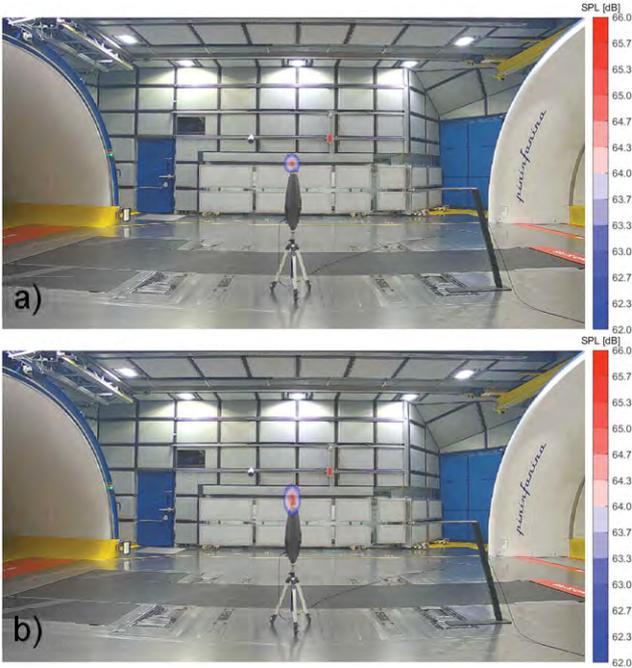


Fig. 10 – Lateral array conventional (a) and coherent (b) sound map for the 2500 Hz one-third octave band
Mappa acustica convenzionale (a) e coerente (b) dell'array laterale per il terzo di ottava 2500 Hz

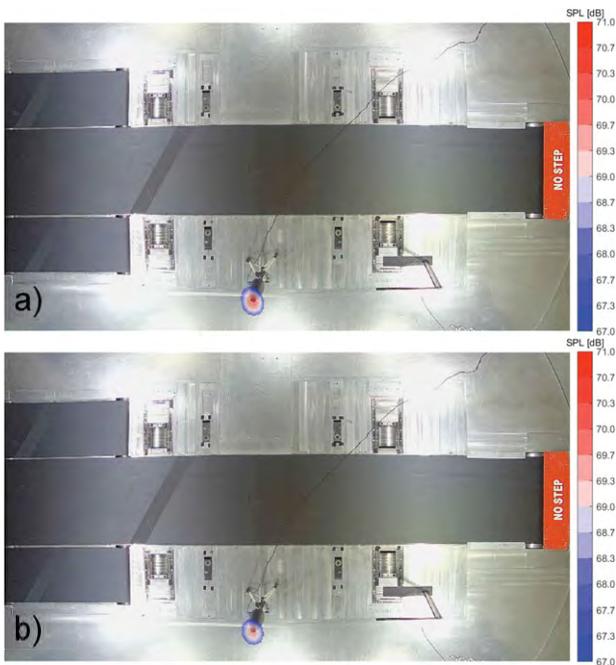


Fig. 11 – Overhead array conventional (a) vs coherent (b) sound map for the 2500 Hz one-third octave band
Mappa acustica convenzionale (a) e coerente (b) dell'array superiore per il terzo di ottava 2500 Hz

the streamwise centreline of the wind tunnel, following the standard set-up used for aeroacoustic investigations. This requires testing the car with stationary wheels and floor. While these conditions are typically crucial to the proper simulation of vehicle aerodynamic behaviour, the noise generated by the Wheel Drive Units (WDU) and the moving belt system compromise aeroacoustic characterization by increasing background noise and creating non-aeroacoustic noise sources.

A Brüel & Kjær diffuse field 4942 microphone was installed inside the car, at the same position as the driver's head, oriented towards the side-view mirror (Fig. 12). In addition, a KingState KPE-141 source was placed as highlighted in Fig. 13. The tonal noise frequency emitted by this source was set to 3850 Hz.

The diffuse field microphone has the specifications reported in Tab. 3 and its typical random-incidence response is depicted in Fig. 14.



Fig. 12 – Diffuse field microphone installation inside the car
Installazione microfono a campo diffuso all'interno della vettura



Fig. 13 – KingState KPE-141 noise generator installation
Installazione della sorgente acustica KingState LPE-141

4 | Real case

4.1 | Experimental set-up

For the real case, all the measurements were performed on a production car at various wind speeds. The vehicle was placed inside the test section ensuring its alignment with

Tab. 3 – Brüel & Kjær 4942 specifications
Specifiche Brüel & Kjær 4942

Sensitivity	50 mV/Pa
Frequency	6.3 Hz – 16 kHz
Dynamic Range	14.6 – 146 dB
Temperature	-40 °C to +150 °C
Polarization	0 V

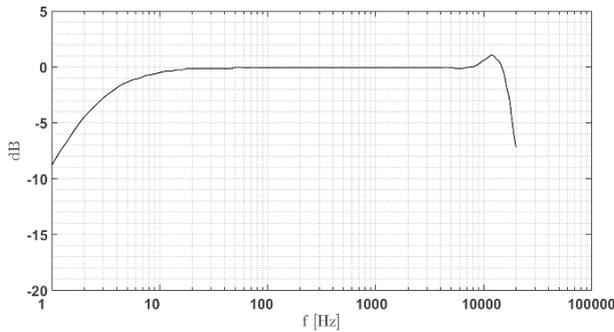


Fig. 14 – Typical diffuse-field response of Brüel & Kjær 4942 microphone with protection grid

Tipica risposta in campo diffuso del microfono Brüel & Kjær 4942 con griglia di protezione

The most important results obtained by testing the vehicle at various flow speeds will be presented in the following paragraphs. The initial focus will be on the frontal and overhead arrays, then the performance of the side array will be analysed. The frequency range of interest was set between 250 Hz and 5000 Hz.

4.2 | Results

4.2.1 | $V=60$ km/h

Fig. 15 shows a comparison between the SPL measured by the reference microphone and the one obtained through the Conventional and Coherence Beamforming algorithm applied to all the three arrays. For the case presented in this study, the various array spectra have been calculated at the array plane. Due to its small diameter, the frontal array lower cut-off frequency is 1000 Hz.

In the new algorithm, a peak is found whenever there is a high level of coherence between the external receivers and the internal one. This means that the noise measured by the external arrays is able to pass inside the vehicle cabin. On the contrary, when there is minimal correlation between the signals, the resulting SPL values are very low or even negative.

The lowest frequency peak, visible from the overhead array Coherence Beamforming spectrum (Fig. 15c), occurs at $f = 480$ Hz and is due to a noise source located in the rear part of the vehicle, as depicted in Fig. 16. At first glance, noise could be attributed to the main fan, which is close to the rear of the vehicle. However, the following investigations proved that it came from the trunk:

- A subjective evaluation was used to localize the low frequency noise in the trunk area.
- A parametric investigation, moving the car forward by 400 mm, resulted in a source shift which followed the vehicle displacement (see Fig. 17).

By combining the information from the external and internal measurements, the Coherence Beamforming algorithm was able to highlight a noise source that was hidden when the

signals were analysed separately. When looking at the Conventional Beamforming output or the reference microphone spectra, the source was masked by background noise, with only a slight peak noticeable.

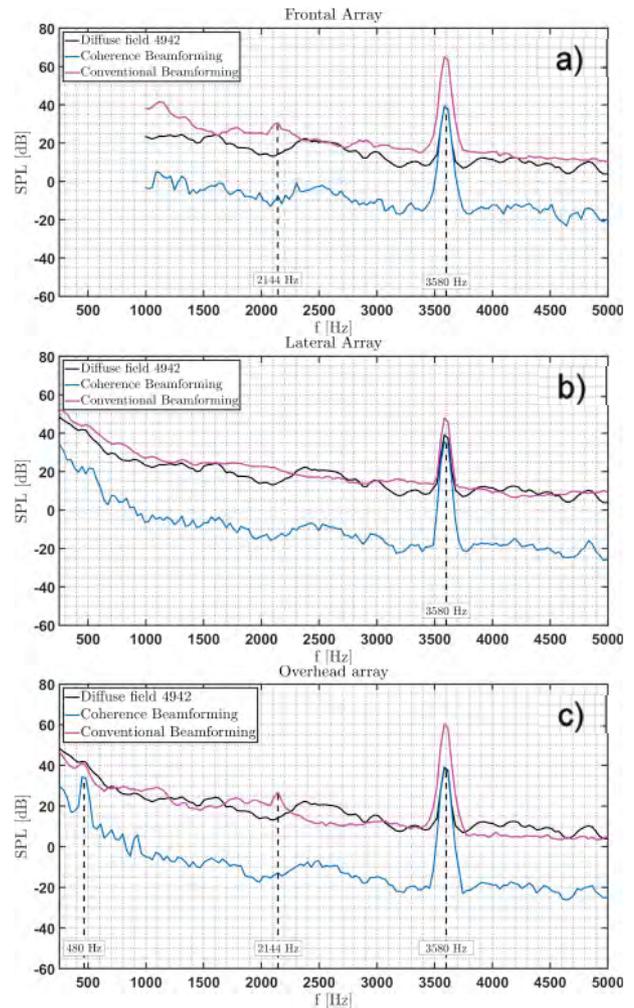


Fig. 15 – SPL at $V=60$ km/h. Conventional and Coherence Beamforming algorithm vs reference microphone for frontal (a), lateral (b) and overhead array (c)

Livello di pressione sonora a $V=60$ km/h. Beamforming Convenzionale e Coerente vs microfono di riferimento per l'array frontale (a), laterale (b) e superiore (c)

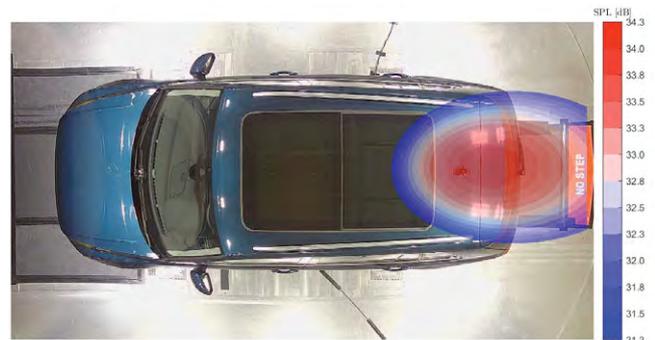


Fig. 16 – Overhead array coherent sound map for the 500 Hz one-third octave band
Mappa acustica coerente dell'array superiore per il terzo di ottava 500 Hz

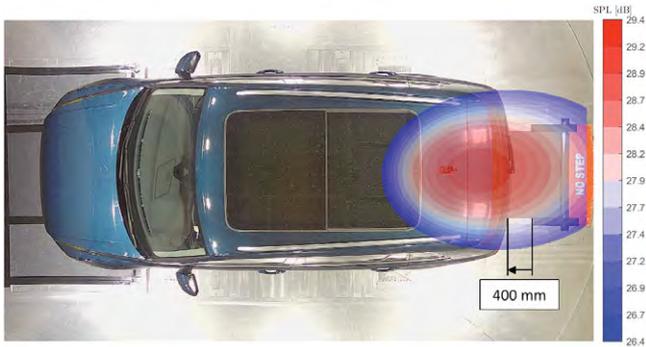


Fig. 17 – Overhead array coherent sound map for the 500 Hz one-third octave band. Car shifted 400 mm forward
Mappa acustica coerente dell'array superiore per il terzo di ottava 500 Hz. Vettura spostata 400 mm in Avanti

A second peak can be seen at $f = 2144$ Hz, for both the frontal and the overhead array (Fig. 15a, Fig. 15c), but only in the Conventional Beamforming integrated spectra and not in the Coherence Beamforming ones. This tonal emission is produced by the vehicle front grille and is only perceived from outside.

Fig. 18 and Fig. 19 show a comparison between the sound maps obtained using the two algorithms in the frequency range 2050-2250 Hz. While the Conventional Beamforming precisely localizes the noise source, the Coherence Beamforming fails due to a low level of correlation between the external receivers and the internal reference one. This is also evident by looking at the very low SPL values obtained from the maps.

Finally, as depicted in Fig. 20, the tonal noise emitted by the synthetic source is precisely detected by all three microphone arrays and also perceived inside the vehicle cabin.

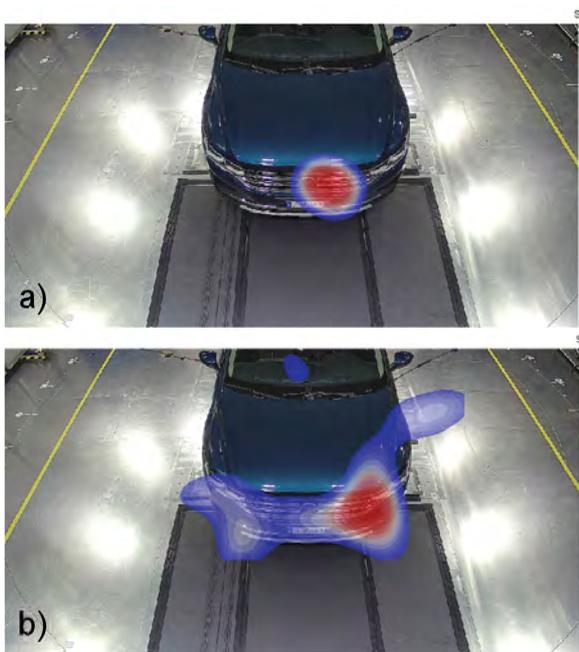


Fig. 18 – Frontal array conventional (a) and coherent (b) sound map in the frequency range 2050-2250 Hz
Mappa acustica convenzionale (a) e coerente (b) dell'array frontale nel range di frequenza 2050-2250 Hz

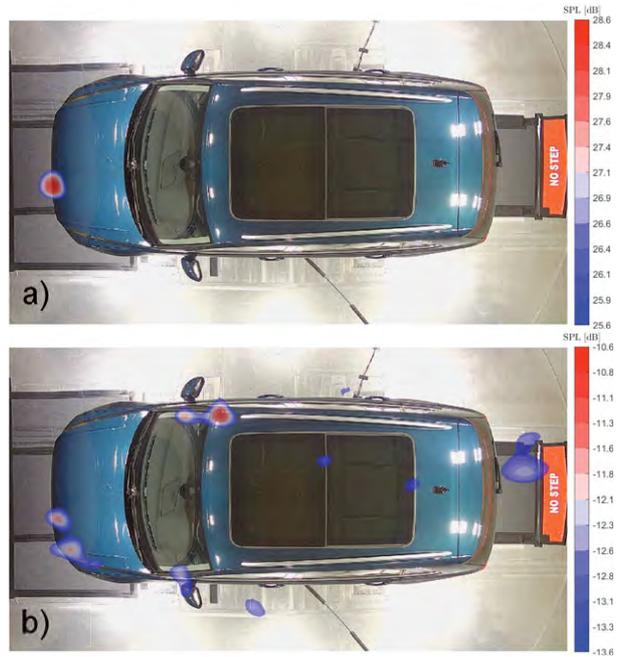


Fig. 19 – Overhead array conventional (a) and coherent (b) sound map in the frequency range 2050-2250 Hz
Mappa acustica convenzionale (a) e coerente (b) dell'array superiore nel range di frequenza 2050-2250 Hz

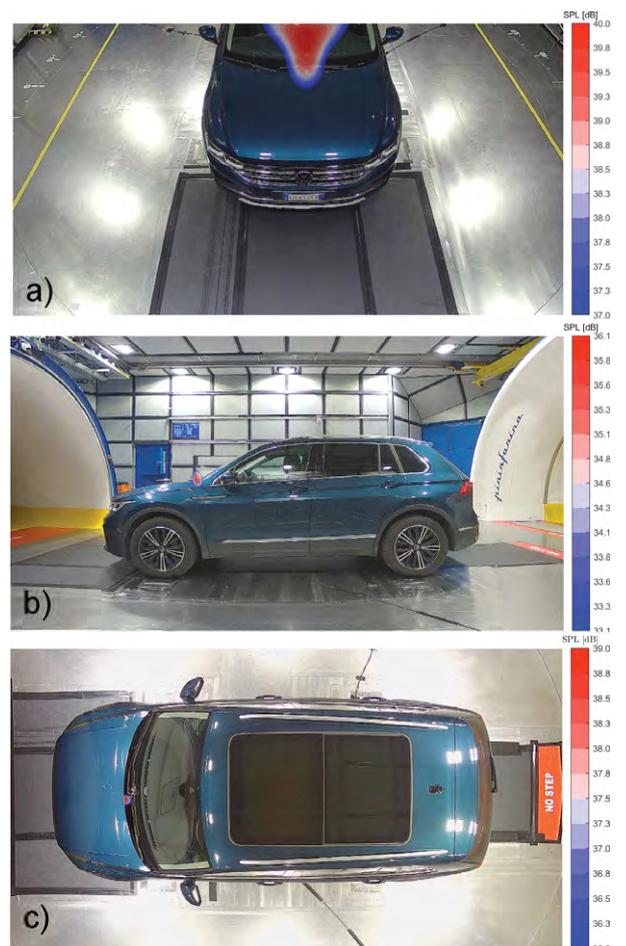


Fig. 20 – Frontal (a), lateral (b) and overhead (c) array coherent sound map for the 4000 Hz one-third octave band
Mappa acustica coerente dell'array frontale (a), laterale (b) e superiore (c) per il terzo di ottava 4000 Hz

Consequently, the Coherence Beamforming spectra show SPL values very close to the ones measured by the reference microphone (as evident in Fig. 15). For this specific case, the lateral array sound map, which is usually computed on a plane cutting the vehicle left side-view mirror (generally at 3.4 m from the array), has been evaluated at 4.2 m, equivalent to the distance between the array and the synthetic source.

4.2.2 | $V=100 \text{ km/h}$

As the wind tunnel flow speed is increased, a new peak can be found in the Coherence Beamforming SPL integrated spectra, as shown in Fig. 21. The vehicle front grille produces a tonal noise at $f = 2368 \text{ Hz}$ which is heard both from outside and inside the car cabin and can be seen in the Coherence Beamforming third-octave sound maps reported in Fig. 22.

The overhead array Coherence Beamforming spectrum also reveals three lower peaks in the 600-1000 Hz frequency range that can be ascribed to a flow interaction with the left

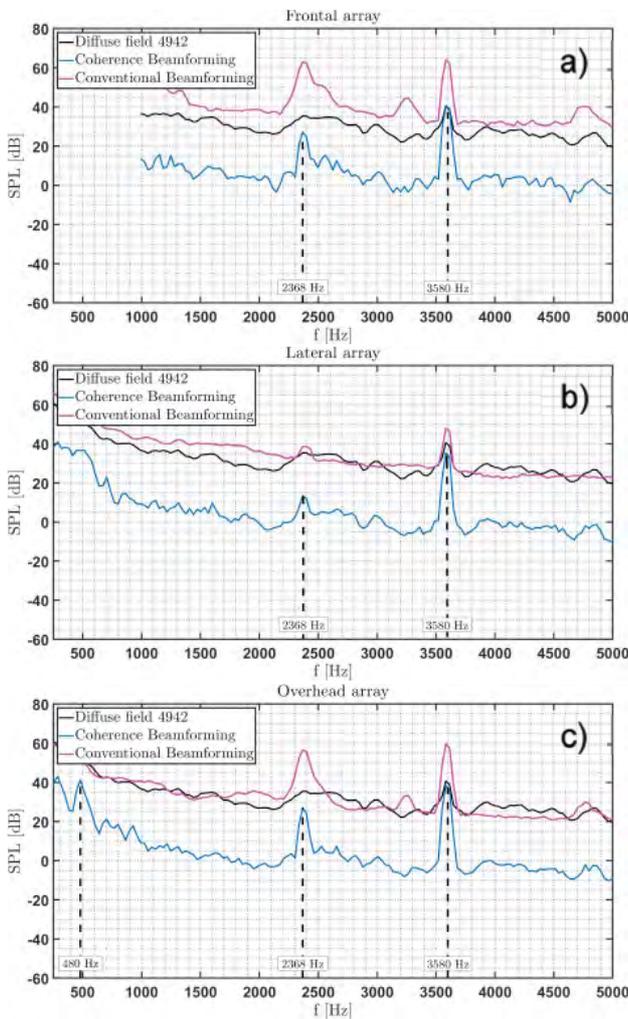


Fig. 21 – SPL at $V=100 \text{ km/h}$. Conventional and Coherence Beamforming algorithm vs reference microphone for frontal (a), lateral (b) and overhead (c) array
Livello di pressione sonora a $V=100 \text{ km/h}$. Beamforming Convenzionale e Coerente vs microfono di riferimento per l'array frontale (a), laterale (b) e superiore (c)

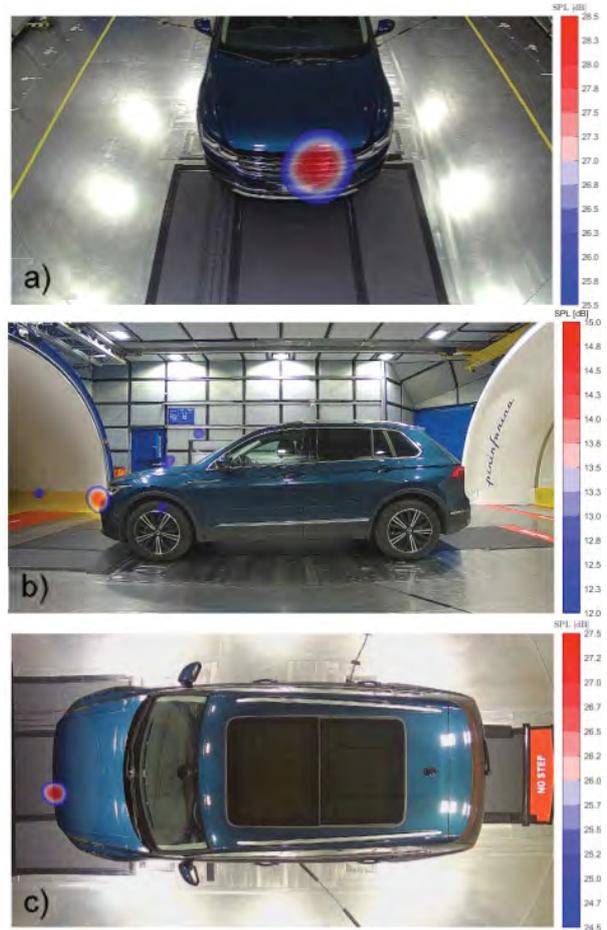


Fig. 22 – Frontal (a), lateral (b) and overhead (c) array coherent sound map for the 2500 Hz one-third octave band
Mappa acustica coerente dell'array frontale (a), laterale (b) e superiore (c) per il terzo di ottava 2500 Hz

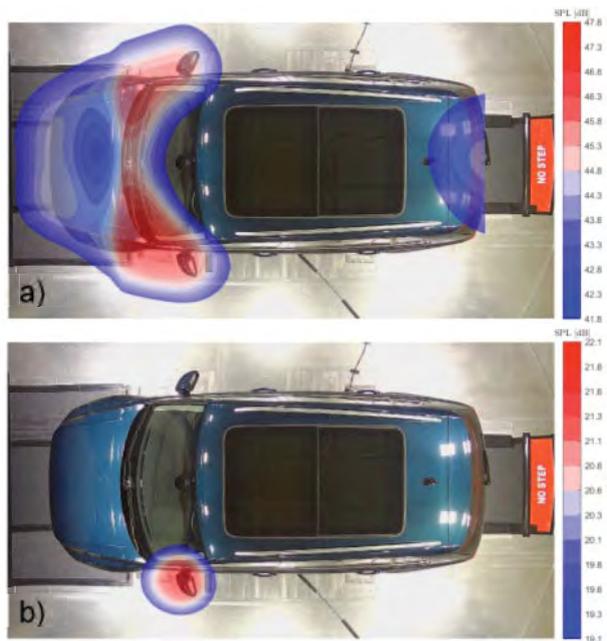


Fig. 23 – Conventional Beamforming (a) vs Coherence Beamforming (b) for the 800 Hz one-third octave band
Beamforming Convenzionale (a) vs Beamforming Coerente (b) per il terzo di ottava 800 Hz

side-view mirror. By performing the coherence between the signals acquired by the array and the internal microphone, only the noise emitted by this sound source shows high level of correlation.

Fig. 23 shows a comparison between the sound map obtained through the Conventional Beamforming algorithm and the one obtained through the Coherence Beamforming for the one-third octave band centered at $f = 800$ Hz. As can be seen, the Conventional Beamforming tends to adequately localize the noise sources around the windshield and the front of the car, while the Coherence Beamforming precisely localizes the origin of the noise on the left side-view mirror.

5 | Conclusions

This work proposes the implementation and application of Coherence based Beamforming in the frame of an automotive aeroacoustic wind tunnel testing. The method was compared with a Conventional Beamforming algorithm using a known noise source, as well as on a real vehicle. Conventional Beamforming clearly identifies the location of major sound sources but fails if low intensity sound sources are masked by louder ones or by broadband frequency noise. The Coherence method utilizes a reference signal so as to denoise the microphone arrays. This removes the uncorrelated aerodynamic noise contribution in order to determine the impact of outside sources on the interior noise. The outputs of the Coherence based Beamforming technique successfully identify the major noise sources responsible for passenger discomfort, otherwise unrecognized with conventional approaches.

Since the acoustic maps are computed on a single plane close to the vehicle, they may slightly misrepresent the intensity and location of the out-of-plane noise sources, especially for the overhead array. To improve the results of the Beamforming techniques, these maps could be calculated on a topology more representative of the vehicle shape. As a first approach, Pininfarina is already using a multi-plane formulation for the overhead array. This involves the definition of several planes that better describe the height variation of the vehicle. The natural evolution of the multi-plane approach is to directly map the noise sources on a 3D scan of the car. While this method has been successfully used in research applications, it is not still compatible with Pininfarina's testing procedure due to the amount of time required to obtain the vehicle scan. Future research studies will be focused on streamlining this process to minimize its impact on testing time. Due to the large 3D domain, a deconvolution method like CLEAN-SC could be beneficial and will also be explored.

Conclusioni

Questo studio propone l'implementazione e l'applicazione di un algoritmo di Beamforming basato sulla coerenza nell'ambito di test aeroacustici in una galleria del vento automotive. Il metodo è stato confrontato con un algoritmo di Beamforming Convenzionale, utiliz-

zando prima una sorgente di rumore nota e poi facendo dei test su una vettura di produzione. Il Beamforming Convenzionale identifica chiaramente la posizione delle principali sorgenti sonore, ma fallisce se quelle a bassa intensità sono mascherate da sorgenti più intense o da un rumore a banda larga. Il metodo qui introdotto utilizza un segnale di riferimento per depurare le misure degli array di microfoni. In tal modo è possibile rimuovere il contributo del rumore aerodinamico non coerente per determinare l'impatto delle sorgenti esterne sul rumore interno. I risultati del Beamforming basato sulla coerenza evidenziano con successo le principali fonti di rumore capaci di influire sul comfort dei passeggeri, altrimenti non identificabili con gli approcci convenzionali.

Le mappe acustiche sono calcolate su un singolo piano in prossimità del veicolo, pertanto possono rappresentare in modo non del tutto esatto l'intensità e la posizione delle sorgenti di rumore giacenti al di fuori di esso, soprattutto nel caso dell'array superiore. Per migliorare i risultati delle tecniche di Beamforming, tali mappe potrebbero essere calcolate su una topologia più rappresentativa della forma del veicolo. Attualmente, in Pininfarina è in uso una formulazione multi-piano associata all'array superiore. Ciò permette la definizione di diversi piani in grado di descrivere meglio la variazione di altezza del veicolo. La naturale evoluzione dell'approccio multi-piano consiste nel mappare direttamente le sorgenti di rumore su una scansione 3D dell'auto. Sebbene questo metodo sia stato utilizzato con successo in varie attività di ricerca, non è ancora compatibile con la procedura di test adottata da Pininfarina a causa del tempo richiesto per realizzare le scansioni tridimensionali. I futuri studi si concentreranno sulla semplificazione di questo processo per ridurre l'impatto sui tempi di prova. A causa delle estese dimensioni del dominio 3D, un metodo di deconvoluzione come il CLEAN-SC potrebbe essere utile e verrà dunque esplorato.

Bibliography

- [1] K.-H. Chen, J. Johnson, U. Dietschi, B. Khalighi, Automotive Mirror Wind Noise Simulations and Wind Tunnel Measurements, in: 14th AIAA/CEAS Aeroacoustics Conference (29th AIAA Aeroacoustics Conference), American Institute of Aeronautics and Astronautics, Vancouver, British Columbia, Canada, 2008. <https://doi.org/10.2514/6.2008-2906>.
- [2] L. Li, J. Li, B. Lu, Y. Liu, Z. Zhang, H. Cheng, Y. Zhang, H. Hou, Application of Beamforming to Side Mirror Aeroacoustic Noise Optimization, in: 2016: pp. 2016-01-0475. <https://doi.org/10.4271/2016-01-0475>.
- [3] D. Lepley, S. Senthoooran, D. Hendriana, T. Frazer, Numerical Simulations and Measurements of Mirror-Induced Wind Noise, SAE Int. J. Passeng. Cars – Mech. Syst. 2 (2009) 1550-1562. <https://doi.org/10.4271/2009-01-2236>.
- [4] C.S. Allen, W.K. Blake, R.P. Dougherty, D. Lynch, P.T. Soderman, J.R. Underbrink, Aeroacoustic Measurements, Springer Berlin Heidelberg, Berlin, Heidelberg, 2002. <https://doi.org/10.1007/978-3-662-05058-3>.
- [5] L. de Santana, Fundamentals of Acoustic Beamforming, (n.d.).
- [6] Z. Chu, Y. Yang, Comparison of deconvolution methods for the visualization of acoustic sources based on cross-spectral imaging function beamforming, Mechanical Systems and Signal Processing 48 (2014) 404-422. <https://doi.org/10.1016/j.ymssp.2014.03.012>.

- [7] J. Hald, Spherical Beamforming with Enhanced Dynamic Range, *SAE Int. J. Passeng. Cars – Mech. Syst.* 6 (2013) 1334-1341. <https://doi.org/10.4271/2013-01-1977>.
- [8] Y. He, B. Wang, Z. Shen, Z. Yang, G. Heilmann, T. Zhang, G. Dong, Correlation Analysis of Interior and Exterior Wind Noise Sources of a Production Car Using Beamforming Techniques, in: 2017: pp. 2017-01-0449. <https://doi.org/10.4271/2017-01-0449>.
- [9] J. Hald, H. Kuroda, T. Makihara, Y. Ishii, Mapping of contributions from car-exterior aerodynamic sources to an in-cabin reference signal using Clean-SC, (2016).
- [10] J.-L. Adam, D. Ricot, C. Lambourg, A. Menoret, Correlated Beamforming Method for Relevant Aeroacoustic Sources Identification, in: 2009: pp. 2009-01-2234. <https://doi.org/10.4271/2009-01-2234>.
- [11] S. Guidati, R. Sottek, Advanced Source Localization Techniques Using Microphone Arrays, *SAE Int. J. Passeng. Cars – Mech. Syst.* 4 (2011) 1241-1249. <https://doi.org/10.4271/2011-01-1657>.
- [12] F. Uffreduzzi, A. Aquili, E. De Paola, L.G. Stoica, A. Di Marco, Beamforming Algorithm for Vehicle Cabin Acoustic Comfort Application, in: Proceedings of the 10th Convention of the European Acoustics Association Forum Acusticum 2023, European Acoustics Association, Turin, Italy, 2022: pp. 4559-4566. <https://doi.org/10.61782/fa.2023.1091>.
- [13] J.J. Christensen, J. Hald, Beamforming, *Beamforming* No. 1 (2004). <https://www.bksv.com/media/doc/bv0056.pdf>.
- [14] M. Garcia-Pedroche, G. Bennett, Aeroacoustic Noise Source Identification Using Irregularly Sampled LDV Measurements Coupled with Beamforming., in: 2011. <https://doi.org/10.2514/6.2011-2719>.

Effects of noise on the cognitive performance of primary school children

Flavia Gheller^{a,d,*} | Gaia Spicciarelli^a | Lisa Battagliarin^b | Francesca Cappelletti^b | Antonino Di Bella^c | Piercarlo Romagnoni^b | Barbara Arfé^{a,d}

^a Department of Developmental Psychology and Socialization, University of Padua, Via Venezia, 8, 35131 Padua

^b Department of Architecture and Arts, University IUAV of Venice, Santa Croce, 191, 30135 Venice

^c Department of Industrial Engineering, University of Padua, Via Gradenigo, 6/a, 35131 Padua

^d I-APPROVE Centre, University of Padua, Via Belzoni, 160, 35121 Padua

* Corresponding author: flavia.gheller@unipd.it

Ricevuto: 20/3/2024

Accettato: 17/5/2024

DOI: 10.3280/ria1-2024oa17501

ISSN: 2385-2615

Classroom acoustic environments often fail to meet standards, and noisy environments can not only affect children's listening abilities but also lead to a decline in cognitive performance. This study examines how background noise influences primary school children's cognitive processes. Children from two primary schools underwent testing in their classroom environments under both quiet and noisy conditions, with students performing neuropsychological tests to assess executive functions and learning tasks. Preliminary findings only partially support the hypothesis that noise negatively impacts cognitive performance. Noise was found to adversely affect children's performance on attention tasks in the first school, whereas in the second school, children performed better in noise on both attention and inhibition tasks, as well as on a writing task. Unlike the first school, the second school had a reverberation time that did not meet regulatory standards. These initial findings suggest interesting hypotheses and directions for future research. However, they also reveal some weaknesses in the experimental protocol that need to be addressed to further investigate the emerging hypotheses.

Keywords: classroom acoustics, noise, cognitive performance, acoustic measurements, children

Gli effetti del rumore sulle prestazioni cognitive dei bambini di scuola primaria

Gli ambienti acustici delle classi spesso non rispettano gli standard e ambienti rumorosi non solo possono influenzare le capacità di ascolto dei bambini ma anche portare a un declino delle prestazioni cognitive. Questo studio esamina come il rumore influenzi i processi cognitivi dei bambini di scuola primaria. I bambini di due scuole hanno svolto in aula una serie di test per valutare le funzioni esecutive e brevi compiti di lettura e scrittura. Tutte le prove sono state svolte sia in condizioni di quiete che di rumore. I risultati preliminari supportano solo parzialmente l'ipotesi che il rumore abbia un impatto negativo sulle prestazioni cognitive. Le performance dei bambini nei compiti di attenzione sono infatti risultate peggiori in rumore rispetto alla condizione di quiete nella prima scuola, mentre nella seconda scuola i bambini hanno ottenuto risultati migliori in rumore nelle prove di attenzione, di inibizione e nel compito di scrittura. A differenza della prima scuola, nella seconda il tempo di riverbero non rispettava gli standard normativi. I risultati iniziali suggeriscono interessanti ipotesi e direzioni per future ricerche. Tuttavia, rivelano alcune debolezze nel protocollo sperimentale, da superare al fine di approfondire le ipotesi formulate e trovare nuove evidenze.

Parole chiave: acustica scolastica, rumore, performance cognitiva, misurazioni acustiche, bambini

1 | Introduction

The examination of the effects of noise has been extensive, particularly regarding auditory perception and listening effort. The term "auditory perception" refers to the ability to recognize and understand auditory stimuli, such as discerning characteristics like frequency, pitch, timbre, and loudness, as well as comprehending speech and music. It also encompasses the capability to spatially locate sounds, analyze their temporal patterns, and perceptually organize auditory information [1]. Listening effort refers instead to the attention and cognitive resources needed to overcome obstacles during a listening task. It can be evaluated through

various methodologies, including self-report, behavioral, and physiological measures [2]. Despite the increasing research in recent years on the consequences of noise in relation to cognitive fatigue [3], the impact of noisy environments on cognitive performance and brain activity has often been neglected, and most studies still focus on the perceptual effects of noise.

The consequences of noise exposure in terms of cognitive fatigue can, however, be particularly negative, and in the case of chronic exposure, long-term effects may also occur.

These consequences include annoyance, perceived disturbance, as well as impairments in concentration, productivity, and executive functioning [4, 5].

Executive functions (EFs) are higher-order cognitive skills that enable top-down control and regulation of thought processes and associated actions [6]. They consist in three primary components: inhibition (including selective attention, cognitive inhibition, and self-control), working memory, and cognitive flexibility. These components give rise to higher-order functions such as problem-solving, reasoning skills, and planning. They play a crucial role in both physical and mental health, contributing to cognitive and psychological development, reflective capacity, mental agility, and the self-regulation of emotions and behaviour. Therefore, EFs are considered pivotal in the development of academic skills, as the range of cognitive functions involved in the learning process primarily includes attention, memory, inhibition, concentration, and reaction time [7]. So, particularly in children, exposure to noise can have lifelong implications for both health and academic outcomes. Children are in fact particularly sensitive to noise, as they lack fully developed cognitive skills and coping strategies to counteract its effects [8]. Although children start to develop the ability to ignore distractions in their early years, their executive functions are still undergoing full development [9-10]. The maturation of their auditory pathway is not yet complete, and their phonological processing skills have not been fully achieved [11]. Consequently, children exhibit greater sensitivity to noise-induced interference than adults, impacting both auditory and non-auditory tasks [12]. Moreover, a considerable part of their educational experience occurs within complex and unfavourable acoustic settings.

According to the World Health Organization (WHO, 2014) [13], the physical environment within schools plays a significant role in promoting health. Among the stressors, elevated noise levels can lead to irritation, foster aggressiveness, diminish both physical and mental performance, and induce discomfort and headaches [14].

And there is evidence of how classroom noise can significantly impair children's academic performance [15]. Additionally, children with learning difficulties, are generally reliant on a favorable acoustic environment for optimal functioning [14].

Classrooms are almost always noisy environments, due to external noise sources, such as traffic and outdoor play areas, as well as internal noise sources, such as noise from chairs being moved or children talking [15]. In particular, the primary sources of noise reported as most bothersome by both students and teachers include classroom chatter and sounds from movement, such as those originating from the corridor and the scraping of chairs and tables [16].

Children-generated classroom noise was identified as having the most adverse effects on speech perception, listening comprehension, and performance in verbal and mathematical tasks. This phenomenon can be attributed to auditory distraction mechanisms. The impact depends on the spectro-temporal characteristics and informational content of the background noise, which may lead to domain-specific interference, attentional capture, or a combination of both mechanisms [17].

The World Health Organization [18] sets specific guidelines for classroom acoustics, recommending background noise levels not exceeding 35 dB(A) and a reverberation time (RT) of no more than 0.6 seconds.

In this regard, the UNI 11532-2 "Internal Acoustic Characteristics of Confined Spaces – Design Methods and Evaluation Techniques – Part 2: School Sector" has been recently published. This standard identifies the limit values to be respected in school environments for parameters such as reverberation time (T), Speech Transmission Index (STI), clarity (C50), and system noise. The document also specifies how to carry out on-site checks [19].

Evaluating and monitoring the acoustics of classrooms is particularly important because it has been observed that inadequate classroom acoustics are associated with increased perceptions of noise intensity and disturbance. Additionally, extended reverberation times, which often indicate poor classroom acoustics, lead to higher noise levels and reduced speech intelligibility. Consequently, students may experience diminished feelings of enjoyment and self-satisfaction [14].

However, schools and classrooms often fail to meet these acoustic standards [20] and even when attempts are made to improve the environment, they hardly ever mitigate the effects of background noise caused by children's chatter and classroom activities.

A recent monitoring report for the school year 2020/2021 [21] has concluded that only 11% of Italian school buildings are equipped with specific measures for protection against noise. Of these, the majority (79%) have adopted measures to isolate external noises, while few have reduced internal reverberation.

This study aims to investigate how different types of noise affect various verbal and nonverbal executive functions, as well as learning activities. Children's cognitive performance is assessed in both quiet and noisy conditions using a set of non-auditory tasks. The evaluation involves examining perceived cognitive effort and measures of the classroom acoustic environment.

The following findings present preliminary results based on the data collected to date.

2 | Material and Methods

2.1 | Participants

The study involved 74 fourth-grade students from two public primary schools in the Padua province of Italy.

- School A: two classrooms, 31 children (18 female), with a mean age of 9.2 years \pm 0.4 years.
- School B: two classrooms, 43 children (28 female), with a mean age of 9.1 years \pm 0.4 years.

None of the children had been diagnosed with cognitive, learning, or sensory disabilities, according to their class teachers. Both schools share similar outdoor noise conditions, as they are situated in low-traffic residential areas with

comparable socioeconomic characteristics. All parents provided informed consent for their children's participation in the study.

This research received approval from the Ethics Committee of the Human Inspired Technology Research Centre at the University of Padua (protocol number 2020_92R1).

2.2 | Materials and Procedures

2.2.1 | Children's Cognitive Measurements

Cognitive assessment: CoEN App

Children's cognitive abilities were assessed using an iOS app called "CoEN – Cognitive Effort in Noise" [22]. Developed by a research team from the University of Padua and Venice, this app employs game-like tasks to evaluate verbal working memory, visual attention, and cognitive inhibition. CoEN comprises five tasks, including adaptations from standardized neuropsychological tests such as the Digit Span Test (Forward and Backward), a visual attention test from the WISC-IV (cancellation subtest), a visual attention test from the NEPSY-II (visual search of faces), a Reading Span Test, and the Cognitive Inhibition Task, adapted from Diamond et al. [23].

In the Digit Span Test, verbal working memory is assessed by requiring the child to recall a series of digits either in the same order (forward subtest) or in reverse order (backward subtest) as they are presented by the examiner. In the CoEN version, digits are visually presented on the screen, and the child types the series of digits in either direct (forward span) or reverse (backward span) order on a keyboard.

The Visual Attention Test (NEPSY-II) is a visual search task where the child is required to identify target faces from a page displayed on the tablet screen in CoEN, that also contains distractors. This timed test must be completed within three minutes [24].

The Cancellation Test (WISC-IV) is similar to the NEPSY-II visual attention test but has a shorter duration. The child identifies and marks targets (e.g., animals) among various stimuli within 45 seconds [25].

The Reading Span Test [26] evaluates the ability to simultaneously hold and manipulate information in working memory. Children are presented with a series of sentences and asked to recall the final word of each sentence.

The inhibition task [23] assesses inhibitory control by displaying a red heart or a flower on either side of the tablet screen. The child must touch the arrow that corresponds to the heart's side (congruent condition) or the opposite side when a flower appears (non-congruent condition).

Assessment of learning abilities: Text comprehension task & Writing task

The children were then tasked with completing the following assessments:

A comprehension task [27] in which they read age-appropriate passages and answered a series of multiple-choice

questions. This test allows for the assessment of reading and comprehension abilities.

A writing task, specifically the Sentence Generation Test [28]. In this test, children were instructed to write as many sentences as possible within a 5-minute timeframe, each containing two pairs of given words. This task aids in evaluating verbal fluency and writing ability.

Following the testing session, children were given a self-report questionnaire, drawing from the Bess et al. fatigue scale [29]. This questionnaire was administered to assess their cognitive effort during the tasks. It consists of six items (e.g., "Do you feel tired?" and "Was it difficult to remember?") rated on a 5-point Likert scale, ranging from "not at all" to "very much".

During the sessions in schools, the children performed all the tests twice, once in quiet conditions and once in noisy conditions. To minimize any potential learning effects, all the tasks were administered with a minimum two-week interval between the two trials. In school A, the order of the task condition was counterbalanced across children. However, in school B, this was not feasible due to organizational issues, and both classes performed the tests in quiet during the first trial and in noise during the second trial.

Furthermore, in school A, both classes alternated: while half of the class performed the tests using the app, the other half completed the paper-based tasks, and then they switched roles. In school B, on the other hand, all children began with the app-based tests, and once completed, they proceeded to the paper-based ones.

The quiet condition was characterized by the classroom's natural acoustic environment, with noise levels being carefully controlled by instructing the children to remain as quiet as possible. Additionally, detailed instructions were provided to the children before the tests, encouraging them to remain quiet during testing.

For the noise condition, multi-talker babbling was introduced to simulate ambient noise, similar to what is typically found in classroom environments.

In each classroom, a talkbox placed on the teacher's desk introduced the following signals:

- School A: multi-talker babble noise [30].
- School B: multi-talker babble noise along with intermittent transient noises such as door slamming, knocking, ambulance sirens, etc.

2.2.2 | Acoustic Measurements

All acoustic assessments were conducted in empty classrooms, adhering to standard protocols. The Reverberation Time (RT) and Speech Transmission Index (STI) were measured, as they are commonly used objective parameters for evaluating classroom acoustic quality.

RT was measured according to ISO 3382 norms [31], at three different positions in each classroom for both sound source locations. The mean values of the six RT measurements were compared with the normative data in the fre-

quency of 250, 500, 1000 and 2000 Hz. Additionally, RT values corresponding to an occupancy level of 80% were estimated based on empty-room RT measurements, following the UNI 11532-2 standard [18].

STI was measured using a TalkBox by NTi Audio, which has a polar directivity diagram similar to that of the human voice. The TalkBox was positioned at the teacher's location and placed at a height of 1.50 m.

These assessments were conducted in unoccupied classrooms during school closures to determine compliance with normative references. This involved selecting three positions in a line at the talkbox, with one point placed 1 meter away and another at the least favorable position. Additionally, in School B, the measurement protocol included STI index measurements on all desks in the classroom.

In order to assess the impact of the different sound signals used in the two schools (multitalker babble noise in school A, and multitalker babble noise supplemented with transient noises in school B), measurements were conducted to determine the sound power emitted by the Talkbox under each scenario. This assessment was carried out by comparing the emitted sound against a reference sound source and following the protocols outlined in ISO 3747 [32].

Precisely, sound pressure levels were measured at six microphone positions arranged in a circular configuration at a distance of 50 cm from the Talkbox. This arrangement ensured comprehensive coverage of each signal emitted by the Talkbox, as well as the reference sound source and the background noise. Subsequently, sound power was calculated based on these measurements.

An omnidirectional calibrated microphone (model XL2 by NTi Audio) was used, positioned at a height of 1.2 m in the centre of the classroom, both in quiet and noisy conditions.

During cognitive testing in the classroom, the equivalent continuous sound level (LAeq,1s) was recorded.

The acquisitions are carried out throughout the entire duration of the testing session, starting from the distribution of materials and the explanation of the tests to the children, for a total of approximately 1 hour and 30 minutes. From all this acquired data, only the samples related to the actual test execution are processed (calculated from the moment when the children start the first test until the last child has completed all the tests).

Finally, since the overall test execution time may vary from child to child and therefore from class to class, the equivalent sound level (SEL) values were calculated for each classroom under both conditions, in order to compare the measured values among the different classes.

3 | Results

3.1 | Acoustic Measurements

The volumes of the classrooms where the tests were conducted are: 149 and 155 m³ for School A, and 142 and 140 m³ for School B.

- School A: The RT was measured in both classrooms, resulting in average values of 0.51 and 0.49 seconds, respectively. These measurements were found to comply with normative standards.

Similarly, the average STI values were calculated for both classes, measuring at 0.70 and 0.74, respectively. These values are considered satisfactory when compared to the standard scale outlined in ISO 9921 [33].

- School B: The average RT in both classrooms were found to be 1.55 and 1.36 seconds, respectively. These values exceeded the regulatory limit for each analyzed frequency.

However, the average STI values for both classes were found to be acceptable compared to the ISO 9921 standard scale, with at 0.56 and 0.54, respectively.

The measured RT values in empty classrooms and the estimated optimal RT values, considering 80% occupancy, are summarized in the following tables (Tab. 1 for School A and Tab. 2 for School B) and represented in the following graphs (Fig. 1 for School A and Fig. 2 for School B)

Tab. 1 – Measured Reverberation Time (RT) values in both classes (RT-1 and RT-2) and tolerance interval for the optimal RT at different frequencies – School A

Valori misurati del Tempo di Riverbero (RT) in entrambe le classi (RT-1 e RT-2) e intervallo di tolleranza per il valore di RT ottimale alle diverse frequenze – Scuola A

School A					
Freq [Hz]	Optimum RT [s]	Optimum RT (superior) [s]	Optimum RT (inferior) [s]	RT-1 [s]	RT-2 [s]
125	0.53	0.76	0.34	0.58	0.58
250	0.53	0.63	0.42	0.50	0.51
500	0.53	0.63	0.42	0.46	0.44
1000	0.53	0.63	0.42	0.55	0.48
2000	0.53	0.63	0.42	0.52	0.51
4000	0.53	0.63	0.34	0.47	0.45

Tab. 2 – Measured Reverberation Time (RT) values in both classes (RT-1 and RT-2) and tolerance interval for the optimal RT at different frequencies – School B

Valori misurati del Tempo di Riverbero (RT) in entrambe le classi (RT-1 e RT-2) e intervallo di tolleranza per il valore di RT ottimale alle diverse frequenze – Scuola B

School B					
Freq [Hz]	Optimum RT [s]	Optimum RT (superior) [s]	Optimum RT (inferior) [s]	RT-1 [s]	RT-2 [s]
125	0.52	0.75	0.34	2.25	1.75
250	0.52	0.62	0.42	1.80	1.41
500	0.52	0.62	0.42	1.48	1.39
1000	0.52	0.62	0.42	1.37	1.35
2000	0.52	0.62	0.42	1.30	1.23
4000	0.52	0.62	0.34	1.07	1.05

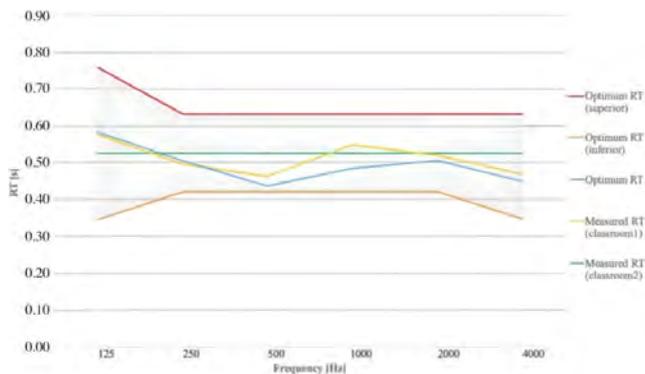


Fig. 1 - Graphical representation of the Measured Reverberation Time (RT) values and tolerance interval for the optimal RT at different frequencies – School A

Rappresentazione grafica dei valori del tempo di riverbero misurato e dell'intervallo di tolleranza per il tempo di riverbero ottimale a diverse frequenze – Scuola A

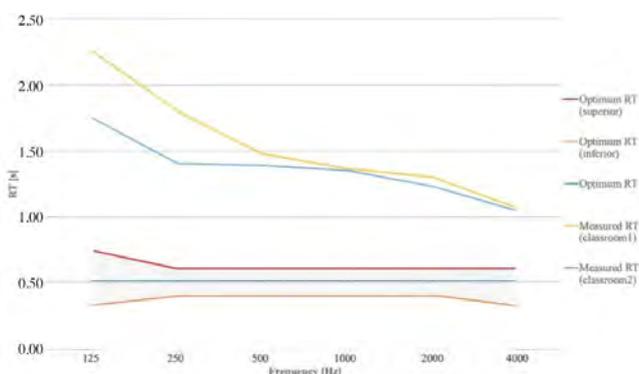


Fig. 2 – Graphical representation of the Measured Reverberation Time (RT) values and tolerance interval for the optimal RT at different frequencies – School B

Rappresentazione grafica dei valori del tempo di riverbero misurato e dell'intervallo di tolleranza per il tempo di riverbero ottimale a diverse frequenze – Scuola B

The calculated values of the equivalent sound level (SEL) are provided below (Tab. 3), and in the following (Tab. 4), the duration of the test execution and the corresponding individual SEL levels measured, for each class, in quiet and in noise, are reported. Specifically, for school A, the values related to the phase during which half of the class performed the cognitive tests using the CoEN app and the other half the paper-based tests are reported, and then the subsequent phase

Tab. 3 – Sound Equivalent Level (SEL) values for each classroom (SEL-1 and SEL-2) in each school, measured in both noisy and quiet conditions

Valori di Livello Sonoro Equivalente per ogni aula (SEL-1 e SEL-2) in ciascuna scuola, misurati in condizioni di quiete e di rumore

	School A		School B	
	SEL-1 [dBA]	SEL-2 [dBA]	SEL-1 [dBA]	SEL-2 [dBA]
“Quiet”	83.3	77.6	92.4	88.5
“Noise”	92.9	93.4	105.0	101.5

during which the tablet-paper tests were reversed. For school B, instead, the SEL values for each of the tests (conducted simultaneously by the entire class) are reported.

Tab. 4 – SEL values and test execution duration for each class: cognitive tests on tablets (memory, attention, and inhibition) and paper-based tests (text comprehension and sentence generation)
Valori di SEL e durata dell'esecuzione dei test per ciascuna classe: test cognitivi su tablet (memoria, attenzione e inibizione) e test su carta (comprensione del testo e generazione di frasi)

	Test	Test duration [min]	SEL [dBA] Quiet	Test duration [min]	SEL [dBA] Noise
School A 1	CoEN app – Learning abilities	19	91.8	21	93.4
School A 1	Learning abilities – CoEN app	17	83.3	23	92.9
School A 2	CoEN app – Learning abilities	28	88.0	18	92.0
School A 2	Learning abilities – CoEN app	18	77.6	21	93.4
School B 1	CoEN app	36	92.4	30	105.0
School B 1	Learning abilities comprehension task	10	85.4	10	96.8
School B 1	Learning abilities writing task	12	94.4	10	99.3
School B 2	CoEN app	26	88.5	23	101.5
School B 2	Learning abilities comprehension task	10	86.0	10	97.7
School B 2	Learning abilities writing task	25	88.0	10	99.0

Finally, Regarding the sound power levels, the following values were obtained: $L_w=77.5$ dB(A) for the signal used in School A, and $L_w=76.0$ dB(A) for the signal used in School B.

3.2 | Children's Cognitive Measurements

Due to some technical issues in acquiring scores related only to the inhibition test, which were later resolved through a series of modifications and an update of the App, it was not possible to consider the data from the inhibition test in the first school (A).

- School A: The paired t-test findings indicated that under noisy conditions, children exhibited significantly poorer performance on the Cancellation Test ($t=1.704$, $p<0.05$) and reported higher levels of cognitive fatigue ($t=-2.408$,

p<0.05) compared to quiet conditions. These results are summarized in the following table (Tab. 5).

Tab. 5 – Children's performance on the CoEN tasks across acoustic conditions – School A
Prestazioni dei bambini: prove dell'app CoEN nelle diverse condizioni acustiche – Scuola A

School A					
(n=31; 18 girls)					
Variable	"Quiet"		"Noise"		t
	Mean	SD	Mean	SD	
Digit Span Forward (accuracy)	6.04	1.40	6.15	1.89	-0.259
Digit Span Backward (accuracy)	5.27	2.05	5.85	1.29	-1.364
Reading Span (accuracy)	2.00	1.69	2.23	1.97	-0.507
Visual attention (accuracy)	14.69	9.75	11.65	17.41	1.194
Cancellation (accuracy)	26.42	10.71	22.69	10.74	1.704*
Comprehension	9.36	2.97	9.96	2.80	-0.742
Writing	13.40	4.89	12.36	5.65	0.783
Cognitive Effort Self Report	1.73	0.57	2.10	0.69	-2.408*

*p<.05; **p<.01; ***p<.001

- School B: The analysis showed significant differences between the quiet and noise conditions in the visual attention ($t=-2.382$, $p<0.05$; $t=-3.426$, $p<0.001$), inhibition ($t=-3.295$, $p<0.01$) and writing ($t=-4.915$, $p<0.001$) tasks, with better scores observed under the noise condition, as shown in the following table (Tab. 6).

Tab. 6 – Children's performance on the CoEN tasks across acoustic conditions – School B
Prestazioni dei bambini: prove dell'app CoEN nelle diverse condizioni acustiche – Scuola B

School B					
(n=43; 28 girls)					
Variable	"Quiet"		"Noise"		t
	Mean	SD	Mean	SD	
Digit Span Forward (accuracy)	5.65	1.84	5.91	1.58	-0.851
Digit Span Backward (accuracy)	5.29	1.96	5.53	2.12	-0.569
Reading Span (accuracy)	2.03	1.66	2.24	1.71	-0.879
Visual attention (accuracy)	13.16	13.59	18.29	8.73	-2.382*
Cancellation (accuracy)	18.92	15.04	26.87	9.44	-3.426***

Tab. 6 – continued

School B					
(n=43; 28 girls)					
Variable	"Quiet"		"Noise"		t
	Mean	SD	Mean	SD	
Cognitive inhibition Congruent (accuracy)	18.45	3.60	18.50	3.69	-0.071
Cognitive inhibition Incongruent (accuracy)	13.92	8.38	18.24	4.08	-3.295**
Cognitive inhibition Mixed (accuracy)	15.47	4.55	16.45	4.45	-1.593
Comprehension	9.11	7.74	8.99	3.01	0.30
Writing	10.82	5.71	15.47	8.43	-4.915***
Cognitive Effort Self Report	1.67	0.46	1.73	0.58	-1.083

*p<.05; **p<.01; ***p<.001

4 | Discussion

The results partially supported the hypothesis that babble noise has an adverse effect on children's cognitive performance.

In the case of School A, it was observed that noisy conditions led to a deterioration in the visual attention test and an increased perception of cognitive fatigue among children. The compromised performance in visual tasks can be attributed to noise, as it redirects attention partially from relevant visual information to the auditory signal, resulting in disruption of the task. This finding is consistent with previous research indicating that babble noise can significantly impact children's attention [34].

Contrary to expectations, results from School B did not align with those of School A. Despite the initial expectation that noise, including transient noises, would be more disruptive for the children, the findings demonstrated the opposite effect. Interestingly, there was a significant improvement in performance under noisy conditions for both visual attention and inhibition tasks, as well as for the writing task.

Regarding this last task, in particular, although it may seem counterintuitive, a similar result has already been found in a study by Dockrell & Shield [35], where children scored higher in reading and writing tasks in the babble noise condition with the addition of transient noises compared to quiet and babble noise conditions without transient noises. Furthermore, it's crucial to emphasize that the writing task involves creativity, and several studies [36] argue that the presence of moderate-intensity noise during the execution of a creative task can actually promote a positive outcome.

The results in School B regarding cognitive tests of attention and inhibition may be in line with the theory of stochastic resonance, which suggests that noise within a non-linear system can enhance the quality of the output signal compared to situations with no noise present [37]. This phenomenon has been observed across various physiologi-

cal systems, where noisy stimulation can potentially improve cognitive functions [38]. The addition of randomized noise can activate additional cognitive resources, potentially leading to improved attentional performance, especially in individuals with attention deficits or ADHD [38, 39].

For instance, research has shown that white noise can effectively enhance attention performance by improving the ability to distinguish between targets and non-targets and by reducing omission errors. Moreover, it has been found to alleviate extrinsic hyperactive behaviors in children with ADHD [40]. And there is evidence that white noise therapy could be beneficial for children with ADHD [41].

It should be noted, however, that when discussing stochastic resonance, white noise or noise with similar characteristics is the most commonly studied form, whereas, in our study, a babble noise was used.

Furthermore, the results from the second school suggest that contextual factors could play a role in modulating the impact of noise on cognitive performance. The RT measurements varied significantly between the two schools. School A, which had a sound-absorbing ceiling, exhibited values within the standard range, whereas school B showed much longer reverberation times that exceeded the normative standard. The variation in classroom acoustics between the schools could have influenced the divergent reactions to noise observed in the study. A plausible hypothesis is that due to prolonged exposure to inferior acoustic environments in school B, students might have developed more adept coping mechanisms to mitigate noise disturbances compared to those in school A.

And it is important to highlight how some studies also show how children might use compensatory strategies to reach the same level of performance in both silence and noise [42].

However, these hypotheses are preliminary and require further investigation. Methodological differences between the schools could have influenced the results.

The primary distinction lays in the experimental setup: in school A, the order of quiet and noisy conditions was alternated between the two classes, whereas in school B, both classes undertook tests in quiet followed by noise. Despite maintaining a minimum two-week interval between each test, it is possible that the children were more familiar with the tasks during the second trial, which could have provided an advantage to the children in both classes of school B during the tests conducted under noisy conditions.

5 | Conclusions

In conclusion, the study offered intriguing insights into the effects of noise on children's cognitive performance, particularly in varied school environments. While noisy conditions in School A were associated with decreased visual attention and increased cognitive fatigue, contrasting outcomes were observed in School B, where noise seemed to improve performance on various cognitive tasks.

However, there were some weaknesses in the experimental protocol that need to be addressed and corrected in future evaluations.

It is important, therefore, to further investigate these research questions. Future research should aim to establish clear causal relationships between observed effects and noise or room acoustics. This could be achieved by consistently counterbalancing acoustic conditions and evaluating children's baseline cognitive abilities in noise-free environments before analysing the impact of noise on groups with comparable performance levels. Additionally, exploring different types of noise could provide valuable insights into their effects on cognitive performance.

Conclusioni

In conclusione, lo studio ha fornito interessanti spunti sugli effetti del rumore sulle prestazioni cognitive dei bambini. Se da un lato nella Scuola A in condizione di rumore è stato rilevato un peggioramento delle performance nei compiti di attenzione visiva e a un aumento dell'affaticamento cognitivo percepito, un risultato diverso e per certi aspetti inatteso è stato osservato nella Scuola B, dove in condizione di rumore i bambini hanno ottenuto punteggi più alti in diverse prove.

Diventa quindi ancora più importante approfondire ulteriormente queste domande di ricerca, risolvendo in primo luogo quelle che sono state le principali problematiche dal punto di vista del protocollo sperimentale.

Una delle prospettive future di questo studio sarà certamente quella di provare a stabilire relazioni causali più evidenti tra gli effetti osservati, la presenza di rumore e l'acustica delle aule scolastiche. Ciò potrebbe essere realizzato innanzitutto attraverso un contro bilanciamento delle condizioni acustiche, e in secondo luogo andando a valutare le abilità cognitive di base dei bambini in ambienti privi di rumore, al fine di analizzare l'impatto del rumore su gruppi di bambini con livelli di prestazioni comparabili. Infine, analizzare gli effetti di diverse tipologie di rumore potrebbe fornire ulteriori evidenze e nuovi spunti di ricerca.

Acknowledgements

The Authors would like to thank RIA Editorial Board and Franco Angeli journal teams.

Bibliography

- [1] D. Chandler, R. Munday. *A Dictionary of Media and Communication* (1st ed.). Oxford University Press. Print ISBN-13: 9780199568758. Published online: 2011. Current Online Version: 2011. eISBN: 9780191727979.
- [2] R. McGarrigle, K.J. Munro, P. Dawes, A.J. Stewart, D.R. Moore, J.G. Barry, S. Amitay, Listening effort and fatigue: What exactly are we measuring? *A British Society of Audiology Cognition in Hearing Special Interest Group 'white paper,' International Journal of Audiology*. 53 (2014) 433-445. <https://doi.org/10.3109/14992027.2014.890296>.
- [3] C. Clark, K. Paunovic, WHO Environmental Noise Guidelines for the European Region: A Systematic Review on Environmental Noise and Cognition, *IJERPH*. 15 (2018) 285. <https://doi.org/10.3390/ijerph15020285>.

- [4] M.J. Jafari, R. Khosrowabadi, S. Khodakarim, F. Mohammadian, The Effect of Noise Exposure on Cognitive Performance and Brain Activity Patterns, *Open Access Macedonian Journal of Medical Sciences* 7 (2019) 2924-2931. <https://doi.org/10.3889/oamjms.2019.742>.
- [5] M. Basner, W. Babisch, A. Davis, M. Brink, C. Clark, S. Janssen, S. Stansfeld, Auditory and non-auditory effects of noise on health, *The Lancet*. 383 (2014) 1325-1332. [https://doi.org/10.1016/S0140-6736\(13\)61613-X](https://doi.org/10.1016/S0140-6736(13)61613-X).
- [6] J.E. Karr, C.N. Areshenkoff, P. Rast, S.M. Hofer, G.L. Iverson, M.A. Garcia-Barrera, The unity and diversity of executive functions: A systematic review and re-analysis of latent variable studies., *Psychological Bulletin*, 144 (2018) 1147-1185. <https://doi.org/10.1037/bul0000160>.
- [7] A. Diamond, Executive Functions, *Annu. Rev. Psychol.* 64 (2013) 135-168. <https://doi.org/10.1146/annurev-psych-113011-143750>.
- [8] S. Stansfeld, C. Clark, Health Effects of Noise Exposure in Children, *Current environmental health reports*. 2 (2015) 171-178. <https://doi.org/10.1007/s40572-015-0044-1>.
- [9] V. Anderson, Assessing executive functions in children: biological, psychological, and developmental considerations, *Pediatric Rehabilitation*. 4 (2001) 119-136. <https://doi.org/10.1080/13638490110091347>.
- [10] J.R. Best, P.H. Miller, A Developmental Perspective on Executive Function, *Child Development*. 81 (2010) 1641-1660. <https://doi.org/10.1111/j.1467-8624.2010.01499.x>.
- [11] D.R. Moore, Auditory development and the role of experience, *British Medical Bulletin*. 63 (2002) 171-181. <https://doi.org/10.1093/bmb/63.1.171>.
- [12] M. Klatte, K. Bergström, T. Lachmann, Does noise affect learning? A short review on noise effects on cognitive performance in children, *Frontiers in Psychology*. 4 (2013). <https://doi.org/10.3389/fpsyg.2013.00578>.
- [13] World Health Organization [WHO]. (2014). www.who.int/features/factfiles/mental_health/en/.
- [14] 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. *Frontiers in Psychology*, 10 (2019) 2736. doi: 10.3389/fpsyg.2019.02736.
- [15] B.M. Shield, J.E. Dockrell, The effects of environmental and classroom noise on the academic attainments of primary school children, *The Journal of the Acoustical Society of America*. 123 (2008) 133-144. <https://doi.org/10.1121/1.2812596>.
- [16] J. Massonnié, P. Frassetto, D. Mareschal, N.Z. Kirkham. Learning in Noisy Classrooms: Children's Reports of Annoyance and Distraction from Noise are Associated with Individual Differences in Mind-Wandering and Switching skills. *Environment and Behavior*. 54(1) (2022) 58-88. <https://doi.org/10.1177/0013916520950277>.
- [17] C. Visentin, M. Pellegatti, M. Garraffa, A. Di Domenico, N. Prodi. Individual characteristics moderate listening effort in noisy classrooms. *Scientific Reports*. 13 (2023) 14285. <https://doi.org/10.1038/s41598-023-40660-1>.
- [18] World Health Organization, "Guidelines for community noise," 1999. "WHO Environmental Noise Guidelines for the European Region" Authors: World Health Organization Regional Office for Europe Publication Year: 2018 Publisher: World Health Organization Regional Office for Europe URL: www.euro.who.int/en/health-topics/environment-and-health/noise/publications/2018/environmental-noise-guidelines-for-the-european-region-2018.
- [19] UNI 11532-2:2020: "Caratteristiche acustiche interne di spazi confinati-Metodi di progettazione e tecniche di valutazione-Parte 2: Settore scolastico".
- [20] K. Mealings, The effect of classroom acoustic conditions on literacy outcomes for children in primary school: A review, *Building Acoustics*. 29 (2022) 135-156. <https://doi.org/10.1177/1351010X211057331>.
- [21] Istituto Nazionale di Statistica (ISTAT). (2021). Edilizia Scolastica [Dataset]. <https://dati.istruzione.it/opendata/opendata/catalogo/elements1/leaf/?area=Edilizia%20Scolastica&datasetId=DS0182EDIPROTEZRUMSTA2021>.
- [22] <https://apps.apple.com/no/app/coen/id1565953506>.
- [23] Diamond, W.S. Barnett, J. Thomas, S. Munro, Preschool Program Improves Cognitive Control, *Science*. 318 (2007) 1387-1388. <https://doi.org/10.1126/science.1151148>.
- [24] M. Korkman, U. Kirk, and S. Kemp, NEPSY-II: Clinical and interpretative manual. Giunti Psychometrics, Firenze, 2018.
- [25] D. Wechsler, A. Orsini, and L. Pezzuti, WISC-IV Wechsler intelligence scale for children. Florence, Italy: Giunti O.S. Organizzazioni speciali, 2012.21
- [26] B. Arfé, C. Rossi, S. Sicoli, The Contribution of Verbal Working Memory to Deaf Children's Oral and Written Production, *Journal of Deaf Studies and Deaf Education*. 20 (2015) 203-214. <https://doi.org/10.1093/deafed/env005>.
- [27] C. Cornoldi, G. Colpo. (1995). Nuove Prove MT per la scuola media inferiore. Firenze: Organizzazioni Speciali
- [28] B. Arfé, E. Pizzocaro, Sentence Generation in Children with and Without Problems of Written Expression, (2016) 327-344. https://doi.org/10.1007/978-3-319-21136-7_19.
- [29] F. H. Bess, S. J. Gustafson, and B. W. Hornsby, "How Hard Can It Be to Listen? Fatigue in School-Age Children with Hearing Loss," Grantee Submission, 2014, pp. 1-14.
- [30] F. Cutugno, S. Prosser, M. Turrini. *Audiometria vocale 2000*; vol. I; ed. GN. Resound Italia.
- [31] ISO 3382-2:2008: "Acoustics-Measurement of room acoustic parameters-Part 2: Reverberation time in ordinary rooms".
- [32] ISO 3747:2010 "Determination of sound power levels and sound energy levels of noise sources using sound pressure".
- [33] ISO 9921:2004: "Ergonomics. Assessment of speech communication".
- [34] R.A. Fernandes, D.C.G.M. Vidor, A.A. de Oliveira, The effect of noise on attention and performance in reading and writing tasks, *CoDAS*. 31 (2019). <https://doi.org/10.1590/2317-1782/20182017241>.
- [35] J.E. Dockrell, B.M. Shield, Acoustical barriers in classrooms: the impact of noise on performance in the classroom, *British Educational Research Journal*. 32 (2006) 509-525. <https://doi.org/10.1080/01411920600635494>.
- [36] R. Mehta, R. (Juliet) Zhu, A. Cheema, Is Noise Always Bad? Exploring the Effects of Ambient Noise on Creative Cognition, *Journal of Consumer Research*. 39 (2012) 784-799. <https://doi.org/10.1086/665048>.
- [37] M.D. McDonnell, L.M. Ward, The benefits of noise in neural systems: bridging theory and experiment, *Nature Reviews Neurosciences*. 12 (2011) 415-425. <https://doi.org/10.1038/nrn3061>.

- [38] G.B.W. Söderlund, C. Björk, P. Gustafsson, Comparing Auditory Noise Treatment with Stimulant Medication on Cognitive Task Performance in Children with Attention Deficit Hyperactivity Disorder: Results from a Pilot Study. *Frontiers in Psychology*. 7 (2016). <https://doi.org/10.3389/fpsyg.2016.01331>.
- [39] S.K. Helps, S. Bamford, E.J.S. Sonuga-Barke, G.B.W. Söderlund, Different Effects of Adding White Noise on Cognitive Performance of Sub-, Normal and Super-Attentive School Children, *PLoS ONE*. 9 (2014) e112768. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0112768>.
- [40] HY. Lin. The Effects of White Noise on Attentional Performance and On-Task Behaviors in Preschoolers with ADHD. *International Journal of Environmental Research and Public Health*. 19(22) (2022) 15391. doi:10.3390/ijerph192215391.
- [41] T.A. Pickens, S.P. Khan, D.J. Berlau. White noise as a possible therapeutic option for children with ADHD. *Complementary Therapies in Medicine*. 42 (2019) 151-155. doi: 10.1016/j.ctim.2018.11.012. Epub 2018 Nov 13. PMID: 30670235.
- [42] J. Massonnié, D. Mareschal, N.Z. Kirkham. Individual differences in dealing with classroom noise disturbances. *Mind, Brain, and Education MBE* 16(3) (2022) 252-262. <https://doi.org/10.1111/mbe.12322>.

Riqualficazione acustica del Teatro 10 degli Studios di Cinecittà

Anna Tarsitano

Diapason Ingegneria,
Viale Pola, 6, 00198 Roma
a.tarsitano@diapasoningegneria.it

Ricevuto: 27/2/2024

Accettato: 8/5/2024

DOI: 10.3280/ria1-2024oa17357

ISSN: 2385-2615

In questo lavoro viene presentato un estratto del progetto di riqualficazione acustica degli Studios di Cinecittà. In particolare, vengono descritte le condizioni ante e post operam relative agli interventi di miglioramento di comfort interno e di isolamento acustico di facciata del Teatro 10. Il raggiungimento delle condizioni acustiche ottimali, in funzione della destinazione d'uso del fabbricato oggetto di indagine e delle esigenze della committenza, hanno evidenziato diverse criticità. L'obiettivo principale è stato quello di rendere utilizzabile il Teatro in tempi brevi e con lavorazioni caratterizzate da una rumorosità contenuta, in modo da non interferire con le attività dei Teatri adiacenti. Le soluzioni indagate dovevano essere allo stesso tempo soluzioni efficaci e sostenibili, al fine di raggiungere una fruibilità dell'ambiente idonea alle specifiche destinazioni d'uso.

In questo articolo viene presentato nel dettaglio il confronto tra i risultati della campagna di misura ante e post operam, con particolare riferimento alla soluzione progettuale scelta.

Parole chiave: riqualficazione acustica, comfort interno, isolamento acustico di facciata, campagna di misura

Acoustic retrofit of the "Teatro 10" of Cinecittà Studios

This paper presents an excerpt of the acoustic retrofit of Cinecittà Studios. It focuses on the ante and post operam conditions concerning the improvement of internal comfort and façade sound insulation of "Teatro 10". Achieving optimal acoustic conditions, considering the specific building's use and the client's requirements, highlighted several issues. The main goal was to make the "Teatro 10" available in a short time frame with low-noise construction activities, that would not interfere with the adjacent theaters' activities. The investigated solutions had to be both effective and sustainable, in order to make the theater acoustic characteristics suitable for the specific intended uses. The paper presents a comparison between the results of the ante and post operam measurement campaigns, with particular reference to the chosen design solution.

Keywords: acoustic retrofit, internal comfort, façade sound insulation, measurement campaign

1 | Introduzione

Il complesso degli stabilimenti cinematografici di Cinecittà affonda le radici nel passato recente della storia di Roma intrecciandosi con l'evoluzione politica del nostro Paese.

La sua edificazione si deve alla volontà del regime fascista di sviluppare la produzione cinematografica italiana attraverso uno specifico piano di incentivi tesi a questo obiettivo. Così, quando nel 1935 gli studi cinematografici della CINES, azienda di riferimento del settore in quel momento, rimasero vittima di un incendio che li distrusse, il futuro direttore di Cinecittà colse l'occasione per rilevarla e successivamente usarne i mezzi nel suo progetto per lo sviluppo dei nuovi stabilimenti di Via Tuscolana.

La posa della prima pietra avvenne il 30 gennaio 1936 e l'inaugurazione del complesso avvenne poco tempo dopo, tanto che il 28 aprile 1937 la produzione cinematografica all'interno di Cinecittà venne avviata con una cerimonia di

inaugurazione a cui parteciparono le più importanti personalità culturali e politiche di quel momento.

In questo breve lasso di tempo vennero costruiti 73 edifici, tra cui i 21 teatri e relativi camerini, falegnamerie, attrezzature, centrali elettriche, uffici direzionali e quant'altro necessario per supportare la produzione. Sin dai primi momenti il complesso si è dimostrato essere una vera e propria fabbrica televisiva e cinematografica: una città altamente specializzata in una sola funzione all'interno della città vera. Ad oggi negli studi sono stati girati circa 3000 film, di cui circa un centinaio hanno ricevuto una candidatura al premio Oscar, tale prestigiosa onorificenza è stata riconosciuta a 51 di essi. Le caratteristiche acustiche richieste per questa tipologia di ambienti sono molto varie e complesse da ottenere se si tiene conto del continuo cambiamento di arredi e allestimenti e quindi delle caratteristiche delle unità fonoassorbenti presenti [1,2].

L'intera area degli stabilimenti cinematografici di Cinecittà, composta di aree ed immobili, è oggetto di tutela ai sensi

del comma 1 dell'art. 10 del D.Lgs. 42/2004 "Sono beni culturali le cose immobili e mobili appartenenti allo Stato, alle regioni, agli altri enti pubblici territoriali, nonché ad ogni altro ente ed istituto pubblico e a persone giuridiche private senza fine di lucro, ivi compresi gli enti ecclesiastici civilmente riconosciuti, che presentano interesse artistico, storico, archeologico o etnoantropologico" e, pertanto, attualmente soggetti a verifica Ministeriali, ai sensi dell'art 12 del D.Lgs 42/2004, e identificati come Beni culturali immobili puntuali.

2 | Il caso di studio

L'edificio analizzato è il Teatro 10, che presentava diversi problemi di isolamento acustico e di comfort acustico interno. Tali problematiche rendevano difficile l'utilizzo dello stesso per le riprese cinematografiche, queste infatti richiedono un ottimo isolamento dai rumori provenienti dall'esterno, oltre chiaramente ad una buona acustica interna. Il livello di rumore residuo esterno degli studios è stato misurato attraverso dei rilievi spot nel periodo di riferimento diurno con durata di 30 min, il valore del LAeq misurato è pari a 58,5 dBA. In Fig. 1 è mostrata la planimetria generale del complesso degli Studios di Cinecittà e la posizione al suo interno del Teatro 10.



Fig. 1 – Planimetria dell'intero complesso degli Studios di Cinecittà
Overall layout plan of Cinecittà Studios

Il Teatro 10 si trova nella parte centrale degli Studios (Fig. 2), circondato dalla viabilità interna percorsa prevalentemente da mezzi pesanti che lavorano all'interno degli Studios durante l'intero arco della giornata.

Questa posizione rende ancora più rilevante la necessità di intervenire per migliorare la qualità acustica del fabbricato, sia in termini di comfort interno che di isolamento acustico di facciata

poiché i significativi volumi di traffico che insistono sulla strada incidono in maniera significativa sulla qualità acustica della sala.

Da un punto di vista geometrico il Teatro si presenta con una pianta e una sezione regolare (Fig. 4 e Fig. 5), di 1.400 m² ed è suddiviso in due zone, una con un'altezza di 16 m e l'altra con un'altezza di 11,2 m; il volume della prima zona è di 8.480 m³ il volume della seconda zona è di circa 9.750 m³ per un volume totale di 18.230 m³.



Fig. 2 – Il Teatro 10 di Cinecittà
Cinecittà's "Teatro 10"

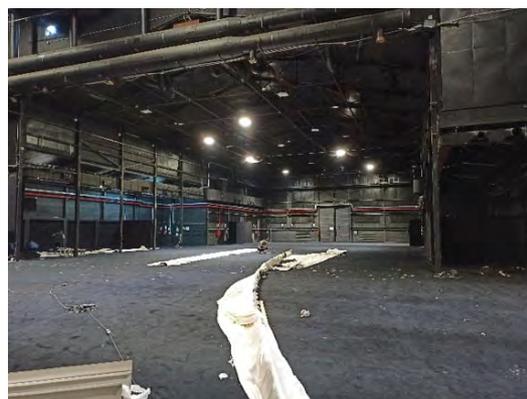


Fig. 3 – Il Teatro 10 di Cinecittà durante gli interventi di retrofit
Cinecittà's "Teatro 10" during the retrofit phase

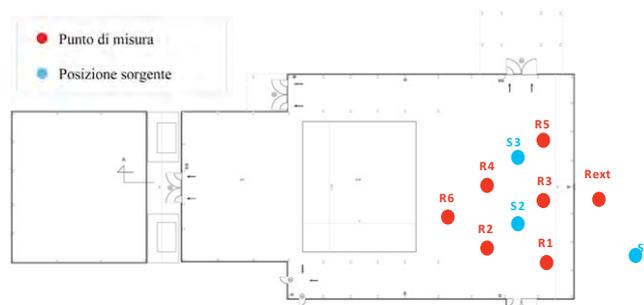


Fig. 4 – Planimetria del Teatro 10; Postazioni fonometriche e posizioni della sorgente
Planimetric representation of "Teatro 10"; Measurement positions and source positions

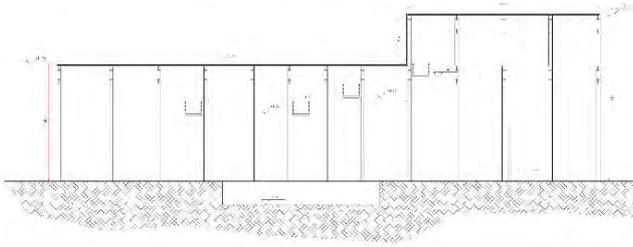


Fig. 5 – Rappresentazione in sezione del Teatro 10
Geometric section of "Teatro 10"

3 | La metodologia applicata

L'analisi acustica del Teatro 10 è stata eseguita attraverso dei rilievi fonometrici finalizzati a valutare le sue prestazioni nello stato di fatto (situazione ante operam) e successivamente agli interventi (situazione post operam).

Ai fini della caratterizzazione acustica oggettiva nello stato di fatto e la successiva verifica del miglioramento acustico prodotto dagli interventi di riqualificazione, sono stati selezionati i seguenti parametri da indagare:

- tempo di riverberazione (T_{60});
- indice di valutazione dell'isolamento acustico di facciata (D_{2mnt} , parametro che quantifica la capacità della parete e degli altri elementi presenti sulla facciata di isolare acusticamente un ambiente dai rumori provenienti dall'esterno).

Le misure sono state eseguite secondo la UNI 16283-3:2016 [3] per l'isolamento acustico di facciata e la UNI EN ISO 3382 [4] per il tempo di riverberazione.

La strumentazione impiegata per la campagna di monitoraggio acustico è conforme ai requisiti della classe 1, secondo le norme IEC 61672-1, IEC 61260 e IEC 60942 e l'attrezzatura di misurazione del tempo di riverberazione è conforme ai requisiti della ISO 3382-2.

Nel dettaglio per svolgere la campagna sperimentale ante e post operam sono stati impiegati i seguenti strumenti:

- fonometro Larson Davis Mod. 831 (n° di serie 0002491), conformi alle norme IEC 651 tipo 1 ed IEC 804 tipo 1. Analisi da 20Hz a 20 kHz con filtri conformi ad ANSI S1.11/1986 tipo 1-D, e IEC 1260;
- microfono PCB 377B02 (n° di serie 123293) con preamplificatore PCB PRM831 (n° di serie 019066);
- calibratore di livello acustico Larson Davis Mod. L&D CAL200 n. di serie 8325;
- diffusore omnidirezionale OMNI12plus e amplificatore AMPLI12Plus n. seriale congiunto phon-x 08-22_234 A12Plus.

3.1 | I rilievi acustici

Per valutare il comportamento acustico dell'ambiente oggetto di indagine si è predisposta una campagna sperimentale tale da garantire condizioni di misura ripetibili e riproducibili nelle condizioni ante e post operam. In Fig. 4 è riportata la planimetria del Teatro 10 con l'indicazione dei punti di misura

e delle posizioni delle sorgenti. In particolare, sono state valutate una posizione sorgente esterna, due posizioni sorgenti interne per il calcolo del tempo di riverbero e una postazione fonometrica esterna e sei interne.

In Fig. 6 viene mostrato il posizionamento della strumentazione per eseguire una misura di isolamento acustico facciata per valutare l'indice D_{2mnt} nelle condizioni ante operam. La cassa direzionale è stata posizionata con un angolo di inclinazione pari a 45° con distanza di 7 metri sulla diagonale.



Fig. 6 – Misura di isolamento acustico di facciata ante operam
Façade sound insulation measurement ante operam

Fig. 7 invece mostra l'analoga posizione di misura ma a valle dell'intervento di riqualificazione acustica, nelle condizioni post operam. Fig. 8 mostra una misura di tempo di riverberazione effettuata a valle dei lavori riqualificazione acustica del Teatro 10.



Fig. 7 – Misura di isolamento acustico di facciata post operam
Façade sound insulation measurement post operam

I rilievi sono stati eseguiti il 24 febbraio e il 3 marzo 2022 per lo stato di fatto (condizione ante operam) e il 14 dicembre 2023 per la valutazione delle prestazioni acustiche dopo l'intervento di retrofit (condizione post operam).



Fig. 8 – Misura di tempo di riverberazione
Reverberation time measurement

4 | Analisi acustica dello scenario ante operam

Il Teatro 10 di Cinecittà, prima dei lavori di riqualificazione acustica, si presentava con una struttura prefabbricata in pannelli sandwich e all'interno rivestito da controsoffitto fo-noassorbenti deteriorato.

4.1 | Tempo di riverberazione

Per valutare il comfort interno di un ambiente un parametro che deve essere necessariamente indagato è tempo di riverberazione. Questo è definito come l'intervallo di tempo che trascorre dal momento in cui la sorgente del segnale acustico viene spenta, al momento in cui la densità di energia sonora si riduce ad un valore pari ad un milionesimo della densità di energia sonora a regime. Questo equivale alla riduzione di 60 dB del livello sonoro rispetto al valore a regime (per questo motivo spesso il tempo di riverberazione viene indicato con il simbolo T60).

La misura sperimentale del T60 si può eseguire tramite il metodo del decadimento del livello sonoro allo spegnimento di una sorgente di suono continuo (ad esempio rumore bianco), oppure con il metodo impulsivo e integrazione all'indietro di Schröder (evento impulsivo generato, ad esempio, con una pistola a salve).

Per la valutazione del tempo di riverberazione del Teatro 10 è stato applicato il metodo della sorgente interrotta.

In Tab. 1 sono riportati i dati geometrici e il valore di riferimento del tempo di riverberazione per il Teatro 10.

Tab. 1 – Dati geometrici del teatro 10 – Zona 1+2
“Teatro 10” geometrical data – Zone 1+2

Superficie di base [m ²]	1400,5
Altezza [m]	11,2-16
Volume ambiente [m ³]	18.229,6

Il Teatro 10 ha una forma geometrica regolare, schematizzabile come due rettangoli di diverse dimensioni, sia in pianta che in sezione (Fig. 4 e Fig. 5). Data la forma e la dimensione dell'ambiente indagato è stato possibile valutare il tempo di riverberazione applicando il metodo statistico.

Il tempo di riverberazione, secondo la formula di Sabine, è direttamente proporzionale al volume (Eq. 1):

$$T_{60} = 0,16 \frac{V}{A} \quad (1)$$

Dove 0,16 è un coefficiente correttivo espresso in s/m, V è il volume della sala espresso in m³ e A è l'assorbimento totale della sala espresso in m².

Essendo il volume dell'ambiente pari a 18.000 m³ si è considerato un tempo di riverberazione ottimale per il parlato pari a 1,2 s [5].

Tab. 2 – Tempo di riverberazione ottimale per il parlato [6]
Optimal reverberation time for speech

Volume [m ³]	Tempo di riverberazione ottimale per il parlato [s]
1.000	0,75 ÷ 0,92
2.500	0,83 ÷ 1,02
5.000	0,92 ÷ 1,12
10.000	0,99 ÷ 1,21
15.000	1,04 ÷ 1,27
20.000	1,08 ÷ 1,32
25.000	1,12 ÷ 1,38

In Fig. 9 sono riportati i valori del tempo di riverberazione misurato nello stato ante operam.

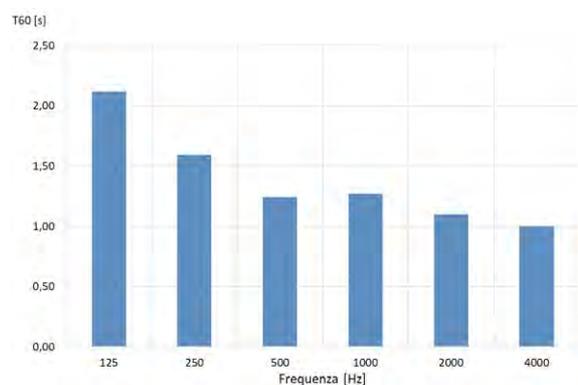


Fig. 9 – Valori di Tempo di Riverberazione misurati ante operam
Reverberation time values measured ante operam

Il tempo di riverberazione misurato prima dell'intervento di riqualificazione acustica, mediato sulle frequenze da 250 a 1.000 Hz, è pari a 1,3 secondi, leggermente più alto rispetto al valore ottimale. Si nota tuttavia che alle basse frequenze il valore del tempo di riverberazione è molto elevato, questo infatti è pari a 2,12 s a 125 Hz. Per le frequenze centrali di banda di ottava dai 250 Hz ai 4.000 Hz il tempo di riverberazione assume valori pari a dai 1,59 s, 1,24 s, 1,27 s, 1,10 s e 1 s, rispettivamente.

4.2 | Isolamento acustico di facciata

Per garantire una buona acustica nell'ambiente indagato è stato valutato anche il requisito acustico passivo di isolamento della facciata.

In particolare, la facciata sottoposta a prova è stata quella esposta a Sud-Ovest, in quanto la più rappresentativa del potere fonoisolante del pannello sandwich attualmente in opera e quella con meno discontinuità.

La prova è stata eseguita utilizzando la procedura riportata nella UNI EN ISO 16283-3:2016 "Misure in opera dell'isolamento acustico in edifici e di elementi di edificio – Parte 3: Isolamento acustico di facciata" [1].

Si sono determinati i seguenti parametri acustici:

Indice di valutazione dell'isolamento acustico normalizzato rispetto al tempo di riverberazione $D_{2m,nT}$ (Eq. 2 e 3):

$$D_{2m} = L_{1,2m} - L_2 \quad (2)$$

$$D_{2m,nT} = D_{2m} + 10 \log_{10} \left(\frac{T}{T_0} \right) \quad (3)$$

con:

- $L_{1,2m}$ livello di pressione sonora esterno a 2 metri dalla facciata, prodotto da altoparlante con incidenza del suono a 45° sulla facciata;

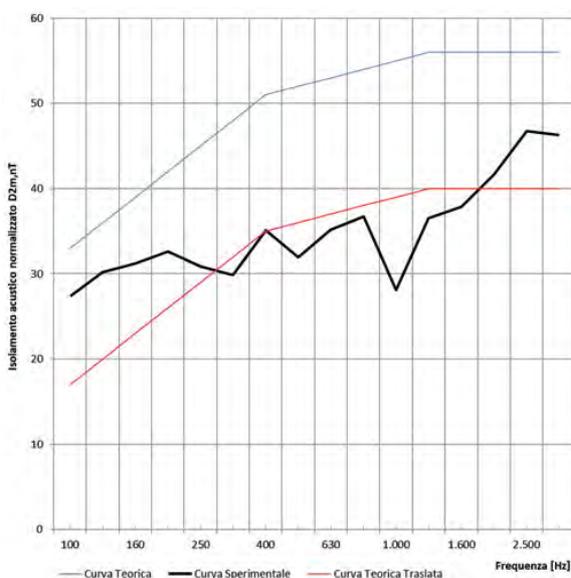


Fig. 10 – Definizione degli indici di valutazione
Evaluation indices definition

- L_2 livello di pressione sonora medio nell'ambiente ricevente;
- T tempo di riverberazione nell'ambiente ricevente, in s;
- T_0 tempo di riverberazione di riferimento assunto pari a 0,5 s.

Il valore misurato per l'isolamento acustico di facciata nella condizione ante operam è pari a 36 dB. Questo valore è molto basso, si è reso pertanto necessario eseguire un intervento di placcaggio esterno in modo tale da non interferire con le attività.

In Fig. 10 si riportano i grafici per la determinazione degli indici di valutazione, secondo la UNI EN ISO 717-1.

5 | Obiettivi e strategie di intervento

In questo paragrafo vengono riportati gli obiettivi dell'intervento e le soluzioni adottate data la natura dell'intervento. Il Teatro 10 è una struttura prefabbricata caratterizzata da un punto dall'applicazione di pannelli sandwich, che è stata sempre utilizzata per trasmissioni televisive e per riprese cinematografiche. In particolare, per quest'ultima attività è fondamentale una buona acustica ed un corretto isolamento acustico.

Nel dettaglio, il Teatro 10 trovandosi in una posizione centrale rispetto all'assetto planimetrico degli Studios di Cinecittà, è circondato dalla viabilità interna percorsa per lo più da mezzi pesanti che lavorano costantemente all'interno degli Studios stessi. Al fine di garantire un adeguato isolamento acustico dalla rumorosità esterna ci si è posto come obiettivo un valore di riferimento più elevato rispetto ai valori riportati dal DPCM 5/12/97 (per la categoria F "edifici adibiti ad attività ricreative o di culto o assimilabili") [7], nello specifico un valore di isolamento maggiore di 45 dB ($D_{2m,nT,w} > 45$ dB). Per raggiungere tale obiettivo, data la struttura prefabbricata, la presenza di grandi portoni carrabili e di "gattarole", è stato necessario studiare attentamente gli interventi al fine di ridurre il più possibile i ponti acustici ed incrementare notevolmente l'isolamento acustico rispetto a quello misurato nello scenario ante operam ($D_{2m,nT,w} = 36$ dB).

Per il comfort acustico, data la destinazione d'uso ed il volume, ci si è posti come obiettivo un valore di tempo di riverberazione minore di 1,2 s, non lontano dal valore misurato nella fase ante operam.

La particolarità di questo tipo di intervento e la sfida legata alla sua realizzazione, ha riguardato la forte necessità della committenza di realizzare l'opera nel più breve tempo possibile riducendo al minimo le interferenze con le attività in essere. Gli Studios, infatti, dovevano necessariamente rimanere attivi nelle fasi di intervento di riqualificazione acustica che hanno interessato soltanto il Teatro 10.

5.1 | Tempo di riverberazione

Al fine di ridurre il tempo di riverberazione, soprattutto alle basse frequenze, si è sostituito il controsoffitto attualmente presente con uno più performante alle basse frequenze.

Massa superficiale complessiva della nuova struttura $m_s 26,1 \text{ kg/m}^2$

Necessità della committenza era di installare un controsoffitto modulare, facilmente smontabile qualora fosse necessario appendere delle scenografie alla capriata superiore in acciaio e di colore necessariamente nero. Inoltre, bisogna considerare che il Teatro 10 è affittato di volta in volta a produzioni differenti che installano specifiche scenografie, ciò comporta un deterioramento continuo dei materiali di finitura e questo rende evidente la necessità di installare un pannello facilmente sostituibile.

Alla luce di queste necessità il pannello scelto per l'intervento di riqualificazione e il miglioramento del comfort acustico interno è il Sombra A con sovrapposto un pannello di lana imbustata, al fine di assorbire meglio le basse frequenze.

In Tab. 3 si riportano i coefficienti di assorbimento relativi alla soluzione scelta.

Tab. 3 – Coefficienti di assorbimento della soluzione scelta
Absorption coefficients of the chosen solution

Frequenze [Hz]	Coefficienti di assorbimento
125	0,45
250	0,8
500	1
1.000	0,85
2.000	1
4.000	1

5.2 | Isolamento acustico di facciata

Per migliorare l'isolamento acustico di facciata si è studiato nel dettaglio un intervento che doveva essere al contempo "leggero", in modo tale che non sovraccaricasse la struttura attualmente presente, di veloce esecuzione e che non comportasse l'interruzione delle attività presenti nel Teatro al momento della riqualificazione.

Per fare ciò si è pensato di lavorare esternamente al Teatro e di creare una nuova pelle staccata attraverso un'intercapedine d'aria di 8 cm (nel caso della parete) e separata da materiale con ottima rigidità dinamica nel caso del solaio. Nelle Fig. 11 sono riportati i particolari dei pacchetti scelti.

Inoltre, si è prestata particolare attenzione alle aperture presenti sulle diverse facciate del teatro in modo particolare ai portoni carrabili e alle "gattaiole".

I portoni carrabili sono stati realizzati con battute laterali in acciaio triple con guarnizioni termoespandenti e materiale coibente a triplo strato all'interno delle ante.

In particolare, vista la necessità del passaggio di mezzi pesanti, non è stato possibile inserire delle battute nella parte inferiore del portone, per questo motivo si è progettato il battente inferiore inclinato con guarnizione in gomma ad alta densità, tale da garantire perfetta aderenza con la soglia.

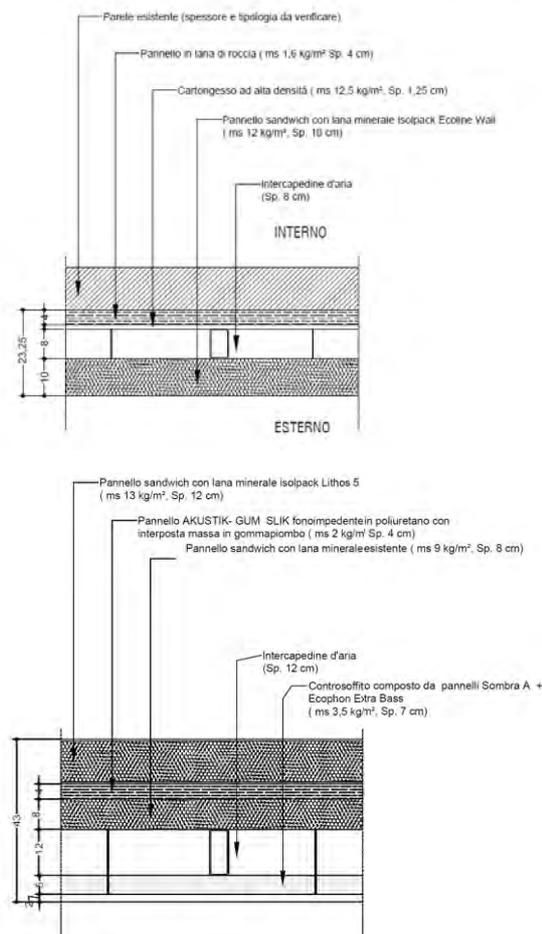


Fig. 11 – Particolare della parete (a) e del solaio (b)
Wall (a) and roof slab (b) detail

In Fig. 12 è rappresentato il particolare del battente inferiore.

Le aperture per il passaggio dei cavi presenti su tutti i teatri di cinecittà e nel gergo chiamate "gattaiole", sono state sostituite da doppi serramenti con apertura a sporgente (Fig. 13).

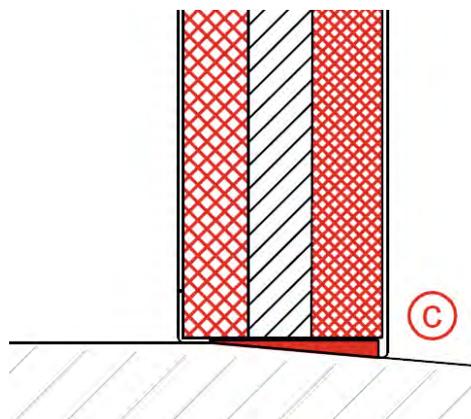


Fig. 12 – Particolare del battente inferiore
Bottom rail detail

In particolare, ogni anta rivestita in lamiera è riempita all'interno da materiale coibente a triplo strato (lana di roccia densità 120 kg/m³ (sp. 5 cm), pannello composto da fibre e granuli di gomma SBR e granuli di gomma EPDM densità 500 kg/m³ (sp. 5 cm) e lana di roccia densità 70 kg/m³ (sp. 5 cm).

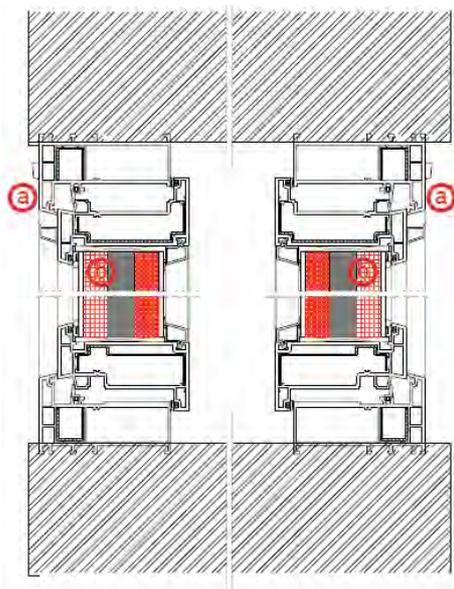


Fig. 13 – Particolare costruttivo delle “Gattarole”
“Gattarole” constructive detail

6 | Analisi acustica dello scenario post operam

A seguito degli interventi di riqualificazione acustica del Teatro 10 sono stati eseguiti dei rilevamenti fonometrici di verifica, nel dicembre del 2023, negli stessi punti di misura relativi allo scenario ante operam.

6.1 | Tempo di riverberazione

La misura sperimentale del T_{60} è stata eseguita tramite il metodo del decadimento del livello sonoro allo spegnimento di una sorgente di suono continuo.

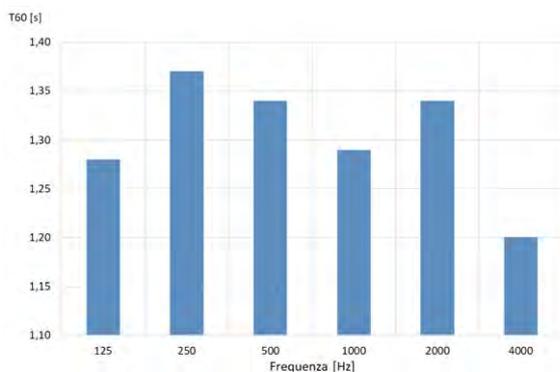


Fig. 14 – Valori di Tempo di Riverberazione misurati post operam
Reverberation time values measured post operam

In Fig. 14 si riporta in forma grafica il risultato ottenuto dalle misure di tempo di riverberazione nello stato post operam.

Il tempo di riverberazione misurato nello scenario Post-Operam mediato sulle frequenze da 250 a 1000 Hz è pari a 1,12 s, tale valore risulta adeguato alla destinazione d'uso dell'ambiente indagato e conforme al valore ottimale.

È interessante notare come, grazie all'intervento proposto, i valori alle basse frequenze si siano notevolmente abbassati e la curva del tempo di riverberazione risulti più uniforme alle diverse frequenze. Tale risultato è evidenziato dal grafico riportato in Fig. 15.

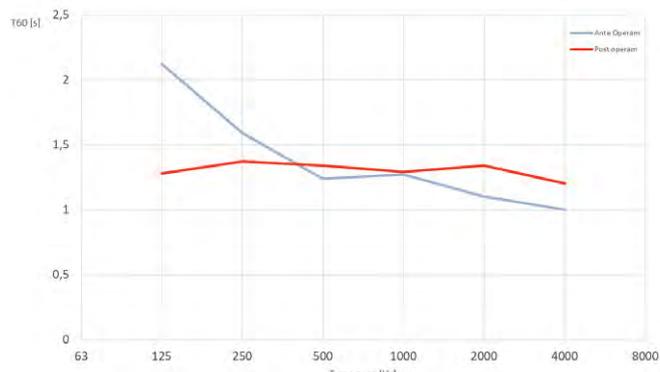


Fig. 15 – Confronto fra i valori di tempo di riverberazione ante e post operam

Comparison of reverberation time values ante and post operam

6.2 | Isolamento acustico di facciata

Nello scenario post operam è stato valutato il requisito acustico passivo di isolamento della facciata ($D_{2m,nT}$) sulla stessa facciata indagata nella fase ante operam.

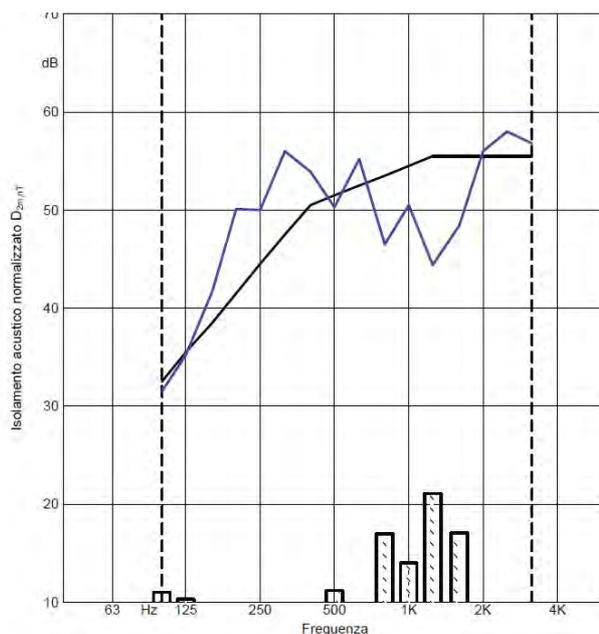


Fig. 16 – Definizione degli indici di valutazione
Evaluation indices definition

La prova è stata eseguita utilizzando la procedura riportata nella UNI EN ISO 16283-3:2016 “Misure in opera dell'isolamento acustico in edifici e di elementi di edificio – Parte 3: Isolamento acustico di facciata” [1].

Il valore misurato per l'isolamento acustico di facciata a valle dell'intervento di riqualificazione acustica è pari a 52 dB. In Fig. 16 sono riportati i grafici per la determinazione degli indici di valutazione, secondo la norma UNI EN ISO 717-1 [3].

Questo valore è molto più alto rispetto al valore fissato come obiettivo (45 dB) e soprattutto risulta essere ampiamente superiore al valore misurato nello scenario ante operam (36 dB).

7 | Conclusioni

Dall'analisi dei risultati delle campagne di monitoraggio acustico eseguite nel Teatro 10 nella condizione ante operam, è stato possibile dedurre le seguenti considerazioni in merito ai parametri acustici indagati:

- *Tempo di riverberazione*: nello stato di fatto, il tempo di riverberazione misurato è superiore ai valori di conformità alle basse frequenze; alle medie e alte frequenze il tempo di riverberazione è di poco superiore ai valori di riferimento.
- *Isolamento acustico di facciata*: l'isolamento acustico misurato nello stato di fatto è molto basso, circa 36 dB.

Nell'intervento di riqualificazione acustica del Teatro 10 è stato necessario prevedere l'installazione di materiale fonoassorbente più performante alle basse frequenze, tale da correggere il tempo di riverberazione particolarmente alto proprio alle basse frequenze. Inoltre, è stato necessario eseguire un intervento di placcaggio all'esterno del teatro per migliorarne l'isolamento acustico di facciata, prestando particolare attenzione alle aperture presenti sulla facciata stessa che avrebbero potuto costituire dei punti deboli riducendo di molto il valore del requisito acustico passivo $D_{2m,nt}$.

A seguito degli interventi proposti si nota come il tempo di riverberazione sia conforme al valore limite e presenti un andamento per lo più lineare alle diverse frequenze.

L'isolamento acustico di facciata, a valle dell'intervento di retrofit, è caratterizzato da un valore molto elevato (52 dB) anche rispetto agli obiettivi fissati (45 dB), ma soprattutto rispetto al valore di partenza (36 dB). Creare una pelle esterna ed in parte distaccata dalla struttura esistente, seppur con una massa superficiale non elevata, ha permesso di incrementare l'isolamento acustico di 16 dB.

L'intervento di riqualificazione acustica del Teatro 10 di Cinecittà non solo ha permesso di implementare notevolmente la qualità acustica del Teatro in termini di comfort interno e isolamento acustico di facciata, ma ha anche tenuto fede a quella che era la necessità della committenza, ovvero di garantire il proseguimento indisturbato delle attività degli Studios.

Conclusions

Starting from the analysis of the outcomes of the acoustic monitoring campaigns carried out in the “Teatro 10” in the ante operam condition, it was possible to highlight the following aspects:

- *Reverberation time*: in the ante operam condition, the measured reverberation time is higher than the low frequency compliance values; at the medium and high frequencies the reverberation time is slightly higher than the reference values.
- *Facade acoustic insulation*: the acoustic insulation measured under the ante operam condition is very low (approximately 36 dB).

During the “Teatro 10” retrofit phase, it was necessary to installed sound-absorbing material that performs better at low frequencies, able to correct the reverberation time, particularly at low frequencies. Furthermore, it was necessary to carry out a cladding intervention on the “Teatro 10” external wall to improve its acoustic insulation, paying particular attention to the openings on the facade which can represent weak points and greatly reduce the value of the $D_{2m,nt}$ parameter.

Following the proposed interventions, it is worthy to notice that the reverberation time complies with the limit value and presents a mostly linear trend at the different frequencies. The acoustic insulation of the façade is a very high value (52 dB) also compared to the objectives set (45 dB) but above all compared to the starting value (36 dB). Creating an external skin partially detached from the existing structure, even if characterized by a low surface mass, made it possible to increase the acoustic insulation by 16 dB.

The acoustic retrofit intervention of Cinecittà “Teatro 10” not only made it possible to significantly implement the acoustic quality of the building in terms of internal comfort and acoustic insulation of the façade, but also remained faithful to what was the need of the client, or to guarantee the undisturbed continuation of the Studios' activities.

Bibliografia

- [1] X. Xu, H. Wang, Y. Sun, J. Han, R. Huang (2018) Sound absorbing properties of perforated composite panels of recycled rubber, fiberboard sawdust, and high density polyethylene, *Journal of Cleaner Production* 187:215-221. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2018.03.174>.
- [2] Y. Zhang, Z. Kuang, M. Wu, J. Yang (2015) In-situ measurement of sound absorbing properties using plane-wave sound field reproduced by virtual loudspeaker array, *Building and Environment* 94:883-890. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2015.07.003>.
- [3] UNI 16283-3:2016 “Misure in opera dell'isolamento acustico in edifici e di elementi di edificio – Parte 3: Isolamento acustico di facciata”.
- [4] UNI EN ISO 3382 “Misurazione dei parametri acustici degli ambienti”.
- [5] UNI EN ISO 717-1 “Valutazione dell'isolamento acustico in edifici e di elementi di edificio – Parte 1: Isolamento acustico per via aerea .
- [6] L. Lococciolo Riqualificazione acustica del TEX – Il Teatro dell'ExFadda, *Rivista Italiana di Acustica* 46, 2022 pp. 51-59.
- [7] DPCM 5 dicembre 1997 - Determinazione dei requisiti acustici passivi degli edifici (GU Serie Generale n. 297 del 22-12-1997).

Comparing acoustic models with measured noise sources in complex industrial plants – Ammonia production units

Giuseppe Squadrone^{a*} | Edoardo Brunazzo^a | Elena Bosa^a | Emanuela Greco^a |
Antaryami Barikchandra^b | Andrea Sanchini^c

^a Tecnimont SpA,
Via Gaetano de Castillia, 6A, 20124 Milano

^b Tecnimont Private Limited, 504 Link Rd,
Tecnimont House, Chincoli,
400064 Mumbai

^c Freelance, 40137 Bologna

* Corresponding author:
g.squadrone@tecnimont.it

Ricevuto: 12/3/2024

Accettato: 17/5/2024

DOI: 10.3280/ria1-2024oa17462

ISSN: 2385-2615

Industrial plant noise control design is currently supported by acoustic modelling. The process of fine-tuning this modelling allows for a progressive check of the overall noise control design plan, from design stage, when acoustic data declared or guaranteed by equipment manufacturer have been acquired and noise reduction systems have been planned, to as built situation, when the plant is in operation. Like for other engineering sectors, modelling of outdoor sound field of industrial plants covers the whole project: at the beginning to set up the environmental impact assessment, during the design to follow the suitability of the supplies and plan mitigation systems, after the plant startup to make available an actual tool useful for controlling the equipment aging, for planning future refurbishments or for the design of further similar plants. In detail, after the setup of a sound sources list, used to obtain a preliminary noise model, the execution of field noise measurements, representing the actual situation, gives additional information to achieve the final sound sources balancing and, as final step, the development of the calculated in-plant noise map matching with the measured one.

Keywords: industrial noise, sound sources modelling, sound source measurements, noise control design, measured versus modelled data fitting, auxiliary boiler noise

Confronto tra modelli acustici e sorgenti di rumore misurate in impianti industriali complessi – Unità di produzione ammoniacca

La progettazione del controllo del rumore degli impianti industriali è attualmente supportata dalla modellazione acustica. Il processo di messa a punto di questa modellazione consente una verifica progressiva del piano di progettazione del controllo del rumore complessivo, dalla fase di progettazione, quando sono stati acquisiti i dati acustici dichiarati o garantiti dal costruttore dell'apparecchiatura e sono stati progettati i sistemi di riduzione del rumore, allo stato di fatto, quando l'impianto è in esercizio. Come per altri settori dell'ingegneria, la modellazione del campo sonoro esterno degli impianti industriali copre l'intero progetto: all'inizio per impostare la valutazione di impatto ambientale, durante la progettazione per seguire l'idoneità delle forniture e pianificare i sistemi di mitigazione, dopo l'avviamento dell'impianto per mettere a disposizione un vero e proprio strumento utile al controllo dell'invecchiamento delle apparecchiature, per la pianificazione di future ristrutturazioni o per la progettazione di ulteriori impianti simili. In dettaglio, dopo la messa a punto di un elenco di sorgenti sonore, utilizzato per ottenere un modello preliminare del rumore, l'esecuzione di misure di rumore di campo, rappresentative della situazione reale, fornisce ulteriori informazioni per ottenere il bilanciamento finale delle sorgenti sonore e, come passo finale, lo sviluppo della mappa di rumore calcolata all'interno dell'impianto che corrisponde a quella misurata.

Parole chiave: rumore industriale, modellazione di sorgenti sonore, misura di sorgenti sonore, progettazione del controllo del rumore, adattamento dei dati misurati e modellati, rumore della caldaia ausiliaria

1 | Introduction

Noise control design of industrial plants should be carried out according to the recommendations given by international standard ISO 15664 [1], which has been widely applied by us for many years with satisfactory results.

The basic procedure includes an assessment stage, then the noise control design phase and a final verification on

field, after the plant startup. In detail, during the assessment, the so-called noise allocation study, the expected sound power levels of noise sources are defined, based on previous experiences, internal databases, vendor data or calculation formulas from bibliography [2-4], in absence of the previous ones. In this stage, the compliance with required noise limits is verified and first mitigation measured are individuated, if necessary. Following the noise allocation study, the actual

noise control planning is carried out, by means of detail engineering design of measures to be implemented to satisfy the noise requirements, both in the plant area, for hearing protection purposes, and in the environment. In this phase, it is paramount the strict cooperation with equipment manufacturers and the follow up of their supplies. Subsequently, the industrial plant construction, pre-commissioning and commissioning phases take place [5]. Finally, the new erected industrial plant is put in operation and performance tests are carried out to check the compliance with all the guaranteed parameters. Noise tests are often among the latter, and remedial actions are prescribed if some fails. In this paper it is described the software acoustic modelling of an industrial ammonia plant both at the end of the noise control design and after the measurement tests in field. The outcomes of the final noise survey are useful for two reasons: on the one hand they may be kept by end user as a software copy of its own plant on the other they will be used for the design of future similar industrial plants.

Within the frame of this activity, the emission of individual sound sources has been estimated from a measurement dataset collected in the vicinity of a group of them by applying the Least Square method. This procedure, applicable when the number of measurement points is equal or higher than the number of unknown sound sources, has been implemented in commercial software SoundPLAN®, since version 7.4 issued in 2015 [6]. On the purpose, it is also investigated the possibility to determine the frequency band acoustic emission of single sources, part of an industrial auxiliary boiler packaged supply, from measured data around it, by means of such SoundPLAN® tool.

The software acoustic modelling of the whole ammonia plant and the auxiliary boiler package serving it, including the following activities for the best fitting with the actual sound levels distribution in field, is here reported. In section 2 | the work procedure is depicted, including theoretical basis, a description of the analysed objects, the setup of the preliminary acoustical models, the noise measurements and the subsequent adjustment to get the as built acoustical models. Then, section 3 | provides the outcomes of present study and section 4 | shows the related remarks and discussions.

2 | Materials and methods

2.1 | Background

Software 3D modelling is widely employed in scientific fields, from medical to architecture. As regards the outdoor noise propagation from open air industrial plants, computer models have been developed since second half of last century, for example by CONCAWE [7] and Marsh [8], then Tonin [9] published one of the first software available on the market; some more detail on propagation models and software are in Bérengier [10] et al. and So-

naviya and Tandel [11]. Nowadays, both commercial (e.g. CadnaA, IMMI, Olive Tree Lab Terrain, SoundPLAN), and open-source (e.g. i-Simpa, dBmap, code_Tympan) noise modelling software are available, and they are used to predict the outdoor acoustic field and to select design changes to comply with requirements.

When defining such a 3D acoustic model, inverse methods such as Least Squares can be applied to determine the sound power levels of a subset of sound sources of the entire industrial plant, using noise measurements.

Least Squares method is a standard approach to approximately solve equations systems in which there are more equations than unknowns by minimizing the sum of the squared residuals in the results of each equation. This method is widely used for data fitting problems allowing to apply regression analysis to balance as much as possible the data sets. Referred examples of sound power level determination from measured sound pressure levels are the technique described by Lu and Hong [12], then applied by Chandha in workshops [13], both directed to investigate workplaces where many noise sources are operating; for completeness, application of inverse methods to obtain the acoustic power of noise sources in factories are the works published by Luzzato and Lecointre [14], Guasch et al. [15] and Cirac et al. [16].

Once implemented, SoundPLAN® tool to calculate the sound power level of unknown sources from measured data has been first tested by software developers and distributors on individual running equipment, subsequently endorsed by software's users, as no issues have been recorded yet.

2.2 | The ammonia plant under investigation

The industrial plant under investigation is a 2200 MTPD (metric tonnes per day) ammonia unit that has been in operation since 2016 and a 3D model view is shown in Fig. 1. The plant covers an area of 220 m by 120 m and the main noise sources are 4 huge compressors, one bull-gear type inside a noise hood and 3 centrifugal ones with acoustic insulation, driven by steam turbines with acoustic insulation (2 of them about 20 MW and the other 6 and 2 MW) with annexed piping systems (about 20" to 36" nominal diameter), steam condensers and lubrication oil units. The compressors are located below a metal sheet shelter with side walls extended from the roof up to 12 m above ground, to allow the equipment and underlying piping system to run out of the area. Other significant noise sources are the steam reformer, a large furnace of 71 GCal/h capacity with burners on top, including a 750 kW forced draft fan, for air combustion supply, and a 1.4 MW induced draft fan, to extract exhaust gases and discharge them to stack, both with acoustic insulation and driven by either steam turbine with acoustic insulation or electric motor.

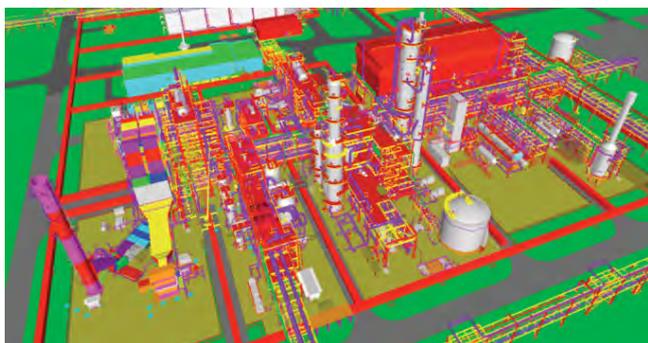


Fig. 1 – 3D model view of the ammonia plant. From left to right, there are the reformer package with its stack at the leftmost corner, the large pumps area in the middle and the compressor house behind the plant area on the right

Vista dal modello 3D dell'impianto ammoniacca. Da sinistra a destra, ci sono il gruppo del reformer con il suo camino nell'angolo a sinistra, l'area delle pompe grandi al centro e la sala compressori dietro l'area d'impianto a destra

To complete the overview of main sound sources of the ammonia plant, there are 5 pumps with acoustic blanket driven by either steam turbine with acoustic insulation or electric motors above 1 MW. In terms of sound power level, the size of above-described sources running at full load is around 115 dBA for each compressor, 110 dBA for the reformer including fans and 105 dBA for each large pump.

Along with the ammonia plant, also an auxiliary boiler packaged unit running at full load has been investigated. The auxiliary boiler has a capacity of 100 t/h steam production and the envelope dimensions are approximately 14 m by 18 m, and 8 m height, with a 25 m height stack on west side of the package footprint, as shown in Fig. 2 3D views.

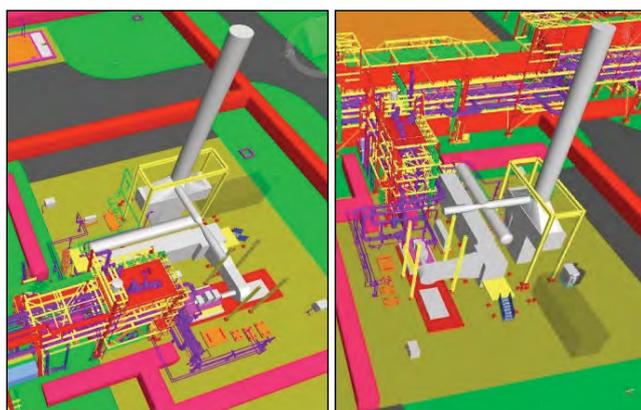


Fig. 2 – 3D model views of the auxiliary boiler package
Viste dal modello 3D del package caldaia ausiliaria

In detail, the main components of the auxiliary boiler package are a forced draft fan of 670 kW, 1780 RPM, with casing acoustic insulation, its outdoor air inlet, a natural draft burner with annexed combustion chamber, a superheater, an economizer and a steam drum, as shown in Fig. 3. The body and the outlet of flue gas stack are not considered as noise sources since the sound waves have already lost their energy

passing through the previous equipment, besides they are located at higher elevation than the measurements and the calculation points.

- Auxiliary boiler 100 t/h steam capacity
- Envelope dimensions 14m by 18m, 8m height, with 25m height stack
- Steam drum
- Economizer
- Combustion chamber with NG burner
- Forced draft fan for combustion air 670kW, 1780RPM, 6 blades

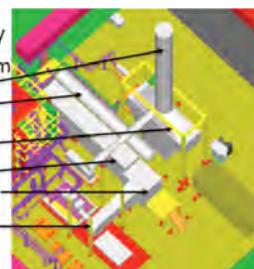


Fig. 3 – Auxiliary boiler package components
Componenti del package caldaia ausiliaria

For purely information purposes, Fig. 4 shows an overall satellite view of the ammonia plant and auxiliary boiler package under study. The auxiliary boiler package is part of the associated utilities of the ammonia plant, which includes, apart from two auxiliary boilers, also a cooling tower system, an air production unit and other facilities.



Fig. 4 – Satellite view showing the location of the ammonia plant and the auxiliary boiler package, as part of the utilities
Vista satellitare che mostra l'ubicazione dell'impianto ammoniacca e del package caldaia ausiliaria, nell'ambito delle utenze

2.3 | Sound sources emission and acoustic model defined during plant design

The design of noise control measures in industrial open plants is carried out by determining the noise limits for the environment and the work area to comply with, then by issuing a project specification that establishes the overall plant and the sources sound emissions that are allowed. The following step is the preparation of a list of plant noise sources, i.e. equipment, machinery, atmospheric discharges, etc. in which all items are described and, mainly, coded with a common tag valid for the whole project, so that all relevant information can be uniquely recovered from the (huge) de-

sign documentation. Such list, completed with the individual equipment items sound power level derived at first from previous experiences, internal databases or literature, represents the noise allocation, the core of the whole noise control design. The noise allocation table is not here reported, but an example with some typical record for the ammonia plant project is here below presented and analysed in Tab. 1:

Tab. 1 – Example of some entries of the noise allocation table
Esempio di alcune voci della tabella di assegnazione del rumore

Item Tag	Description	Power [kW]	Lw [dBA]
101-IDF	Induced Draft Fan	1.400	107
101-IDF-M	Motor for 101-IDF	1.400	103
104-HPBFP	HP Boiler Feed Pump	2.500	107
*****	*****	*****	***

The noise allocation also contains information regarding the planned noise control measures to be required to equipment supplier, like noise hoods, or to be installed during the plant construction, like piping sound insulations. During the engineering development, the noise allocation is progressively updated following the design modifications and the information received from suppliers; at the same time, the acoustic data inputted into the acoustic model are updated accordingly.

At the end of the plant design phase, when noise data from equipment manufacturers or suppliers were available, the list of predicted sound sources was updated with more reliable sound emission values to feed into the acoustic software for the calculation of the noise maps.

The sound power levels of the 54 noise sources predicted in this stage are shown in Fig. 25 chart, para 4.1 |.

The acoustic model, developed with the commercial software SoundPLAN®, is shown in Fig. 17, under para. 3.5 |. All sound sources have been assumed omni-directional and directivity effects, where significant, have been simulated with the insertion of screening walls.

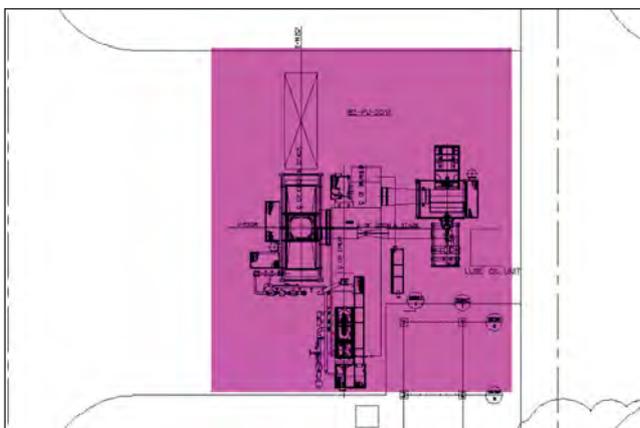


Fig. 5 – Auxiliary boiler package acoustic model at design stage; area source with a predicted sound power level (Lw) of 105 dBA
Modello acustico del package caldaia ausiliaria in fase progettuale; sorgente areale con livello di potenza sonora (Lw) stimato di 105 dBA

Regarding the auxiliary boiler package, during the design stage no information about the noise emission have been received from supplier, therefore it has been kept the allocated sound power level of 105 dBA, derived from literature [4] and based on boiler capacity and it has been modelled with an area source 25 m by 29 m, enclosing the entire package, at 2.5 m elevation above ground as shown in Fig. 5.

2.4 | Sound levels field measurements during plant operation

The sound levels collected during the survey have been measured at 1.5 m elevation and close to all noise sources with the purpose to define their emission in normal operating conditions. In addition, noise measurements around the whole ammonia plant have been carried out at 4 m elevation, to calculate the overall sound power level by means ISO 8297 standard [17].

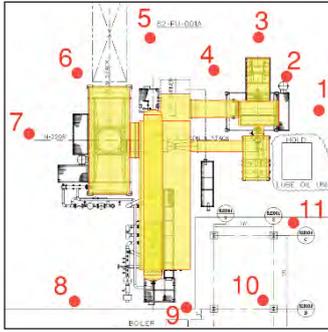
The selected measurement points are shown in Fig. 6, where the point numbers with 3 digits are relevant to microphone locations near the sources and within the plant area in which first number is the plant unit code, while point numbers with 4 digits are the ones around the whole ammonia plant. In total, 160 measurements have been carried out for equipment sound sources fine-tuning purposes and 34 for the determination of the overall ammonia plant sound power level with ISO 8297, with linear time averaging and a duration of 60 s, until the sound level steadiness.



Fig. 6 – Ammonia plant measurement points
Punti di misura dell'impianto ammoniac

During the noise survey, an attempt was made to collect more reliable data for following analyses, however, some noisy steam discharges were unavoidable, increasing the detected sound level detected at some measurement positions. The effects of this disorder are analysed and discussed below, in para. 4.1.

For the auxiliary boiler package, only measurements to apply standard ISO 8297 was carried out. The set of measuring points along a contour path enclosing the group of sound sources of the auxiliary boiler package is shown in Fig. 7.



**Fig. 7 – Auxiliary boiler package measurement points.
Equipment casings are highlighted
Punti di misura del package caldaia ausiliaria.
Sono evidenziati gli involucri delle apparecchiature**

2.5 | Determination of the ammonia plant sound power level by means of ISO 8297 formula

During the noise survey a measurement session was dedicated to collect the octave band data to be used for the determination of overall ammonia plant sound power level according to standard ISO 8297, to subsequently compare it with the analytical results obtained by combining the sound power level of the individual sources. It is worth to remind that ISO 8297 formula may be applied for many different purposes, including the check of the compliance with environmental noise requirements of entire industrial complex [18]. The formula, formerly proposed by Stüber, is shown in Eq. (1):

$$L_W = L_p + 10 \log(2S_m + hl) - \log\left(\frac{\bar{d}}{4\sqrt{S_p}}\right) + 0.5\alpha\sqrt{S_m} \quad (1)$$

where:

- L_W is the total sound power level of enclosed sources [dB],
- L_p is the energetic average sound pressure level along the measurement contour [dB],
- S_m is the area delimited by measurement points [m²],
- h is the receiver height above the ground [m],
- l is the contour perimeter [m],
- \bar{d} is the average measurement distance from sources [m],
- S_p is the multisource plant area [m²],
- α is the air absorption coefficient [-].

An analogous noise measurement session has been carried out for the calculation of the auxiliary boiler package sound power level with standard ISO 8297.

2.6 | Ammonia plant sound sources adjustment after measurements

The fine-tuning of the sound power level of sources modelled at the end of the plant design stage was possible as the set of measurement points selected was accurate enough to allow the appropriate adjustments. For example, for each equipment train consisting of a rotating machine and a driver,

sound measurements were taken at two or more locations, depending on the size and the variability of the noise emission around it.

The process of sound sources fine tuning has been carried out in different stages, concerning isolated sound sources first, then analysing groups of sound sources and finally the largest items.

The adjustments in the acoustic model have concerned not only the sound sources, in terms of emission and location, but also the components affecting the sound propagation, like screening elements and significant equipment casings or ducts. The piping systems, typical in industrial installations, have not been included in the modelling because not much dense up to 6 metres above ground level and most sound sources are below such elevation, therefore the measurements at 1.5 metres elevation were not influenced by the miscellaneous volume acoustic absorption mentioned in Annex A of ISO 9613-2 [19].

The analyses to adjust the elements in the acoustic model was carried out on the measuring point and not on the grid noise map.

Due to the large number of sound sources, i.e. the independent variables, and of the measured data, the progressive tuning of the sound power levels and other elements in the acoustic model was sequentially performed in small portions of the plant area, then combined.

At first, the acoustic model has been completely revised by including shielding equipment casings and ducts, modelled as volumes, and the compressor shelter which was not present in the one set-up during the design stage. Then, by means of a deep comparison of the sound levels measured versus calculated ones, isolated sound sources have been adjusted or added for each separate ammonia plant area, namely “purification”, “desulfuration” and “methanation”, focusing first in measuring point far from their boundary, to avoid the noise contribution from the sources out of the areas under investigation. Subsequently, the balanced tuning of the noise sources superimposed in the adjacent zone of the three mentioned plant areas has been extracted. So far, the adjustment process was rather simple, as the sound sources were spread, and no shielding effects have been observed. But for the remaining two plan areas, the “reformer” and the “compressors” the situation was more complex, due to the presence of many acoustic components heavily modifying the sound propagation, like large equipment casing, concrete slabs bearing heavy and noisy compressors along with the compressor shelter, responsible of a significant reverberant field, even though opened in its lower part.

In detail, for the “reformer” area, the most tricky zone was the one where the forced and induced draft fans with ancillary equipment are located, in which fans and driver cases, ducting and the stack (see left-bottom part of Fig. 17, para. 3.5 |, and Fig. 1) generate an intricate sound level field. Here, the simple adjustment of the sound power level of sources without introducing the screening effect of the equipment was not satisfactory. The sound power level bal-

ance of concerned sources has then been carried out in two steps, by including either shielding volumes or screens to account for the equipment casings and the best fitting has been obtained by using the screens. A further attempted method to determine the sound power level of the sources grouped in the “reformer” area, without progressively calibrating the emission levels one by one, was performed trying to apply the square matrix inversion, but the essayed combinations of source/receivers have always led to non-converging results, therefore this path has been abandoned, then the results previously obtained with the screens modelling and manual adjustments have been kept.

In a subsequent step, another study has been conducted on the forced and induced draft fan systems of “reformer” area by applying the software tool already applied for the auxiliary boiler package (see para. 2.7), to determine the source sound power level from measured sound level in adjacent points. For this purpose, two main configurations have been tested, with and without the screening effect of fans and motors casings; both were satisfactory, but the one with the acoustic screens looked to be more consistent with the measured data in field, therefore has been retained. The equipment layout inputted in the acoustic model is shown in Fig. 8.

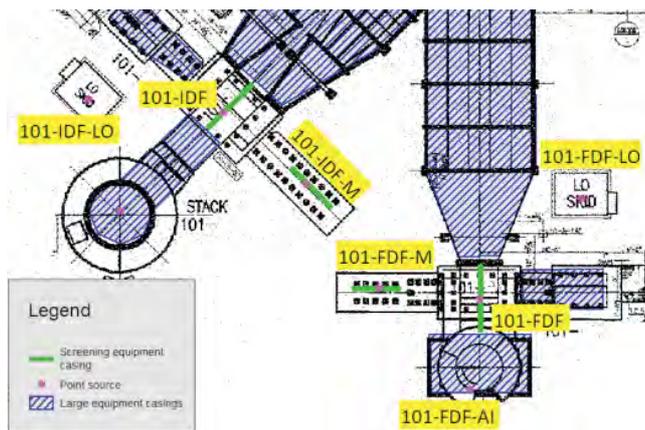


Fig. 8 – Modelled sound sources in the “reformer” area of ammonia plant for subsequent application of the SoundPLAN® tool

Sorgenti sonore modellate nell’area “reformer” dell’impianto ammoniacca la successiva applicazione della funzione di SoundPLAN®

The “reformer” area sound sources modelled for the calculation are reported in Tab. 2.

**Tab. 2 – Ammonia plant “reformer” area noise sources
Sorgenti di rumore dell’area “reformer” dell’impianto ammoniacca**

Name	Description	Type
101-IDF	Induced Draft Fan	Point
101-FDF	Forced Draft Fan	Point
101-FDF-AI	Forced Draft Fan Air Inlet	Point
101-FDF-LO	Forced Draft Fan Lube Oil Skid	Point
101-FDF-M	Forced Draft Fan Motor	Point
101-IDF-LO	Induced Draft Fan Lube Oil Skid	Point
101-IDF-M	Induced Draft Fan Motor	Point

For the “compressor” area, large sound sources are located at three different levels; at 15 metres above ground there are four compressor trains driven by steam turbines, at 9 metres above ground the steam turbine condensers, at ground level the compressors lubrication units and, below the compressors up to the ground floor, the relevant connected piping system. In this area, apart from the screens simulating the compressor and turbine casings, to account for their reciprocal screening effect, in the acoustic model have been inputted horizontal screens, representing the concrete slabs bearing the heavy equipment, and the machinery shelter, as a horizontal screen (the roof) at 29 metres above ground, with side panelling up to 12 metres above ground. Since the measuring points in this area are located both at ground floor and at compressors’ basements level, the adjustment of sound pressure levels was carried out at upper level first, where it was confused by the superimposed reverberant field caused by the shelter in metal sheet. At the end of the “compressor” area sources sound power levels adjustment, the nearby sources of other adjacent areas have been reviewed and, where necessary further corrected to make the calculated sound levels matching with the measured ones.

For the definition of the sound power level of the single components of the auxiliary boiler package, a further method has been applied, as described in next para. 2.7.

2.7 | Determination of single source sound power levels of the auxiliary boiler package components

During the design stage the auxiliary boiler package was considered as a complete sound source, due to lack of information from the equipment supplier, to simplify the whole industrial plant modelling process too. After the noise survey in field, it was possible to accurately define the single noisy components of the package and, to calculate the sound power level of them, the implemented tool exploiting the Least Square Method included in commercial software SoundPLAN® has been used.

For the application of the tool, an acoustic modelling of the package elements has been carried out first, by means of point sources for relatively small items, line sources for long items, area sources for large items and vertical barriers to account for the screening effect by large equipment casings, to avoid unrealistic sound contribution on calculation points. After trials, the most approaching set of sources and screens has been found. Fig. 9 shows the final acoustic model top view.

The selection of noise sources to be modelled was based on experiences from present and previous field investigations and further adjustments have been applied for best fitting of results. Tab. 3 lists the modelled noise sources in detail.

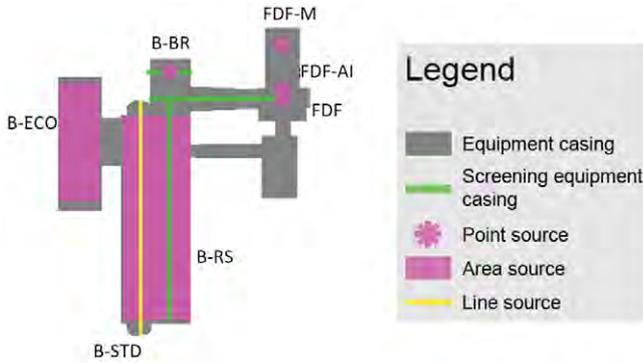


Fig. 9 – Auxiliary boiler package components modelled in the acoustic software

Componenti del package caldaia ausiliaria modellati nel software acustico

Tab. 3 – Auxiliary boiler package noise sources
Sorgenti di rumore del package caldaia ausiliaria

Name	Description	Type
B-RS	Boiler Radiant Section	Area
B-BR	Boiler natural draft burner	Point
B-STD	Boiler steam drum	Line
B-ECO	Boiler economizer	Area
FDF-AI	Forced draft fan air inlet	Point
FDF	Forced draft fan	Point
FDF-M	Forced draft fan motor	Point

Subsequently, the octave band noise measured values have been inputted as known data at receiver points of Fig. 7, then the calculation of source emission from measurement points function was activated and the sound power levels of the set of modelled noise sources has been obtained as result.

3 | Results

The application of the procedures described in previous section on input data has led to the outcomes presented in the following paragraphs.

3.1 | Predicted sound level distribution during plant design

The set of sound power levels of the 54 sources allocated during the design stage (see Fig. 25, para 4.1) has been used for the calculation of the plant noise map shown in Fig. 10.

An enlargement of the induced and draft fans “reformer” area of the ammonia plant predicted noise map is reported in Fig. 11.

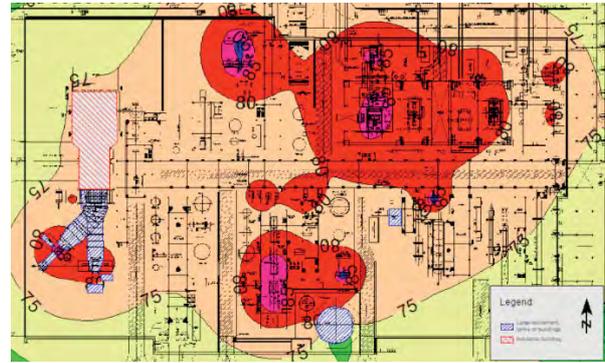


Fig. 10 – Ammonia plant predicted noise map
Mappa del rumore previsionale dell’impianto ammoniacca

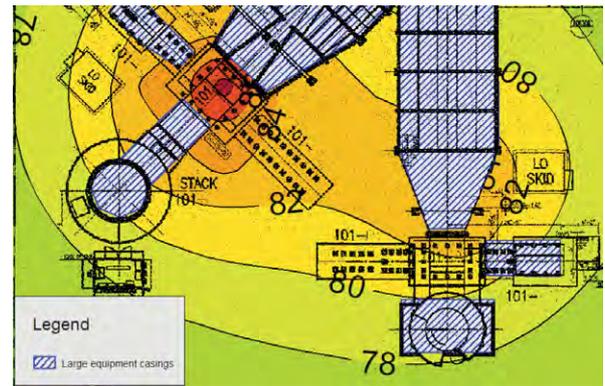


Fig. 11 – Enlargement of the ammonia plant predicted noise map on the induced and draft fans of “reformer” area
Ingrandimento della mappa del rumore previsionale dell’impianto ammoniacca sui ventilatori a tiraggio indotto e forzato dell’area “reformer”

After the noise survey with ammonia plant in operation, the same measurement points (see Fig. 6) have been inputted in the acoustic software for the calculation of single point sound levels to be compared with both the measured ones and those recalculated with the adjusted sound sources.

The graph of the assessed sound levels at design stage is shown in Fig. 28 in para. 4.2.

As regards the auxiliary boiler package, the sound power level of the enveloping area source allocated during the design stage (see Fig. 5) has been used for the calculation of the noise map shown in Fig. 12.

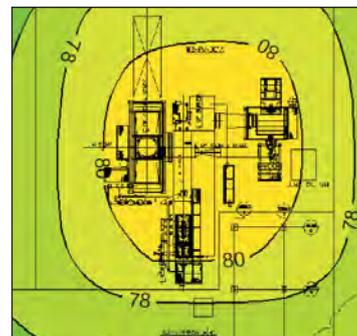


Fig. 12 – Auxiliary boiler package predicted noise map
Mappa del rumore previsionale del package caldaia ausiliaria

Another calculation has been carried out to get the assessed sound levels at the measurement points where the noise data have been collected during the unit in operation (see Fig. 7); the result is shown in the graph of Fig. 13. Discussion on this calculation is given in para. 4.3.

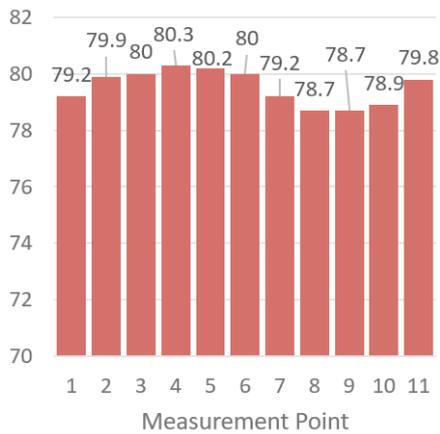


Fig. 13 – Assessed sound levels in dBA during design phase at measurement points around the auxiliary boiler
Livelli sonori in dBA valutati durante la fase di progettazione nei punti di misura attorno la caldaia ausiliaria

3.2 | Sound levels measured during plant operation

The complete set of measured sound levels on the ammonia plant is shown in the chart of Fig. 28 in para. 4.2.

The collected noise data were then inputted into noise modelling software, which interpolated the values and obtained the corresponding contour lines.

The graphic result of the procedure is reported in Fig. 14.

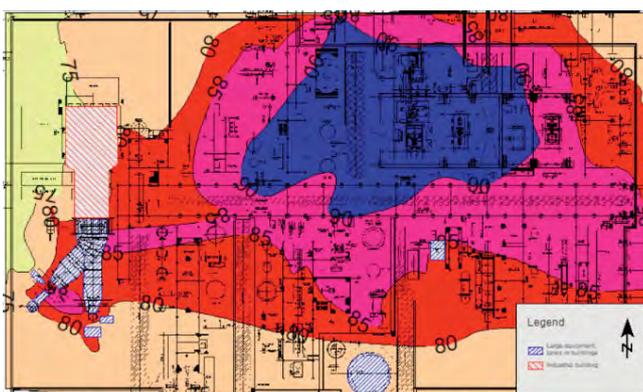


Fig. 14 – Ammonia plant measured noise map
Mappa del rumore misurato dell'impianto ammoniacca

The enlargement of the induced and draft fans “reformer” area of the ammonia plant measured noise map is reported in Fig. 15.



Fig. 15 – Enlargement of the ammonia plant measured noise map on the induced and draft fans of “reformer” area
Ingrandimento della mappa del rumore misurato dell'impianto ammoniacca sui ventilatori a tiraggio indotto e forzato dell'area “reformer”

The sound levels measured around the auxiliary boiler package are shown in Fig. 16.

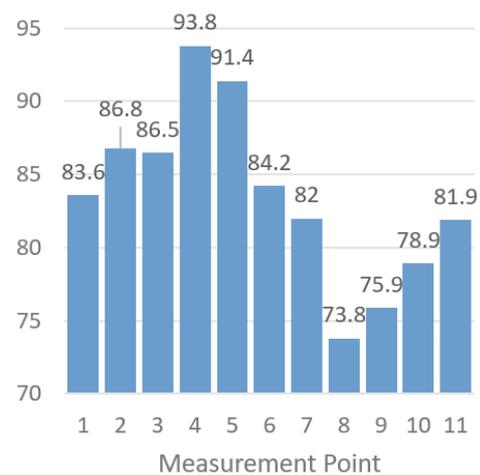


Fig. 16 – Sound levels in dBA measured around the auxiliary boiler
Livelli sonori in dBA misurati attorno la caldaia ausiliaria

The noise contour map obtained by inputting the collected noise data into the noise modelling software, is shown in Fig. 34 (a) under para. 4.4.

3.3 | Ammonia plant sound power level obtained with ISO 8297

For the determination of the complete ammonia plant sound power level, the formula given in ISO 8297 has been used.

The application of formula (1) is shown in Tab. 4, where overall and octave band measured L_p and calculated L_w are reported, for $S_m = 23500 \text{ m}^2$, $h = 4 \text{ m}$, $l = 630 \text{ m}$, $d = 12.4 \text{ m}$, $S_p = 17000 \text{ m}^2$ and the air absorption, resulting in 1 dB on the overall value.

Tab. 4 – Ammonia plant octave band sound power level in dB calculated with ISO 8297 formula

Livello di potenza sonora in bande di ottava in dB dell'impianto ammoniacca calcolato con la formula della ISO 8297

	OVR (A)	63 Hz	125 Hz	250 Hz	500 Hz	1k Hz	2k Hz	4k Hz	8k Hz
L_p	82	78	76	77	73	75	77	75	74
L_w	128	122	102	121	118	120	122	121	121

The overall ammonia plant sound power level obtained by means the application of ISO 8297 is discussed further in below para. 4.1.

3.4 | Auxiliary boiler sound power level obtained with ISO 8297

The result of the calculation carried out with formula (1) for the auxiliary boiler package is reported in Tab. 5, in which overall and octave band measured L_p and calculated L_w are presented for $S_m = 410 \text{ m}^2$, $h = 1.5 \text{ m}$, $l = 78 \text{ m}$, $d = 3.9 \text{ m}$, $S_p = 144 \text{ m}^2$ the contribution for air absorption is negligible, due to the short distances.

Tab. 5 – Auxiliary boiler octave band sound power level in dB calculated with ISO 8297 formula.

Livello di potenza sonora in bande di ottava in dB della caldaia ausiliaria calcolato con la formula della ISO 8297

	OVR (A)	63 Hz	125 Hz	250 Hz	500 Hz	1k Hz	2k Hz	4k Hz	8k Hz
L_p	87	89	82	84	77	73	78	84	76
L_w	115	116	109	111	104	100	106	112	103

The results of the average sound pressure level and the sound power level obtained for the auxiliary boiler package by applying the ISO 8297 formula are discussed also in below para. 4.3.

3.5 | Adjusted ammonia plant source sound power levels, recalculated sound levels at measurement points and on a noise map

The sound power levels of 58 as built noise sources of the ammonia plant (4 were added to improve the accuracy of the updated acoustic model) are shown in Fig. 25, para 4.1 |.

Specifically, with reference to plant description in para. 2.2 |, the added sources were:

- The inlet of the forced draft fan which supplies combustion air to the steam reformer, at 8 m elevation.
- A noisy flexible expansion joint found between the air supply duct and the preheater of the steam reformer at 4 m elevation.
- A lubrication oil pump associated to the 2.5 MW water pump at 1.5 m elevation.

- An unexpectedly opened re-circulation valve connected to the main circuit of a 2.5 MW amine with additives solution pump out of service at 1 m elevation.

The additional sources were included for different reasons; in the cases of the inlet air opening, the joint and the lubrication unit pump to compensate the previous acoustic model with missing noise information from vendors, and, in the case of the opened valve, for unexpected operation condition.

Following to the noise source adjustment activity, the acoustic model has been revised by changing the sources sound power level and adding the 4 additional sources as well, which location in the actual as built ammonia plant is highlighted in Fig. 17.



Fig. 17 – Ammonia plant as built acoustic model: sources at design stage are fuchsia, 4 added sources are marked in green
Modello acustico dell'impianto ammoniacca nello stato di fatto; le sorgenti in fase progettuale sono fucsia, le 4 sorgenti aggiunte sono indicate in verde

The sound levels resulting from the calculation in the measurement points (see Fig. 6) by using the adjusted sound power levels for the updated noise sources in the acoustic model, are represented in the graph in Fig. 28 in para. 4.2 |.

The noise map calculated with the adjusted set of noise sources is shown in Fig. 18.

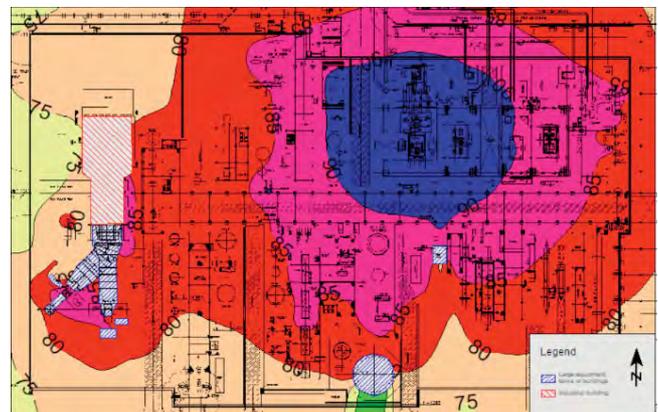


Fig. 18 – Ammonia plant as built calculated noise map
Mappa del rumore calcolata dell'impianto ammoniacca nello stato di fatto

The enlargement of the induced and draft fans “reformer” area of the ammonia plant noise map calculated with the adjusted set of noise sources is reported in Fig. 19.

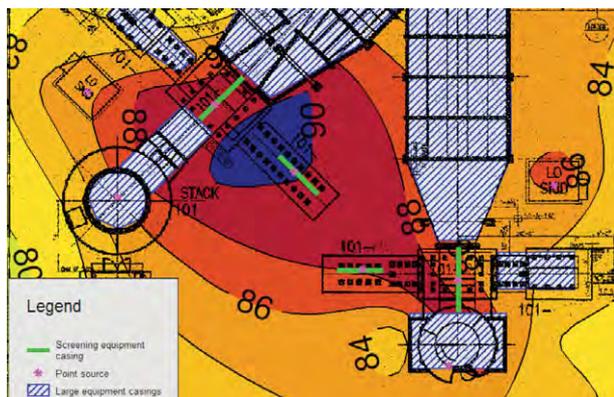


Fig. 19 – Enlargement of the ammonia plant as built calculated noise map on the induced and draft fans of “reformer” area
Ingrandimento della mappa del rumore calcolata dell’impianto ammoniacca nello stato di fatto sui ventilatori a tiraggio indotto e forzato dell’area “reformer”

The post-processing analysis, conducted on the forced and induced draft fan systems of “reformer” area with the SoundPLAN® tool to retrieve the source sound power level from measured data, has given the results shown in Tab. 6.

Tab. 6 – Ammonia plant “reformer” area sources sound power levels in dBA obtained with SoundPLAN® tool

Livelli di potenza sonora in dBA delle sorgenti dell’area “reformer” dell’impianto ammoniacca ottenuti con la funzione di SoundPLAN®

Name	Description	Lw
101-IDF	Induced Draft Fan	105
101-FDF	Forced Draft Fan	107
101-FDF-AI	Forced Draft Fan Air Inlet	100
101-FDF-LO	Forced Draft Fan Lube Oil Skid	91
101-FDF-M	Forced Draft Fan Motor	90
101-IDF-LO	Induced Draft Fan Lube Oil Skid	91
101-IDF-M	Induced Draft Fan Motor	108

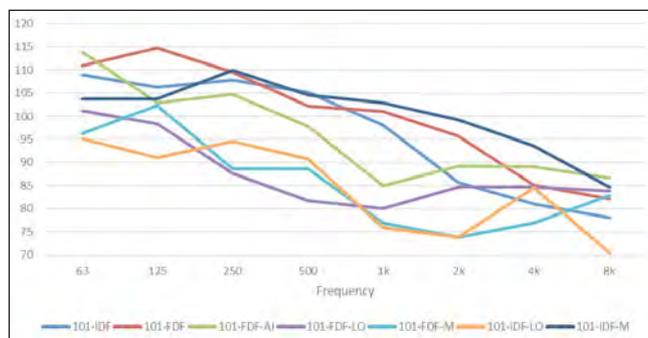


Fig. 20 – Ammonia plant “reformer” area sound power level spectra in dB of sources obtained with SoundPLAN® tool
Spettro del livello di potenza sonora in dB delle sorgenti dell’area “reformer” dell’impianto ammoniacca ottenuti con la funzione di SoundPLAN®

Since the SoundPLAN® tool applies the least square method operating on each octave band, the sound power level spectra for the ammonia plant “reformer” area sources of Fig. 20 have been found.

By inputting the noise source sound power level set of Tab. 6 in the acoustic model, the sound pressure levels calculated at measurement points shown in Fig. 21, and the relevant noise map is reported Fig. 22 have been obtained.

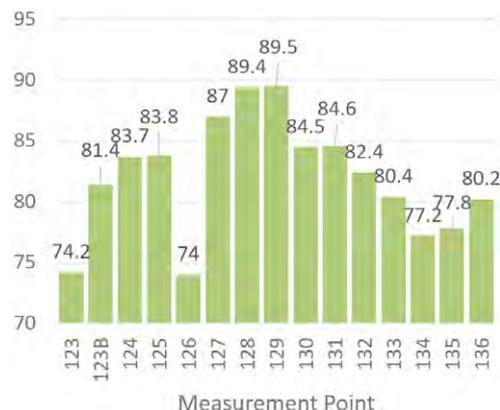


Fig. 21 – Calculated sound levels in dBA by means of the sources obtained with SoundPLAN® tool at measurement points near the induced and draft fans of “reformer” area

Livelli sonori in dBA calcolati nei punti di misura presso i ventilatori a tiraggio indotto e forzato dell’area “reformer” mediante le sorgenti ottenute con la funzione di SoundPLAN®

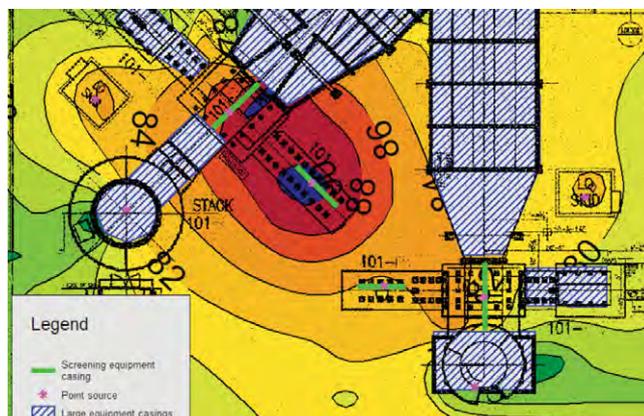


Fig. 22 – Noise map at the induced and draft fans of “reformer” area calculated with the sources obtained with SoundPLAN® tool
Mappa del rumore presso i ventilatori a tiraggio indotto e forzato dell’area “reformer” calcolata con le sorgenti ottenute con la funzione di SoundPLAN®

Auxiliary boiler package determined single source sound power levels, sound levels recalculated at measurement points and on a noise map

The resulting package component single sound power levels following the application of SoundPLAN® tool are reported in Tab. 7.

Tab. 7 – Auxiliary boiler package sources sound power levels in dBA obtained with SoundPLAN® tool

Livelli di potenza sonora in dBA delle sorgenti del package caldaia ausiliaria ottenuti con la funzione di SoundPLAN®

Name	Description	Lw
B-RS	Boiler Radiant Section	99
B-BR	Boiler natural draft burner	111
B-STD	Boiler steam drum	99
B-ECO	Boiler economizer	98
FDF-AI	Forced draft fan air inlet	105
FDF	Forced draft fan	103
FDF-M	Forced draft fan motor	95

The sound power level octave band spectra obtained with the SoundPLAN® tool on the auxiliary boiler package sources are reported on Fig. 23.

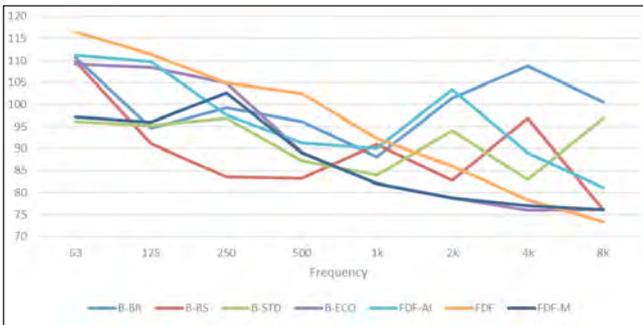


Fig. 23 – Auxiliary boiler package sound power level spectra in dB of sources obtained with SoundPLAN® tool
Spettro del livello di potenza sonora in dB delle sorgenti del package caldaia ausiliaria ottenuti con la funzione di SoundPLAN®

The total sound power level of the complete auxiliary boiler package is then obtained by adding the noise emission of noise sources listed in Tab. 7 and is reported in Tab. 8.

Tab. 8 – Auxiliary boiler octave band sound power level by adding the sources obtained with SoundPLAN® tool

Livello di potenza sonora in bande di ottava della caldaia ausiliaria ottenuta sommando le sorgenti ricavate con la funzione di SoundPLAN®

	OVR (A)	63 Hz	125 Hz	250 Hz	500 Hz	1k Hz	2k Hz	4k Hz	8k Hz
L_w	113	118	115	110	104	96	106	109	102

From the noise source set of Tab. 7, the sound pressure levels at measurement points, shown in Fig. 24, and a further noise map, reported in Fig. 34 (b) under para. 4.4 |, have been calculated.

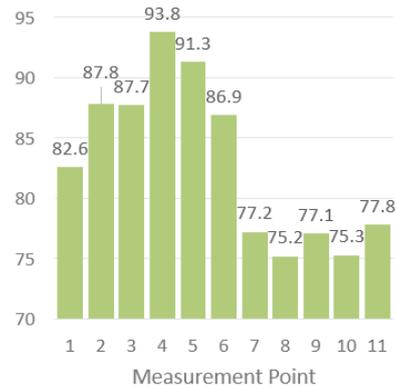


Fig. 24 – Calculated sound levels in dBA by means of the sources obtained with SoundPLAN® tool at measurement points around the auxiliary boiler

Livelli sonori in dBA calcolati nei punti di misura attorno la caldaia ausiliaria mediante le sorgenti ottenute con la funzione di SoundPLAN®

4 | Discussion

The analysis is covering the sound power level of the noise sources in the ammonia plant and the sound pressure levels predicted, measured and re-calculated with adjusted sound sources in the measurement points. Besides, for the auxiliary boiler package, comparisons between the overall sound power levels calculated with ISO 8297 formula and by adding the single sources obtained with the SoundPLAN® tool, and between the sound pressure levels measured and calculated with the single sources of above are investigated.

4.1 | Sound power levels of noise sources and of the whole ammonia plant

During the engineering phase, at the end of the noise control design, 54 sound sources were individuated, which overall logarithmic sum gave 120.5 dBA. This result, obtained by combining the sound power level declared by equipment vendors, and in line with the expected values, is useful to size the noise emission of the industrial plant, as a function of both the plant type and the production capacity.

Following the noise survey, the number of sound sources has increased to 58, as 4 new items have been added to improve the acoustic modelling within the plant area.

Besides, 22 sound sources out of the former 54 ones have been adjusted to match the sound pressure levels measured both at measurement points and in the noise map, and the overall logarithmic sum has become 129.7 dBA. The reason of such increase will be analysed further. The statistics of the adjusted sound sources is reported in Tab. 9.

The sound power level of the two sets of sound sources is shown in the chart of Fig. 25.

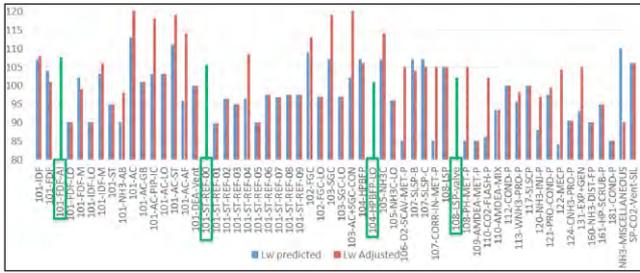


Fig. 25 – Predicted and adjusted (as built) sources sound power levels (Lw) in dBA; the 4 added sources are marked in green. The overall ammonia plant predicted Lw is 120.5 dBA and the adjusted Lw is 129.7 dBA

Livelli di potenza sonora (Lw) in dBA previsti e adattati (stato di fatto) delle sorgenti; le 4 sorgenti aggiunte sono indicate in verde. Il Lw complessivo dell'impianto ammoniacca previsto è pari a 120.5 dBA, quello adattato a 129.7 dBA

Tab. 9 – Statistics of the adjusted sound sources in the ammonia plant: high average and standard deviation due to an important design modification occurred during the plant construction to be recorded

Statistiche delle sorgenti sonore adattate nell'impianto di ammoniacca: da segnalare media e deviazione standard elevate dovute a un'importante modifica progettuale avvenuta durante la costruzione dell'impianto

Parameter	Value
Predicted number of sound sources	54
Final number of sound sources	58
Number of adjusted sound sources	22
Minimum adjustment	-3 dB
Maximum adjustment	20 dB
Average adjustment	6.8 dB
Adjustment standard deviation	7.1 dB
Mode of adjustments	-3 dB

Looking at both Fig. 25 and Tab. 9, some consideration must be done.

The number of sound sources has increased just to improve the previous acoustic model and this slight modification is compatible with the plant design process, then not to be discussed further.

Although the most recurring adjustment is -3 dB, the average adjustment is high due to a design change that took place during the plant erection, agreed with final user, but not implemented in the acoustic model, as it was finalized only for design reporting needs. This change was not to install the planned acoustic insulation on the whole piping system and the connected equipment part of the huge compressor assemblies, even though the relevant rotating machines were all soundproofed with noise hoods or acoustic insulations. As a matter of fact, the largest adjustments on the sound power levels are concentrated on the compressors area.

Besides, during the noise survey, some measuring points have been influenced by the noise of a pair of unstoppable steam jets above the compressor house, as anticipated at the end of para. 2.4 |. This effect has been counteracted, but not

eliminated, by including some “extra” noise source nearby the sound sources affected, in a way, by such steam discharges. It was not possible to clearly locate and acoustically characterise the two steam jets, for several reasons: timing of the activities, high elevation from ground, presence of numerous piping systems above the measuring points which were unevenly shielded and difficult to be modelled with the software. The steam jet noise was detected on the east and the south-east part of the ammonia plant up to the boundary.

The effect of the increased noise levels in the compressors area (area code 500) and in adjacent areas (area codes 300 and 400) due to the lack of acoustic insulation on piping and those because of the steam jets, is evidenced by the pattern of the graph in Fig. 26, where the assessed and the measured sound levels at measurement points are compared.



Fig. 26 – Discrepancies between assessed and measured sound levels in dBA at measurement points, for numbering system see para. 2.4

Differenze tra i livelli sonori in dBA valutati e misurati nei punti di misura, per il sistema di numerazione vedere par. 2.4

Nevertheless, considering that the sound level distribution in the plant area complied with the contractual requirements, despite these two unexpected noise sources being in operation, no further investigation was carried out.

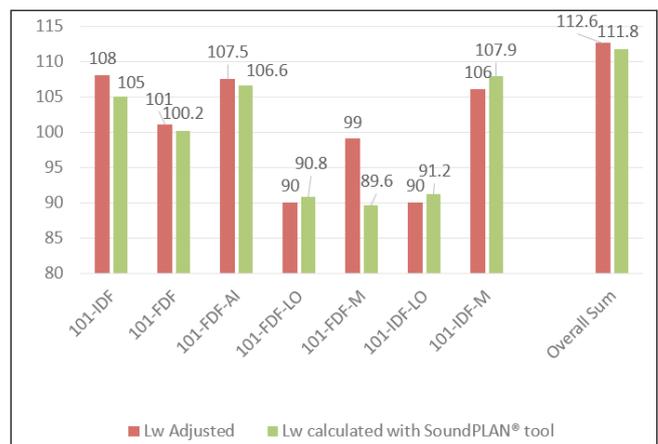


Fig. 27 – Adjusted (as built) and obtained with SoundPLAN® tool sound power levels (Lw) in dBA of the sources in the ammonia plant “reformer” area

Livelli di potenza sonora (Lw) in dBA adattati (stato di fatto) e ottenuti con la funzione di SoundPLAN® delle sorgenti nell'area “reformer” dell'impianto ammoniacca

As regards the post-processing analysis performed on the induced and draft fan systems connected to the “re-former” unit, the updated source sound power levels obtained with the SoundPLAN® tool are like those previously adjusted and assumed as actual. In fact, the comparison of the above-mentioned sound power levels reported in Fig. 27 shows interesting results.

First of all, it has to be noticed that the overall balance of the sound power level of the sources related to the induced and the draft fan systems was over adjusted to obtain the as built values. This is also highlighted by the comparison of the noise map enlargements of Fig. 15 (measured noise map) and Fig. 19 (calculated as built noise map). In particular, with reference to the sound power levels, if the concerned noise sources are classified in three ranges, i.e. high emission (105 to 108 dBA), medium emission (99 to 101 dBA) and low emission (90 to 92 dBA), following considerations can be drawn:

- the overall sum of the noise sources adjusted and calculated with the SoundPLAN® tool are similar (0.8 dB) difference;
- the high emissions of induced draft fan (101-IDF) and its motor (101-IDF-M), one overestimated and the other underestimated during adjustment phase, are now inversely balanced between them, so the use of the SoundPLAN® tool has led to a more accurate sound power levels distribution;
- the adjusted sound power levels of the forced draft fan and its air inlet seems to be in line with those obtained with the SoundPLAN® tool (less than 1 dB difference);
- following to the application of the SoundPLAN® tool, the noise emission of the forced draft fan motor turned out to be unexpectedly low, as the one evaluated during the source adjustment phase was overestimated. Consequently, the least square method has given a valuable contribution on the determination of the actual sound power level;
- the low emission of both lube oil pumps has been slightly underestimated during the source adjustment phase (about 1 dB), therefore they are aligned with those obtained with the SoundPLAN® tool, even though not affecting the overall result

In short, the post-processing application of the least squares method on the sound source group nearby the “reformer” area has confirmed in a way the global effect of the adjusted sound power levels, but changed the single components contribution.

About the ammonia plant overall sound power level, Tab. 10 shows the results of the logarithmic sum of the sound sources, both predicted and adjusted, along with the application of ISO 8297 formula.

Tab. 10 – Ammonia plant sound power level
Livello di potenza sonora dell'impianto ammoniac

Sound power level determination	Lw [dBA]
Sum of the predicted sound sources	120.5
Sum of the as built sound sources	129.7
Application of ISO 8297	128.0

Looking at Tab. 10, it is confirmed the above observation on the effect of design change not to install the sound insulation on compressors piping systems and related equipment, which leads to an increase of the as built overall sound power level by 9 dB over the predicted one.

Furthermore, there are some not quantifiable effects (caused by steam jets located above the compressor shelter roof) which should be recorded: such effects anyway appear to be but less impacting than the sound levels increase due to the missing acoustic insulation on the compressor piping systems.

Concerning the sound power level of the ammonia plant calculated with ISO 8297 formula, it is around 2 dB lower than the resulting one from the sum of the as built sound sources. This reduction is generally due to the fact that the rough sum of single noise sources gives a “size” of an industrial complex, whereas the value determined with ISO 8297 procedure, includes also the source casing reciprocal reflections, shielding, absorbing and scattering effects, combined with those owing to piping systems, structures and other equipment present in the plant area.

4.2 | Sound pressure levels at measurement point location in the ammonia plant and on its boundary

The sound pressure levels at measurement point locations, both calculated before and after the sound source adjustments and measured in field, are shown in the graph of Fig. 28 and the statistical analysis in Tab. 11.

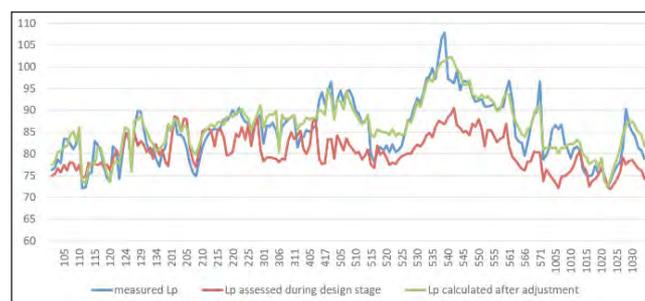


Fig. 28 – Assessed, measured and calculated with adjusted (as built) sources sound levels in dBA at measurement points, for numbering system see para. 2.4

Livelli sonori in dBA valutati, misurati e calcolati con sorgenti adattate (stato di fatto) nei punti di misura, per il sistema di numerazione vedere par. 2.4

Tab. 11 – Statistics of the differences among assessed (A), measured (M) and calculated (F) with adjusted (as built) sources sound levels (Lp) for the 194 measurement points

Statistiche delle differenze tra i livelli sonori (Lp) con sorgenti valutate (A), misurate (M) e calcolate (F) con sorgenti adattate (stato di fatto) per i 194 punti di misura

Parameter	M-A	M-F	A-F
Minimum	-6.6dB	-5.8dB	-14.4dB
Maximum	21 dB	6.6 dB	2.6 dB
Average	4.9 dB	-0.9 dB	-5.8 dB
Standard deviation	5.2 dB	2.4 dB	4 dB
Mode	4.2 dB	-1 dB	-1.9 dB

Looking at Fig. 28, by analysing the sound pressure level gaps at measurement points according to plant areas, it can be noted that for areas 100 and 200, the furthest from the compressors area (500), predicted and as built values are not much different, whereas for areas 300 and 400, close to compressors area, this difference is higher. For measurement points around the ammonia plant, "1000" series, the difference is rather high. The reason of that is the very high difference between predicted and measured sound pressure levels in area 500, compressors, for the missing soundproofing measures as described in para. 4.1 |.

The same considerations can be drawn from the overall plant data in Tab. 11 (column "M-A"), which states that, after the sound sources adjustment process, the sound level differences are reduced to less than 1 dB and the standard deviation is less than 3 dB (see column "M-F") which it was deemed a satisfactory result.

The post-processing study on the induced and draft fans systems of the "reformer" area, by means of the SoundPLAN® tool, has also prosecuted with the sound pressure levels recalculation both in the measurement points and in a noise map. Therefore, four data sets to be analysed became available: assessed during design stage, measured in field, calculated after sound sources adjustment (as built) and recalculated after the sound sources obtained following to the application of the least squares method included as the SoundPLAN® tool.

The sound pressure levels at the measurement points in the "reformer" area are summarized in Fig. 29.

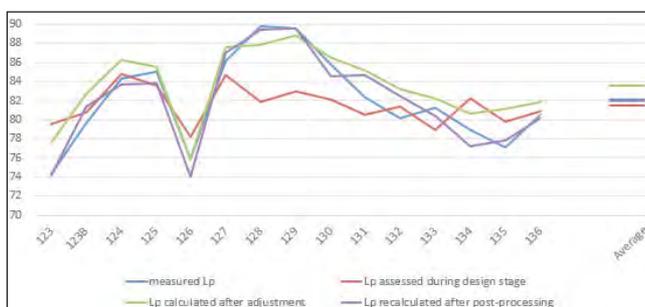


Fig. 29 – Assessed, measured and calculated with adjusted (as built) and obtained with SoundPLAN® tool sources sound levels in dBA at measurement points in "reformer" area, from 123 to 136
Livelli sonori in dBA valutati, misurati e calcolati con sorgenti adattate (stato di fatto) e ottenute con la funzione di SoundPLAN® nei punti di misura dell'area "reformer", da 123 a 136

Looking at Fig. 29 it is evident that the best fitting between measured and calculated sound levels has been obtained with the source sound power levels derived from the application of the SoundPLAN® tool in frequency bands, for which the average values are matching and the differences are always less than 2 dB, except for two measurement points, 131 and 132, where the shielding effect of the forced draft fan motor casing was rather difficult to be modelled compared with all other equipment casings nearby, see

Fig. 30 for reference. For the other two sets of calculated sound levels, one assessed during design stage and the other with adjusted sources sound power levels, they are underestimated and overestimated, respectively.

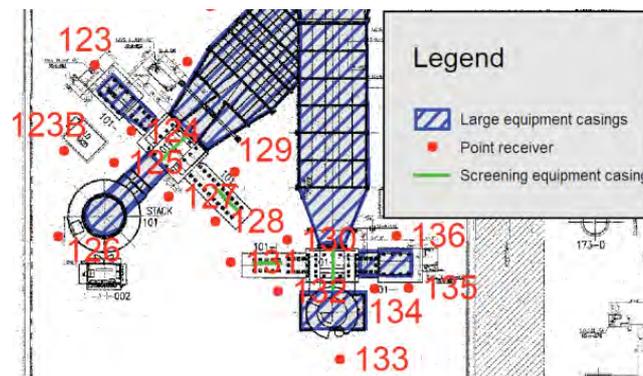


Fig. 30 – Measurement points near the induced and draft fans of ammonia plant "reformer" area
Punti di misura presso i ventilatori a tiraggio indotto e forzato dell'area "reformer" dell'impianto ammoniacca

The comparison of the noise maps in the "reformer" area here analysed, leads to analogous considerations. The noise maps shown in Fig. 11, Fig. 15, Fig. 19 and Fig. 22 are below reported in Fig. 31 for quick reference and following discussion.

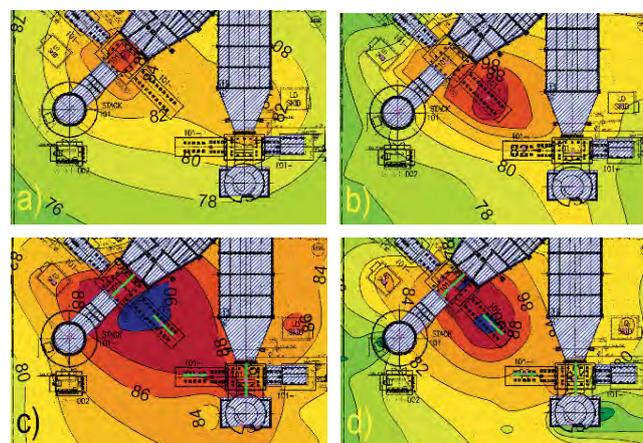


Fig. 31 – Predicted (a), measured (b), adjusted (c) and calculated with the sources obtained with SoundPLAN® tool (d) ammonia plant noise maps on the induced and draft fans of "reformer" area
Mappe del rumore previsionale (a), misurata (b), adattata (c) e calcolata con le sorgenti ottenute con la funzione di SoundPLAN® (d) dei ventilatori a tiraggio indotto e forzato dell'area "reformer"

The noise contour maps in Fig. 31 highlight what already noticed during the analysis of the sound level at discrete measurement points (see Fig. 29), both strictly related to the discussion on the sources sound power levels above reported for Fig. 27.

The assessed sound levels distribution on this area during design stage is confirmed to be underestimated, as the relevant sound power levels of noise sources were underes-

timated as well, for poor information from equipment manufacturers.

The measurements on site have shown that the induced draft fan electric motor is the noisiest source in the area, followed by its driven equipment.

The noise map calculated with the adjusted (as built) sources sound power level proved to be overestimated, due to the excessively high noise emission attributed to the induced draft fan, to balance the measured sound levels. The induced draft fan motor has been rightly considered an important noise source too, but this noise map shows the effect of the reflections because of the modelled induced draft fan casing, which has increased the sound levels. Probably a different model for such casing would mitigate in a way that discrepancy with the measured data.

Finally, the noise map calculated with the source sound power levels derived from the application of the software tool in a subsequent research step has led to a distribution of the sound levels closer to the measured ones with exceptions that can be explained as follows:

- the very high noise levels shown in the induced draft fan and related motor areas are software artifacts, since the noise map calculation is performed according to a point grid in which some of them may end very close to the modelled “point” noise source, even inside the real equipment casing;
- like for the noise map calculated with adjusted (as built) acoustic model, some calculation point may be affected by the sound screening and reflecting effects of the equipment casing, which should be better investigated and modelled in future.

In summary, the application of the least square method included in the software tool has surely improved the acoustic characterization of the sound sources in this specific plant area even though the noise survey was not specifically planned and organised for this purpose. In fact the field activities were conducted to collect comprehensive information regarding the ammonia plant sound emissions and create an as built acoustic model useful for future applications, but for the induced and draft fans on the “reformer” area, the actual configuration found on site was much complex, due to the large sound sources, ducts and other shielding and reflecting equipment that are difficult to model.

4.3 | Sound power level of the auxiliary boiler package

By comparing the values reported in Tab. 5 and Tab. 8, here summarized for convenience in the graph at Fig. 32 (a), the overall sound power level of the boiler package calculated with ISO 8297 formula is 2 dB higher than the resulting one from the sum of single components obtained with the SoundPLAN® tool, even though the difference between the associated logarithmic average sound pressure levels (the measured versus the calculated with the source sound power levels obtained with the SoundPLAN® tool ones) is 0.7 dB only (see Fig. 32 (b)).

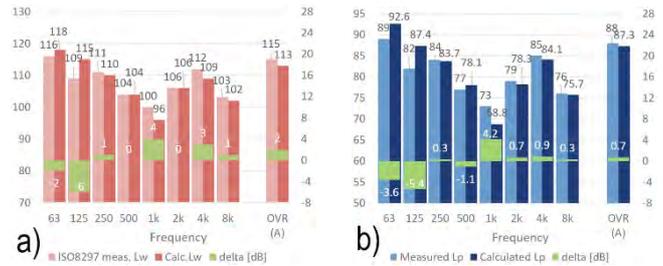


Fig. 32 – Auxiliary boiler package sound power level (a) and average sound level (b) octave band measured and calculated by means of the sources obtained with SoundPLAN® tool at measurement points

Livelli di potenza sonora (a) e livelli sonori medi (b) in bande di ottava, calcolati nei punti di misura attorno la caldaia ausiliaria mediante le sorgenti ottenute con la funzione di SoundPLAN®, del package caldaia ausiliaria

The reason of such difference is not clear but, at a glance, it appears to be related to the definition of the “measurement surface” to be used in the ISO 8297 formula. A comprehensive investigation on this point and the combination with other factors shall be analysed separately in future research developments.

4.4 | Sound pressure levels at measurement point location around the auxiliary boiler package

The analysis of the differences between the assessed sound pressure levels during the design phase and those measured during auxiliary boiler in operation was not considered because the calculations points are actually inside the modelled area source, therefore not significant. Furthermore, this assessment was conducted with an estimated sound power level not based on vendor data and far from the actual one found in field.

The comparison between the measured sound pressure levels and those modelled with the source sound power levels obtained with the SoundPLAN® tool, both assessed at measuring points (Fig. 16 and Fig. 24 combined in Fig. 33 for

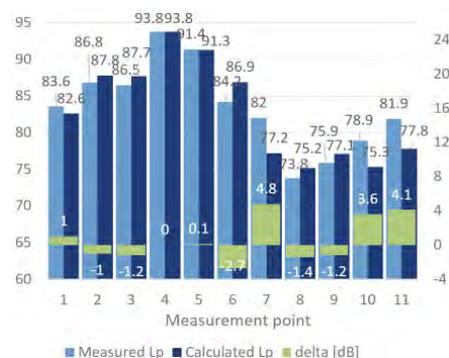


Fig. 33 – Sound levels in dBA measured and calculated by means of the sources obtained with SoundPLAN® tool at measurement points around the auxiliary boiler

Livelli sonori in dBA misurati e calcolati mediante le sorgenti ottenute con la funzione di SoundPLAN® nei punti di misura attorno la caldaia ausiliaria

convenience) and as noise contour lines (gathered in Fig. 34 to ease the crosscheck), shows that the software tool is working better for small sources with limited screening or reflecting surfaces nearby, since the least gaps are close to noisiest sources, i.e. points 1 to 5, influenced by the burner (B-BR) and the forced fan (FDF) with its air inlet (FDF-AI).

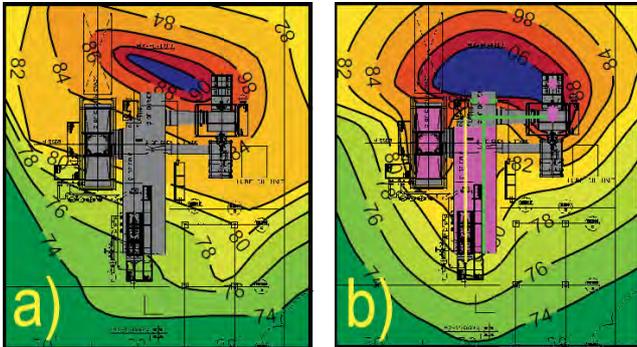


Fig. 34 – Comparison of auxiliary boiler measured noise map (a) with the noise map calculated with the sources obtained with SoundPLAN® tool (b)

Confronto della mappa del rumore misurato della caldaia ausiliaria (a) con la mappa del rumore calcolato con le sorgenti ottenute con la funzione di SoundPLAN® (b)

Nevertheless, this inverse method looks to be more viable than the use of ISO 3744 [20] or intensimetry [21], for the complex configuration of such multi source boiler package: indeed, both above techniques cannot be applied for sound sources shaped with protrusions and recesses.

Perhaps, a more detailed acoustic model with volume sources would improve the accuracy of the results obtained by applying the SoundPLAN® tool, but this surely increase the number of required measurement points.

The experience described here has shown that planning the measurement points according to the multi-source to be studied is fundamental in order to apply the software tool. In reality, the points used here were previously chosen for the determination of the total sound power level of the boiler package using ISO 8297, not for the application of the software tool. The sound power level data accuracy of individual sources might be improved if there were additional measurement points within the package envelope.

Finally, there are two options for acoustic modelling of multisource items to apply the software tool: the use of volume sources, or by means of basic sources and screens, the latter may require fewer measurements.

5 | Conclusions

The adoption of an acoustic model of an industrial plant is useful during the whole design process, since earliest stages, when noise studies for authorization purposes are conducted. Subsequently, the noise control design technical solutions and the noise data received from equipment suppliers are

used to update progressively the acoustic model for which the expected sound levels distribution is predicted before the plant startup. After the plant construction, once the plant is in operation, the acoustic model may be calibrated, to get a final “as built” acoustic model likely to be used for controlling the equipment aging, planning plant modifications or design further similar plants. In case of design changes took place during the plant mechanical erection, the calibration of the acoustic model could be more substantial on the equipment or piping systems that have been affected by the modifications. In this paper, an example of the plant acoustic design tracking with the support of a dedicated acoustic modelling has revealed the lacks in noise data received from some equipment suppliers (less significant) and the detrimental effect of planned acoustic insulation removal in a noisy piping system (highly impacting), by means of the comparison with the actual sound level distribution during normal operation, showing the differences of both sources sound power levels and in-field sound pressure levels.

For the definition of the “as built” acoustic model using measured data, inverse methods may be used. For multi component sound sources (shaped with protrusions and recesses) such inverse methods appear more practical than those envisaged by ISO 3744 or intensimetry. Integrated software tool for calculating sound power levels from measured data is useful for complex multisource noise characterization, provided the data set is consistent. In present work, the application of such software tool, not otherwise available in literature, is described and analysed. Future investigations on the accuracy and precision of attainable results will follow, to define applicability conditions and limits.

Conclusioni

L'adozione di un modello acustico di un impianto industriale è utile durante l'intero processo di progettazione, sin dalle prime fasi, quando vengono condotti studi di rumore ai fini autorizzativi. Successivamente, le soluzioni tecniche di progettazione del controllo del rumore e i dati di rumore ricevuti dai fornitori di apparecchiature vengono utilizzati per aggiornare progressivamente il modello acustico per il quale la distribuzione dei livelli sonori attesi è prevista prima dell'avvio dell'impianto. Dopo la costruzione dell'impianto, una volta che l'impianto è in funzione, il modello acustico può essere messo a punto, per ottenere un modello acustico finale secondo lo stato di fatto che possa essere utilizzato per controllare l'invecchiamento delle apparecchiature, pianificare modifiche all'impianto o progettare ulteriori impianti simili. Nel caso in cui durante il montaggio meccanico dell'impianto siano intervenute modifiche progettuali, la messa a punto del modello acustico potrebbe essere più consistente sulle apparecchiature o sui sistemi di tubazioni che sono stati interessati dalle modifiche. In questo lavoro, un esempio di tracciamento della progettazione acustica dell'impianto con il supporto di una modellazione acustica dedicata ha rivelato la mancanza di dati sul rumore ricevuti da alcuni fornitori di apparecchiature (meno significativi) e l'effetto negativo della rimozione dell'isolamento acustico progettato in un sistema di tubazioni rumoroso (altamente impattante), attraverso il confronto con l'effettiva distribuzione del livello sonoro

durante il normale funzionamento, mostrando le differenze sia tra i livelli di potenza sonora delle sorgenti sia tra i livelli di pressione sonora in campo.

Per la definizione del modello acustico secondo lo stato di fatto utilizzando i dati misurati, possono essere utilizzati metodi inversi. Tali metodi inversi sono più pratici della ISO 3744 o dell'intensimetria per sorgenti sonore multicomponente, conformate con sporgenze e rientranze. Lo strumento software integrato per il calcolo dei livelli di potenza sonora dai dati misurati è utile per la caratterizzazione complessa del rumore multisorgente, a condizione che il set di dati sia coerente. Nel presente lavoro viene descritta e analizzata l'applicazione di tale strumento software, non altrimenti disponibile in letteratura. Seguiranno future indagini sull'accuratezza e la precisione dei risultati ottenibili, per definire condizioni e limiti di applicabilità.

6 | Acknowledgements

Authors want to express appreciation to Jochen Schaal, SoundPLAN® Managing Director, for the valuable contribution on the specific software tool details.

Bibliography

- [1] ISO 15664, Acoustics – Noise control design procedure for open plant, (2001).
- [2] D.A. Bies, C.H. Hansen, Engineering noise control, IV edition, Spon Press, London, 2009.
- [3] L.L. Beranek, I.L. Vér, Noise and vibration control engineering, 2nd ed., John Wiley & Sons, Hoboken, NJ, 2006.
- [4] M.J. Crocker, Handbook of noise and vibration control, John Wiley & Sons, Hoboken, NJ, 2007.
- [5] N.M. Nguyen, An overview of how to execute engineering procurement construction commissioning (EPCC) projects, NDV Project Management Services Inc., Brossard, CA, 2014. <https://static1.squarespace.com/static/580ba2981b631bb287e989db/t/5815620b03596e7961c606a6/1477796364532/AN+OVERVIEW+OF+HOW+TO+EXECUTE+ENGINEERING+PROCUREMENT+CONSTRUCTION+COMMISSIONING.pdf>.
- [6] SoundPLAN GbmH, Calculate sound power from measured data, in: SoundPLAN User's Manual 7.4, SoundPLAN GbmH, Backnang, DE, 2015: pp. 618-620.
- [7] CONCAWE, The propagation of noise from petroleum and petrochemical complexes to neighbouring communities – final report 4/81, CONCAWE, The Hague, NL, 1981. https://www.concawe.eu/wp-content/uploads/2017/01/rpt_81-4ocr-2004-01264-01-e.pdf.
- [8] K.J. Marsh, The CONCAWE model for calculating the propagation of noise from open-air industrial plants, *Appl. Acoust.* 15 (1982) 411-428. [https://doi.org/10.1016/0003-682X\(82\)90003-2](https://doi.org/10.1016/0003-682X(82)90003-2).
- [9] R. Tonin, Estimating noise levels from petrochemical plants, mines and industrial complexes, *Acoust. Aust.* 13 (1985) 59–67. <https://acoustics.asn.au/journal/Vol13No2.pdf>.
- [10] M. Bérengier, B. Gauvreau, P. Blanc-Benon, D. Juvé, Outdoor Sound Propagation: A Short Review on Analytical and Numerical Approaches, *Acta Acust. United Ac.* 89 (2003) 980-991.
- [11] D. Sonaviya, B. Tandel, A Quick review On Noise propagation models and software, in: *Proceedings ICSBE 2016*, Sri Lanka, 2016.
- [12] S.-Y. Lu, Y.-Y. Hong, Least square error method to estimate individual power of noise sources under simultaneous operating conditions, *Int. J. Ind. Ergonom.* 35 (2005) 755-760. <https://doi.org/10.1016/j.ergon.2005.01.011>.
- [13] P. Chandna, S. Deswal, A. Chandra, S. Sharma, Estimation of Individual Power of Noise Sources Operating Simultaneously, *World Academy of Sci., Eng. and Technol.* 3 (2009) 373-378. <https://publications.waset.org/3851/pdf>.
- [14] E. Luzzato, C. Lecointre, Some simple and effective methods for sound source identification with geometrical acoustic models, *J. Sound Vib.* 105 (1986) 473-490. [https://doi.org/10.1016/0022-460X\(86\)90173-2](https://doi.org/10.1016/0022-460X(86)90173-2).
- [15] O. Guasch, F.X. Magrans, P.V. Rodriguez, An inversion modelling method to obtain the acoustic power of the noise sources in a large factory, *Appl. Acoust.* 63 (2002) 401–417. [https://doi.org/10.1016/S0003-682X\(01\)00044-5](https://doi.org/10.1016/S0003-682X(01)00044-5).
- [16] D.C. Cirac, J.R. García, M. Kidner, Multisource industrial plant inverse noise modelling and assessment against ISO 8297, in: *Proceedings of 20th ICA*, Sydney, AU, 2010. www.acoustics.asn.au/conference_proceedings/ICA2010/cdrom-ICA2010/papers/p562.pdf.
- [17] ISO 8297, Acoustics – Determination of sound power levels of multi-source industrial plants for evaluation of sound pressure levels in the environment – Engineering Method, (1994).
- [18] F.H. Brittain, Using ISO 8297 to verify community noise requirements given as limits on sound power levels, in: *INCE Conf. Proc.*, Reno, NV, 2007: pp. 424-436. www.ingentaconnect.com/contentone/ince/incep/2007/00002007/00000001/art00048;jsessionid=c1knrl4lhyx6.x-ic-live-03#expand/collapse.
- [19] ISO 9613-2, Acoustics – Attenuation of sound during propagation outdoors – Part 2: General method of calculation, (1996).
- [20] ISO 3744, Acoustics – Determination of sound power levels and sound energy levels of noise sources using sound pressure – Engineering method for an essentially free field over a reflecting plane, (2010).
- [21] ISO 9614 series, Acoustics – Determination of sound power levels of noise sources using sound intensity, (1993).

Resoconto del Simposio Internazionale AIA-ICA “Ricerche avanzate per la gestione del rumore delle infrastrutture marittime”

Antonino Di Bella

Dipartimento di Ingegneria Industriale,
Università degli Studi di Padova,
Via Venezia, 1, 35131 Padova
antonino.dibella@unipd.it

Ricevuto: 17/5/2024

Accettato: 31/5/2024

DOI: 10.3280/ria1-2024oa17998

ISSN: 2385-2615

Il 22 aprile, a Padova, si è tenuto il Simposio Internazionale AIA-ICA su “Ricerche avanzate per la gestione del rumore delle infrastrutture marittime”, presso l'Archivio Antico di Palazzo Bo, sede dell'Università degli Studi di Padova. Il simposio è stato organizzato dall'Associazione Italiana di Acustica (AIA), in collaborazione con il Dipartimento di Ingegneria Industriale, Università degli Studi di Padova, con il supporto dell'International Commission for Acoustics (ICA) e con la partecipazione, come partner istituzionale, dell'Autorità di sistema Portuale del Mare Adriatico Settentrionale Porti di Venezia e Chioggia. Il presente articolo ne riassume i contenuti tecnico scientifici e lo scopo.

Parole chiave: simposio, AIA, associazione italiana di acustica, ICA, AdSPMAS

Report of the AIA-ICA International Symposium on “Advanced Research in Noise Management of Maritime Infrastructures”

On April 22nd in Padova, the AIA-ICA International Symposium on “Advanced Research in Noise Management of Maritime Infrastructures” was held at the Ancient Archive of Palazzo Bo, home of the University of Padova. The symposium was organized by the Acoustical Society of Italy (AIA) in collaboration with the Department of Industrial Engineering, University of Padova, with the support of the International Commission for Acoustics (ICA) and with the participation as an institutional partner of the Port Authority of the Northern Adriatic Sea Ports of Venice and Chioggia. This article summarizes its technical-scientific contents and main purpose.

Keywords: workshop, AIA, Acoustical Society of Italy, ICA, AdSPMAS

1 | Introduzione

Nella giornata del 22 aprile 2024 a Padova, si è tenuto il Simposio Internazionale su “Ricerche avanzate per la gestione del rumore delle infrastrutture marittime”, presso l'Archivio Antico di Palazzo Bo, sede dell'Università degli Studi di Padova. Il simposio è stato organizzato dall'Associazione Italiana di Acustica (AIA), in collaborazione con il Dipartimento di Ingegneria Industriale, Università degli Studi di Padova, con il supporto dell'International Commission for Acoustics (ICA) e con la partecipazione, come partner istituzionale, dell'Autorità di sistema Portuale del Mare Adriatico Settentrionale Porti di Venezia e Chioggia.

Il Seminario ha visto un'interessata ed ampia platea di partecipanti, con oltre 50 delegati provenienti dall'ambito accademico, della ricerca, delle agenzie di controllo ambientale, degli enti di gestione, degli stakeholders operanti a diversi livelli nella programmazione e gestione del territorio. Pur se estremamente specialistico, il tema della gestione del rumore e di altre forme di inquinamento ad esso correlate è particolarmente importante e quest'evento ha offerto l'occasione per un vivace e proficuo dibattito tra tutte le parti interessate.

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

2 | Programma scientifico

I lavori del Seminario sono stati aperti dal Presidente dell'AIA, Prof. Patrizio Fausti, dal Prof. Antonino Di Bella, in qualità di Segretario Generale ICA, dal Direttore del Dipartimento di Ingegneria Industriale (DII) dell'Università degli Studi di Padova, Prof. Fabrizio Dughiero, dal Prof. Michele De Carli, coordinatore del Gruppo di Ricerca BETALAB del DII e dall'Ing. Giovanni Teranova, Direttore Tecnico dell'autorità di Sistema Portuale del Mare Adriatico Settentrionale (AdSPMAS), che hanno fornito un quadro introduttivo sull'argomento.

Il simposio si è posto l'obiettivo di confrontare le principali esperienze di ricerca e di presentare diversi progetti collaborativi che hanno permesso di attuare buone pratiche di controllo, gestione e mitigazione dell'inquinamento acustico in ambito portuale.

Il rumore generato nell'ambito delle infrastrutture di trasporto marittimo è un aspetto emergente nell'ambito della



Fig. 1 – L'apertura dei lavori del Simposio Internazionale
The opening of the International Symposium

gestione del rumore ambientale che ha un impatto significativo soprattutto in quei contesti, tipici del bacino del mediterraneo, in cui il porto, per ragioni storiche, economiche, urbanistiche e strategiche, costituisce il perno attorno a cui ruota la vita e l'identità stessa della città.

Da sempre l'immagine del porto è radicata nelle culture mediterranee come sinonimo di energia, vitalità e dinamismo. Tuttavia, le sempre più stringenti esigenze di protezione dell'ambiente impongono di contemperare queste caratteristiche con un attento e continuo controllo di tutte le possibili forme di inquinamento.



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

Gli argomenti trattati hanno fornito, innanzitutto, l'inquadramento del problema della gestione degli inquinanti ambientali da parte degli enti preposti al governo del territorio portuale. È opportuno ricordare che il rumore, in particolare nell'ambito trasportistico e produttivo, non è un fenomeno indipendente dal contesto e dall'interazione tra più soggetti e interessi. Al contrario, deve esser visto come un fenomeno

complesso che emerge dal concorso di diversi contributi, non tutti ricadenti nell'ambito di applicazione della vigente legislazione ambientale. Vi sono infatti diverse cause di natura antropica, particolarmente in quei porti a prevalente vocazione turistica e crocieristica, che inducono comportamenti o azioni che, se non opportunamente analizzate e controllate, possono avere un elevato impatto acustico sul territorio circostante le infrastrutture portuali.

3 | La sintesi degli interventi

Il Seminario è stato articolato in due parti, al termine di ciascuna delle quali è seguito un partecipato e interessato dibattito tra relatori e pubblico.

Nella sessione introduttiva sono state presentate, da parte dell'Autorità di Sistema Portuale del Mare Adriatico Setentrionale Porti di Venezia e Chioggia, le recenti azioni di supporto alla ricerca tecnico-scientifica e di messa in atto di buone pratiche per il contenimento dell'inquinamento ambientale.

In particolare, Giovanni Terranova e Marta Citron hanno illustrato una panoramica sulle politiche ambientali in materia di riduzione delle emissioni da attività portuali e Marina Minardi ha presentato l'innovativa rete integrata di monitoraggio acustico ed ambientale dei porti di Venezia e Chioggia.

A conclusione di queste esposizioni, James Orlandi ha riferito in merito alle opportunità offerte dalla programmazione europea a supporto della ricerca ambientale e, nello specifico, di quelle che hanno visto AdSPMAS protagonista in progetti quali "CLEANBERTH", per la sostenibilità ambientale ed efficienza energetica, e "EALING", per l'armonizzazione ed interoperabilità dei sistemi di elettrificazione delle banchine di ormeggio.

Hanno completato questa panoramica gli interventi dei due ospiti internazionali che hanno messo a confronto due diverse esperienze di gestione su ampia scala del rumore portuale: Jose Luis Cueto, dell'Università di Cadice, ha mostrato



Fig. 3 – Un momento degli interventi degli ospiti internazionali: Jose Luis Cueto (a sinistra), dell'Università di Cadice, e Theo Benjert, della Municipalità di Rotterdam (a destra)
A moment from the presentations of the international guests: Jose Luis Cueto (on the left), from the University of Cadiz, and Theo Benjert, from the Municipality of Rotterdam (on the right)

il complesso iter che ha portato alla mappatura acustica del complesso industriale che include il porto di Algeciras; ponendo in evidenza le problematiche derivanti dalla necessità di discretizzare diverse tipologie di sorgenti sonore in un contesto particolarmente complesso; Theo Benjert, della Municipalità di Rotterdam, ha posto l'accento sulla gestione a lungo termine delle problematiche ambientali e sulle criticità che possono insorgere con la trasformazione di destinazione d'uso di alcune aree portuali al mutare delle esigenze produttive ed economiche del porto, nonché all'evolversi delle prospettive di pianificazione e fruizione urbana nelle aree limitrofe a quelle di pertinenza delle autorità di controllo e gestione portuale.

Nella sessione pomeridiana si sono affrontati gli approfondimenti scientifici e metodologici sull'analisi e l'interpretazione dei dati derivanti dai monitoraggi ambientali e dalle misure acustiche finalizzate alla caratterizzazione di sorgenti sonore estese.

Antonino Di Bella, dell'Università degli Studi di Padova, ha affrontato il problema dell'analisi delle informazioni critiche nei monitoraggi acustici di lungo periodo. L'attuale relativa semplicità nell'acquisizione di dati molto dettagliati in un arco temporale esteso, unitamente alla enorme disponibilità di informazioni aggiuntive a supporto delle analisi acustiche (es.: dati meteo, geolocalizzazione delle sorgenti mobili, parametri di controllo dell'operatività di sorgenti sonore fisse basati su i consumi energetici o sull'immissione di inquinanti diversi dal rumore, ecc.), pone problemi rilevanti in termini di sostenibilità e costi di queste indagini e induce a sviluppare indicatori sintetici di immediato utilizzo per gli organismi di controllo.

Gaetano Licitra, dell'ARPA Toscana, ha invece illustrato l'applicazione degli «Intelligent Transport Systems» (ITS) per la mitigazione del rumore del traffico veicolare indotto dalle attività portuali. Nello specifico, è stato analizzata l'applicazione di questi strumenti al caso del Porto di Piombino nell'ambito del progetto «SALPIAM».

Gli interventi di questa sessione si sono conclusi con una esposizione a più voci sulla caratterizzazione acustica delle navi da crociera, in particolare nell'ambito dei progetti «CLASTER» e «RUMAIR 2», dove si sono alternati: Davide Borelli ed Enrico Rizzuto, dell'Università degli Studi di Genova; Massimo Viscardi e Luigia Mocerino, dell'Università di Napoli; Giovanni Rognoni, dell'Università di Trieste. Il filo conduttore che univa gli interventi di questi ricercatori era rappresentato dall'esigenza di dare una soluzione oggettiva, ripetibile e riproducibile al problema della determinazione in opera della potenza

sonora di navi di grandi dimensioni e delle loro componenti più rumorose, particolarmente rilevanti durante la manovra e l'ormeggio, nell'ottica di pervenire ad un repertorio affidabile di dati indispensabili alla modellizzazione acustica ambientale e per la valutazione dell'impatto acustico delle infrastrutture portuali.

Ulteriori informazioni possono essere reperite sul sito dell'Associazione Italiana di Acustica, alla pagina: <https://acustica-ai.it/event/international-symposium-on-advanced-research-in-noise-management-of-maritime-infrastructures-padova-22-aprile-2024/>

4 | L'organizzazione

Il simposio è stato organizzato dall'Associazione Italiana di Acustica, in collaborazione con il Dipartimento di Ingegneria Industriale, Università degli Studi di Padova, con il supporto dell'International Commission for Acoustics (ICA) e con la partecipazione, come partner istituzionale, dell'Autorità di sistema Portuale del Mare Adriatico Settentrionale Porti di Venezia e Chioggia.

Il Comitato Organizzatore (Davide Borelli, Antonino Di Bella, Luca Fredianelli, Gaetano Licitra, Corrado Schenone) 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 e degli Enti patrocinanti, le informazioni dell'evento.

Il comitato Scientifico (Marco Biot, Davide Borelli, Antonino Di Bella, Luca Fredianelli, Gaetano Licitra, Enrico Rizzuto, Corrado Schenone, Massimo Viscardi) ha significativamente supportato l'organizzazione dell'evento, l'armonizzazione dei contenuti scientifici e delle presentazioni e l'invito dei relatori. Si vuole sottolineare il ruolo fondamentale della Segreteria del Seminario (Simona Senesi), che ha supportato la realizzazione dell'evento, sovrinteso alla preparazione del materiale informativo, contribuito alla diffusione dell'evento, e gestito gli aspetti amministrativi. Infine, un ringraziamento per il supporto è dovuto ai Sostenitori Platinum AIA 2024: Mason Industries, Ecophon; ai Sostenitori Oro AIA 2023: Aesse Ambiente, Head acoustics, Rockfon, Gruppo Sogimi, Spectra; ai Sostenitori Argento AIA 2023: Bosco Italia, Diasen, SCS ControlSys, Svantek Italia; ed ai Sostenitori Bronzo AIA 2023: Caimi, Rockwool.

ActaReBuild – Acoustic and thermal retrofit of office building stock in EU

Edoardo Alessio Piana^{a*} | Monika Rychtarikova^b

^a Applied Acoustics Laboratory,
University of Brescia,
Via Branze, 38, 25123 Brescia

^a KU Leuven, Department of Architecture,
Campus Brussels and Ghent,
Paleizenstraat 65/67, 1030 Brussels

* Corresponding author:
edoardo.piana@unibs.it

Ricevuto: 20/5/2024

Accettato: 31/5/2024

DOI: 10.3280/ria1-2024oa18874

ISSN: 2385-2615

ActaReBuild provides research and training in retrofit of office building stock in Europe by means a new generation of sustainable materials and building components. Doctoral candidates will learn how to improve and guarantee acoustic and thermal performance of buildings that undergo renovation processes while minimizing embodied carbon production. The training offers to 10 Doctoral Candidates interconnected through the network the research and transferable skills necessary for thriving careers in this burgeoning area. This goal will be achieved by a unique, interdisciplinary combination of specialized “hands-on” research training supported by high-quality joint PhD degree supervision; by performing of secondments at industrial partners; participation at courses and workshops on scientific and complementary “soft” skills facilitated by the academic and non-academic partners of the consortium. Thanks to network-wide interactions, DCs will get acquainted with a variety of novel building materials and solutions (bio-, nano-, meta-, recycled, 3D printed materials and multilayer structural skins), measurement techniques and assessment methods (such as life cycle analysis and sustainability assessment, psychoacoustic methods, specialized thermal behaviour experiments and a variety of simulation techniques in acoustics, energy, hygrothermal behaviour).

Keywords: Marie Courie, training school, retrofit, acoustic, thermal

ActaReBuild – Riquilificazione acustica e termica del patrimonio edilizio adibito ad uffici nell'UE

ActaReBuild fornisce ricerca e formazione sull'ammodernamento del patrimonio edilizio per uffici in Europa mediante una nuova generazione di materiali e componenti edilizi sostenibili. I dottorandi impareranno come migliorare e garantire le prestazioni acustiche e termiche degli edifici sottoposti a processi di ristrutturazione riducendo al minimo la produzione di anidride carbonica. La formazione offre a 10 dottorandi, interconnessi attraverso la rete, le competenze di ricerca necessarie per sviluppare una carriera in quest'area in rapida espansione. Questo obiettivo sarà raggiunto attraverso una combinazione unica e interdisciplinare di formazione specializzata nella ricerca “applicata” supportata da una supervisione congiunta ed un dottorato di alta qualità; mediante svolgimento di periodi di ricerca presso partner industriali; partecipazione a corsi e workshop. Grazie alle interazioni a livello di rete, si potrà sviluppare una varietà di nuovi materiali e soluzioni da costruzione (materiali bio, nano, meta, riciclati, stampati in 3D e rivestimenti strutturali multistrato), tecniche di misurazione e metodi di valutazione (come analisi del ciclo di vita e valutazione della sostenibilità, metodi psicoacustici, esperimenti specializzati sul comportamento termico e una varietà di tecniche di simulazione nei campi dell'acustica, dell'energia e del comportamento termo-igrometrico).

Parole chiave: Marie Courie, training school, ammodernamento del patrimonio edilizio, acustica, termica

1 | Introduction

On the path to achieve carbon neutrality by 2050, the building and construction sectors need to be transformed. The Built environment is a major contributor to total carbon emissions, resource consumption and waste generation. Changing the current business as usual (BAU) approach is a key objective to achieve climate targets and safeguard the quality of life for future generations. With 85-95% of the building stock

of 2050 being already built, the EU has put the “Renovation Wave” in the heart of the Green Deal Agenda. The ActaReBuild project focuses on decarbonizing buildings through increasing their energy efficiency for cooling and heating during their operation. Current carbon models show that, given the need for significant total carbon reduction in the next 10 years (“Decade of Action”), the renovation of building stock needs to also minimize the embodied carbon which is the carbon released by production of materials and construc-

tion of building systems. One key enabler is the adaption of circular economy principles for the renovation of buildings, as recognized by the EU Circular Economy Action Plan and the EU Taxonomy. With the focus on embodied carbon and Circular Economy principles, the use of bio-based materials will inevitably play a key role in the transformation of the built environment, as also highlighted by the New European Bauhaus initiative.

Next to increasing the energy efficiency of the building stock, the renovation wave needs to improve resilience of buildings in the post-pandemic economy (“Build back better”). The pandemic has disrupted the commercial real estate market. Many member states and enterprises adopt new policies, supporting new flexible working modes including hybrid working models. Combining home office with a more collaborative corporate working environment will disrupt the current typology of mono-functional office buildings. Experts foresee reduced demand for individual working places and an increased demand for mixed use developments with assets offering flexibility with respect to office and residential use. As part of the renovation wave this increased requirement for flexibility needs to be addressed to increase the resilience of building stock.

This developments lead to a new Performance-Material-Flexibility Nexus that this proposal is addressing:

1. Improve energy efficiency of building stock.
2. Improve resilience and adaptability of building stock.
3. Use circular design approaches and material strategies to minimize embodied carbon.

This proposal focuses on the façade as the main building component, relating to all three action fields. The façade performance governs to a large degree the energy efficiency of the building, and at the same time has a share of 15-20% of embodied carbon of the building structure. In addition, the façade design and its performance are key factors with respect to use of space. Key performance criteria for the resilience of the asset are both the thermal and acoustic performances of the façade. Usually, these two aspects are difficult to be properly tackled together.

Besides the energy driven issues, another aspect in this narrative that cannot be omitted is the prevention of building users from noise. Noise is recognised among the top environmental risks to physical and mental health in Europe. According to the World Health Organisation (WHO), in western Europe alone at least 1.6 million healthy years of life are lost as a result of noise. It is estimated that approximately 108 million people in the EEA-33 member countries are exposed to L_{den} noise levels (annual average day, evening and night exposure to noise) from road traffic that are equal to or above the recommended 55 dB. The United Nations estimates that by 2050 about 68 % of the world's population will likely live in cities resulting in noise pollution growth in those areas and beyond, so that quiet surrounding suburbs and rural areas will also suffer from noise.

Also, the interior acoustic environment and the aspects related to architectural acoustic will therefore play an even

more important role when buildings are used as houses and offices at the same time. For this reason, the design criteria need to be revised. Ecological and economical aspects have influenced building styles and the choice of building materials in the building industry, especially considering new thermal insulation technologies. Thought this positive evolution of the external and internal building structures in terms of the additional thermal insulation, proposal for adaptive facades, energy harvesting systems and involvement of ecological materials, have consequently brought new types of constructions and building details. Such new technologies have improved the energy efficiency of buildings but, on the other side, have at the same time affected their acoustic properties (in terms of the sound insulation and sound absorption of the façade). Another aspect that cannot be omitted is, that novel constructions became so lightweight (and building details so complex) that the traditional diagnostic methods are not sufficient for their assessment.

The conversion process involves several challenges:

1. Thermal and acoustic insulation requirements in dwellings are much higher than those in offices.
2. Striving for sustainable evolutions by making use of recycled-, bio- and meta- materials.
3. Office buildings often have an open disposition. For conversion to dwellings, new internal walls need to be build.

Because of the mechanical stability of buildings, the solutions must be lightweight. The latter however typically have poor acoustic isolation, especially in the low-frequency range. Innovative technological solutions are therefore needed.

The introduction of new materials and building systems (lightweight or ultralightweight materials, metamaterials, etc.) requires rethinking of ISO norms and energetic regulations, both in terms of acoustic and thermal isolation.

1. The weighting of low frequencies in revised single number ratings for acoustic isolation needs to be considered adequately, taking into account their subjective audibility.
2. When lightweight materials are used, which are not suitable to accumulate heat and buffer temperature extremes, combinations with phase change materials can be developed. Standards and regulations should be adapted to allow for such hybrid solutions.
3. The thermal effect of lightweight and ultralightweight constructions such as structural skins (i.e. ETFE foils) should not be assessed in the same way as traditional constructions. The latter are qualified based on their thermal resistance (U-value), which is based on their thermal conductivity and thickness. Although, thin foils as such have a very poor thermal resistance, in combination with air layers and radiation reflecting coatings, can exhibit reasonably good effective thermal isolation. It is this effective thermal isolation that should be taken into account in their assessment.

This project involves 10 Early-stage researchers (ESR – PhD students) who will perform research in the framework of intersectoral and international collaborations. 4 ESRs are working on the development of new generation sustainable

materials with special acoustic and thermal properties (recycled materials, biomaterials, and metamaterials, neomaterials with integrated PCMs, and new generation ETFE cushion systems) 3 ESRs are working on the development of new building components and their implementation to building façades (adaptive façades, new generation ETICS systems, Introduction of ETFE to wall claddings), 2 ESRs are focusing on the revision of ISO norms, 1 ESR is responsible for Life Cycle Analysis and sustainability calculations.

All researches will be performed through well-designed training, supported by academic and industrial partners.

This project thus tackles two main acoustic scientific fields: Thermal physics and acoustic in the process of conversion of administrative buildings to dwellings in EU.

2 | Project partners

The project is coordinated by Monika Rychtarichova (KU Leuven – Katholieke Universiteit Leuven, Belgium) and the partners (beneficiaries), coming from seven different countries, are:

- Slovenská technická univerzita v Bratislave, Slovakia.
- University of Brescia, Italy.
- České vysoké učení technické v Praze, Czech Republic.
- Universidad de Valladolid, Spain.
- Politecnico Milano, Italy.
- Bundesministerium fuer Bildung, Wissenschaft und Forschung, Austria.
- Vector Foiltec GmbH, Bremen.
- KFB Acoustics Sp. Z o.o., Poland.

Figure 1 shows where the partners are located in Europe.

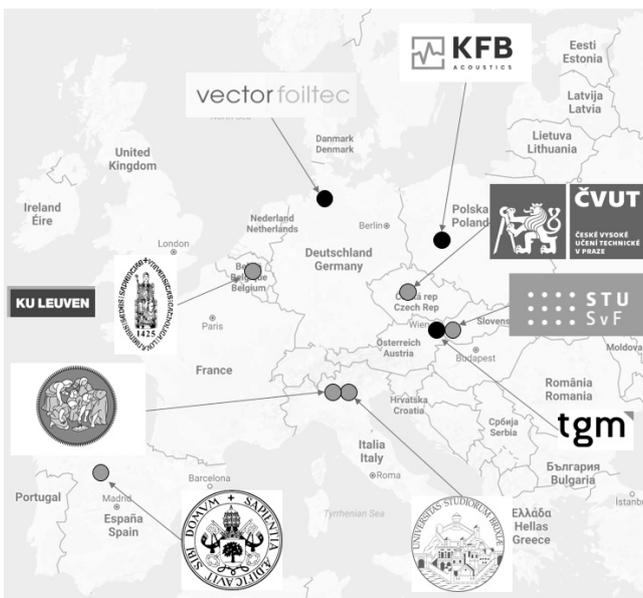


Fig. 1 – Outline of the coordinator and of the partners in Europe
Posizione del coordinatore e dei partner in Europa

There are ten industrial associated partners cooperating in the project:

- École d'Ingénieur-e-s, France.
- AkuDesign s.r.o., Slovakia.
- Cauto Cantiere Autolimitazione, Italy.
- Krown-Design BV, The Netherlands.
- Schüco International KG, Germany.
- Aveton, s.r.o., Czech republic.
- Propamsa s.a.u, Spain.
- Bureau voor architectuur en stabiliteit, Belgium.
- IRS studiebureau, Belgium.
- Prefabricaciones y contratas s.a.u, Spain.

3 | PhD projects

There are ten PhD projects related to the topics reported in Section 1:

- PhD position 1: Development of novel bio-metamaterial with optimized thermal and acoustic properties.
- PhD position 2: Acoustic and Thermal Properties of Recycled Materials and Neomaterials.
- PhD position 3: Development of lightweight concrete using recycled bio-based aggregates.
- PhD position 4: Exploration of the use of biomaterials for heat storage and thermal comfort applications in buildings.
- PhD position 5: Sound insulation of building envelope components based on acoustic metamaterials.
- PhD position 6: Development of new method for remote acoustic measurements of large building envelope structures.
- PhD position 7: Towards net-zero carbon facades – the impact of bio-based materials for the system design of high performing envelopes.
- PhD position 8: Qualitative assessment of sound insulation of building envelopes.
- PhD position 9: Interaction and parameterization of thermal, energy and comfort variables in façade walls based on applicable International and European regulations.
- PhD position 10: Actual needs of façade construction design related to the Life Cycle Assessment, durability and social acceptability.

Figure 2 shows the PhD students involved in the ActaReBuild project.



Fig. 2 – PhD students involved in ActaReBuild
Dottorandi coinvolti nel Progetto ActaReBuild

Resoconto dell'evento di lancio del progetto Interreg Marittimo Italia-Francia "CLASTER"

Davide Borelli^a | Corrado Schenone^{a*}

^a Dipartimento di Ingegneria Meccanica, Energetica, Gestionale e dei Trasporti, Università degli Studi di Genova, Via all'Opera Pia, 15/A, 16145 Genova

* Autore di riferimento:
corrado.schenone@unige.it

Ricevuto: 20/5/2024

Accettato: 31/5/2024

DOI: 10.3280/ria1-2024oa18874

ISSN: 2385-2615

Il 16 aprile a Genova, presso il salone di rappresentanza del piano nobile di Villa Giustiniani-Cambiaso, si è tenuto l'evento di lancio del progetto Interreg Marittimo Italia-Francia "CLASTER – Compatibilità e Sostenibilità Rumore portuale", seguito dal primo Comitato di Pilotaggio del progetto stesso. CLASTER si pone l'obiettivo di capitalizzare l'esperienza che il capofila Università degli Studi di Genova ed altri partner hanno maturato grazie alla partecipazione a numerosi progetti della precedente programmazione 2014-2020. Il presente resoconto ne riassume lo scopo, i contenuti tecnico scientifici ed i risultati attesi.

Parole chiave: evento di lancio, Interreg Marittimo, rumore portuale

Report of the kick-off meeting of the Interreg Maritime Italy France project "CLASTER"

On April 16th in Genoa, in the hall on the main floor of Villa Giustiniani-Cambiaso, the kick-off meeting of the Italy-France Interreg Maritime project "CLASTER – Compatibility and Sustainability of Port Noise" was held, followed by the first Steering Committee of the project itself. CLASTER aims to capitalize on the experience that the lead partner University of Genoa and other partners have gained thanks to participation in numerous projects of the previous 2014-2020 programming. This report summarizes its purpose, technical-scientific contents and expected results.

Keywords: kick-off meeting, Interreg Maritime, port noise

1 | Introduzione

Nella giornata del 16 aprile 2024, a Genova, presso il salone di rappresentanza del piano nobile di Villa Giustiniani-Cambiaso, si è tenuto l'evento di lancio del progetto Interreg Marittimo Italia-Francia "CLASTER – Compatibilità e Sostenibilità Rumore portuale".

Il progetto CLASTER ha come obiettivo quello di migliorare il clima acustico nelle aree urbane prossime ai porti, riducendo l'impatto sonoro indotto dalle sorgenti sonore portuali a beneficio delle popolazioni residenti in tali zone e degli stakeholder (pubbliche amministrazioni, autorità portuali, lavoratori e aziende private). Tale problematica è particolarmente sentita nell'area di cooperazione transfrontaliera, dove sono molti i porti inseriti in un contesto urbano. Partendo dalla capitalizzazione dei risultati ottenuti dal cluster Rumore e Porti nella precedente programmazione (progetti REPORT, MON ACUMEN, LIST PORT, RUMBLE, DECIBEL, TRIPLO), la sfida di CLASTER è quella di dimostrare come la base tecnico-conoscitiva sviluppata in precedenza possa essere applicata a nuove realtà, migliorando la sostenibilità ambientale dei porti sia attraverso la realizzazione di piccoli interventi customizzati di mitigazione del rumore, sia attraverso la sperimentazione e lo sviluppo di nuovi sistemi digitali integrati per la governance e la pianificazione acustica portuale, comunale

e regionale replicabili in tutta l'area di cooperazione. Il rumore generato dalle attività portuali è prevalentemente imputabile a due componenti: le attività portuali interne allo scalo e il traffico attratto dal nodo e che transita attraverso le infrastrutture di collegamento. Al fine di ridurre l'impatto sonoro dei porti partner e migliorare la qualità della vita nelle aree di intervento, la cooperazione territoriale contribuirà ad individuare soluzioni efficaci, condivise e transnazionali per entrambi gli impatti, quali applicazioni di pavimentazioni in gomma e/o smorzatori, stesura di asfalti fonoassorbenti, installazioni di centraline e sviluppo di sistemi integrati ITS per la gestione del traffico. La partnership di CLASTER, completa per le diverse funzioni e competenze, favorirà la diffusione di linee guida e conoscenze specifiche al servizio del territorio eleggibile e dell'intera UE.

2 | Descrizione della giornata e del progetto

La riunione si è aperta con i saluti iniziali da parte del responsabile scientifico Prof. Schenone ai partner partecipanti al nuovo progetto che si sono riuniti per l'evento ed il primo Comitato di Pilotaggio di Genova. Il Prof. Schenone ha descritto il progetto CLASTER che ha l'obiettivo di fornire ai soggetti interessati al rumore portuale strumenti di governance e miti-

gazione volti a ridurre l'inquinamento sonoro nei porti e nelle aree urbane adiacenti.

Sono intervenuti anche il Prof. Giorgio Roth, Preside della Scuola Politecnica dell'Università di Genova che porta i suoi saluti e sottolinea l'importanza dell'argomento trattato, ed il Prof. Antonino Di Bella dell'Università di Padova che affronta la tematica del rumore portuale presentando studi ed analisi recenti relative alla materia.

Il partenariato, rappresentativo di tutte le regioni del territorio eleggibile, è formato sia da partner scientifici (Università degli Studi di Genova, Agenzia Regionale per la Protezione Ambientale della Toscana, Università della Corsica Pasquale Paoli) che da enti locali (Regione Liguria, Camera di Commercio e dell'Industria del Var, Comune di Pisa, Comune di Porto Torres).



Fig. 1 – L'apertura dei lavori dell'evento di lancio
The opening of the kick-off meeting

interreg CLUSTER
Mediterraneo-EEF-Mediterraneo

Partner del progetto

ITALIA

- Università di Genova
- ARPAT
- Comune di Pisa
- Comune di Porto Torres

FRANCIA

- CCI du VAR
- Université de Corse Pasquale Paoli

Azioni del progetto:

1. Realizzazione di interventi customizzati di mitigazione del rumore nei porti partner.
Réalisation d'interventions personnalisées de mitigation du bruit dans les ports partenaires.
2. Sperimentazione e sviluppo di nuovi sistemi digitali integrati per la governance e la pianificazione acustica portuale comunale e regionale.
Expérimentation et développement de nouveaux systèmes numériques intégrés pour la gouvernance et la planification acoustique portuaire, communale et régionale.
3. Applicazioni di pavimentazioni in gomma e/o smorzatori per ridurre il rumore generato dalle attività portuali interne.
Applications de revêtements en caoutchouc, et/ou d'amortisseurs pour réduire le bruit généré par les activités portuaires internes.
4. Stesura di asfalti fonoassorbenti per mitigare il rumore del traffico attratto dai porti e delle infrastrutture di collegamento.
Mise en place d'asphaltes phono-absorbants pour atténuer le bruit du trafic attiré par les ports et les infrastructures de liaison.
5. Installazione di centraline e sviluppo di sistemi integrati ITS per la gestione del traffico.
Installation de stations de mesure et développement de systèmes intégrés ITS pour la gestion de trafic.

Budget

Total:	1.666.087 €
FESR:	1.332.870 €
(80%)	

Data inizio - Data fine
01/03/2024 - 28/02/2027 36 mesi - 6 periodi

La Cooperazione al cuore del Mediterraneo
La coopération au cœur de la Méditerranée

Fig. 2 – Presentazione del progetto
Project presentation

Si è dato ufficialmente avvio al progetto mediante la nomina dei rappresentanti del Comitato di Pilotaggio e dei loro supplenti (uno per partner), procedendo poi con la lettura dettagliata e l'approvazione degli articoli del Regolamento interno.

In seguito sono state presentate le attività di progetto ed il ruolo dei vari partner identificando quali sono le attività previste e le responsabilità:

- Attività 1.1: Analisi dello stato attuale e delle criticità derivanti dall'inquinamento acustico generato dalle attività portuali nei porti transfrontalieri e nelle aree adiacenti.
- Attività 1.2: Progettazione degli interventi di mitigazione acustica.

- Attività 1.3: Realizzazione degli interventi di mitigazione acustica nelle zone portuali e nelle aree adiacenti.
- Attività 1.4: Monitoraggio e valutazione delle opere portuali di mitigazione Acustica.
- Attività 2.1: Sviluppo di un sistema transfrontaliero congiunto integrato di caratterizzazione del rumore portuale basato su Cloud e App.
- Attività 2.2: Sviluppo di un sistema transfrontaliero ITS integrato di info mobilità rumore basato su App.
- Attività 2.3: Sviluppo di una mappatura transfrontaliera che metta in relazione la percezione dell'inquinamento acustico della popolazione e l'inquinamento oggettivamente misurato.

La sfida di CLASTER è quindi quella di capitalizzare e favorire la trasposizione dei risultati progettuali della precedente programmazione in strumenti operativi che favoriscano lo sviluppo sostenibile dei porti, garantendo tanto la crescita economica, quanto la qualità della vita dei cittadini. Ciò verrà realizzato mediante azioni di mitigazione localizzate ad elevato impatto e proponendo soluzioni innovative basate su tecnologia ITS per la mappatura del rumore e la gestione del traffico portuale.

Grazie allo sviluppo della componente WP1 i partner coinvolti potranno:

- Realizzare piccole infrastrutture per la attenuazione del rumore e monitorare l'efficacia delle opere di mitigazione acustica nei porti; anche da un punto di vista economico sociale; basandosi su analisi sviluppate dalla precedente progettazione europea, verranno realizzate alcune soluzioni tecniche specifiche nelle aree portuali, tese a mitigare gli impatti delle emissioni sonore più significative i cui risultati saranno monitorati anche attraverso modelli di valutazione dell'efficacia.
- Realizzare interventi di mitigazione del rumore generato dal traffico prodotto dal nodo portuale attraverso la realizzazione di un sistema integrato ITS di gestione del traffico, in grado di fornire automaticamente messaggi di info-mobilità capaci di modificare gli itinerari degli utenti, razionalizzando la mobilità, attraverso l'invio di informazioni sulla base di elaborazioni effettuate con modelli di traffico. Tali modelli valuteranno in tempo reale lo stato acustico e ambientale del sistema, razionalizzando il traffico, in caso di superamento dei limiti di soglia e riassegna i flussi sulla rete, attraverso l'invio automatico di messaggi di info-mobilità che inducono negli utenti il cambiamento degli itinerari con una conseguente riduzione dell'inquinamento ambientale.
- Elaborare strategie congiunte per favorire la partecipazione degli attori locali interessati alle scelte di pianificazione ambientale. Il progetto promuove quindi azioni di partecipazione e discussione pubblica sul tema, sviluppando momenti di incontro specifici, e favorisce azioni di coinvolgimento della popolazione urbana alle scelte strategiche, anche al fine di aumentare l'accettabilità sociale delle attività portuali e creare uno spazio condiviso tra i diversi attori: le istituzioni pubbliche, le imprese portuali, i comitati dei cittadini.

- Aumentare le conoscenze sulla problematica dell'impatto delle emissioni sonore portuali e sugli interventi di mitigazione ottimali. L'aumento delle competenze tecniche sul rumore e sugli impatti delle sorgenti sonore nei porti è necessario per consentire ai gestori di affrontare adeguatamente il problema, attraverso la applicazione delle azioni di bonifica acustica più efficaci; permette inoltre di aumentare la consapevolezza di tutti gli attori interessati circa la complessità del fenomeno del rumore portuale e circa la natura degli interventi migliorativi applicabili o applicati.

Partendo dal presupposto che l'inquinamento acustico ha una rilevanza ambientale, ma anche sociale, il progetto CLASTER sviluppa nella WP2 tre diversi tipi di realizzazioni innovative che si configurano come utili strumenti per coprire le esigenze identificate:

- la gestione tramite cloud delle campagne di misurazione e dei dati ottenuti da stazioni e centraline di monitoraggio del rumore mediante una rete di sensori con caratteristiche tecniche innovative;
- lo sviluppo di un sistema transfrontaliero ITS integrato di info mobilità basato su App;
- lo sviluppo di una mappatura transfrontaliera che metta in relazione la percezione dell'inquinamento acustico della popolazione e l'inquinamento oggettivamente misurato, infatti il "rumore", non è solo determinato dall'intensità sonora della sorgente che lo produce, ma anche dal modo in cui le persone percepiscono il suono stesso: vi sono fonti sonore che, in rapporto al loro livello di emissione, risultano trascurabili dal punto di vista del contributo alla rumorosità ambientale globale, ma che risultano invece rilevanti per l'impatto prodotto sul cit-

tadino in quanto presentano caratteristiche peculiari di intermittenza, durata, ripetitività che ne incrementano la reazione al fastidio.

3 | Conclusioni e prospettive

In conclusione, Il progetto CLASTER si prefigge di apportare un contributo significativo alla riduzione dell'inquinamento acustico portuale. Attraverso l'implementazione di tecnologie ITS e azioni transfrontaliere di mitigazione mira a una sostanziale diminuzione del rumore nei porti urbani. L'adozione di piani d'azione comuni nei 4 territori partner favorirà l'efficacia delle politiche di gestione del rumore e promuoverà l'adozione di soluzioni sostenibili in tutta la regione mediterranea, contribuendo a una maggiore efficienza e sostenibilità. Il monitoraggio costante del rumore portuale attraverso le mappature che verranno realizzate consentirà una valutazione accurata degli impatti nel tempo e l'identificazione delle aree critiche per interventi mirati. Sensibilizzando gli stakeholder sull'inquinamento acustico e promuovendo una maggiore consapevolezza, si promuoveranno cambiamenti di comportamento per uno sviluppo portuale sostenibile.



Marittimo-IT FR-Maritime

Fig. 3 – Logo di Programma
Program logo

AIA Rivista Italiana di Acustica

Semestrale di diffusione scientifica e tecnica

EDITORIALE/EDITORIAL

Raccogliere il testimone guardando ai prossimi tre anni
Fausti

ARTICOLI SCIENTIFICI/SCIENTIFIC PAPERS

Ottimizzazione delle prestazioni termoacustiche attraverso materiali porosi innovativi: modellazione, analisi e applicazioni

Di Giulio

Machine learning per la separazione e la misura di sorgenti sonore coesistenti in spazi chiusi

De Salvo

Progettazione integrata con cambio di destinazione d'uso di un'aula universitaria per l'ottimizzazione del comfort acustico secondo i CAM

Nora et al.

Association of psychoacoustic metrics with Italian words describing perceptual sound attributes

Maricone et al.

Design di pannelli fonoassorbenti sostenibili costituiti da macroalga bruna *Sargassum*

Pompoli et al.

Normativa acustica ISO 22955:2021 e protocollo volontario WELL per gli uffici open plan: verifica dei criteri di progettazione acustica

Tardini

Coherence-based Beamforming algorithm for vehicle cabin acoustic comfort evaluation

Uffreduzzi et al.

Effects of noise on the cognitive performance of primary school children

Gheller et al.

NOTE TECNICHE/TECHNICAL NOTES

Riqualificazione acustica del Teatro 10 degli Studios di Cinecittà

Tarsitano

Comparing acoustic models with measured noise sources in complex industrial plants – Ammonia production units

Squadrone et al.

VITA DELL'ASSOCIAZIONE/LIFE OF THE ASSOCIATION

Resoconto del Simposio Internazionale AIA-ICA "Ricerche avanzate per la gestione del rumore delle infrastrutture marittime"

Di Bella

PROGETTI DI RICERCA IN ACUSTICA/ACOUSTICS RESEARCH PROJECTS

ActaReBuild – Acoustic and thermal retrofit of office building stock in EU

Piana et al.

Resoconto dell'evento di lancio del progetto Interreg Marittimo Italia-Francia

"CLUSTER"

Borelli et al.



FrancoAngeli
La passione per le conoscenze