

Viaggio nei Laboratori di Acustica: Politecnico di Bari

Ubaldo Ayr^a | Ettore Cirillo^b | Francesco Martellotta^{a*} | Chiara Rubino^a

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

^b Già Professore Ordinario
presso il Politecnico di Bari

* Autore di riferimento:
francesco.martellotta@poliba.it

Ricevuto: 30/4/2025

Accettato: 5/5/2025

DOI: 10.3280/ria1-2025oa20518

ISSN: 2385-2615

In questo articolo viene presentato il Laboratorio di Acustica del Politecnico di Bari, descrivendone la storia, le strutture, la strumentazione, le attività di ricerca e trasferimento tecnologico e le principali collaborazioni.

Parole chiave: Laboratorio di acustica, Politecnico di Bari, acustica dei beni culturali, acustica degli ambienti confinati, acustica dei materiali

Acoustic Laboratory Tour: Polytechnic University of Bari

This article presents the Acoustics Laboratory of the Polytechnic University of Bari, describing its history, structures, instrumentation, research and technological transfer activities and the main collaborations.

Keywords: Acoustics Laboratory, Polytechnic University of Bari, cultural heritage acoustics, room acoustics, material acoustics

1 | Introduzione

Con questo articolo proseguiamo il viaggio a tappe attraverso i Laboratori di Acustica che operano in Italia, siano essi appartenenti ad Università, Politecnici, Enti di Ricerca pubblica oppure Laboratori privati, raccontandone la storia, le strutture e apparecchiature presenti, le principali attività di ricerca e di servizio alle imprese. L'obiettivo è quello di creare una fotografia aggiornata della vasta dotazione di strumentazione e strutture votate all'Acustica presenti nel nostro Paese e di favorire la sinergia tra gruppi di ricerca ed il trasferimento tecnologico tra laboratori e imprese. Il viaggio prosegue con il Laboratorio di Acustica del Politecnico di Bari.

2 | La storia del laboratorio

Il Laboratorio di Acustica del Politecnico di Bari, oggi parte integrante del Laboratorio di Fisica Tecnica del Dipartimento di Architettura, Costruzione e Design, ha una lunga storia alle spalle, iniziata sul finire degli anni Cinquanta del secolo scorso quando, dopo la guerra, all'interno dell'Università degli Studi di Bari venne istituita la Facoltà di Ingegneria. Il primo impulso allo studio dell'acustica venne dato dalla presenza per alcuni anni del prof. Daniele Sette (che poi sarebbe stato fra i fondatori dell'AIA), al quale si deve l'acquisizione delle prime strumentazioni fra cui un fonometro della General Radio (Fig. 1), ottenuto tramite l'Azienda Rilievo Alienazione Residui. Negli anni Sessanta, invece, la presenza per alcuni anni di Italo Barducci come docente, anch'egli Socio Fondatore e poi presidente AIA, vide l'arricchimento della strumentazione con l'acquisizione del tubo di Kundt della Brüel&Kjær tipo 4002, con relativo generatore di segnale, fonometro e banco

di filtri. Negli anni Settanta il Laboratorio vide l'arrivo di Ettore Cirillo che avviò gli studi sulla rumorosità ambientale con particolare riguardo alla rumorosità del traffico urbano. Agli studi teorici seguirono le rilevazioni del rumore del traffico nella città di Bari, i cui risultati furono presentati a Congressi in Italia e all'estero. Infatti, Bari era una delle poche città a possedere dati di rumorosità causata dal traffico urbano. I risultati di queste ricerche furono oggetto di una Conferenza cittadina "Bari: città-ambiente" tenutasi nell'aprile del 1982. In questo periodo il Laboratorio di dotò di una sorgente di rumore di riferimento B&K 4202, diversi fonometri analizzatori B&K (microfoni, preamplificatori, amplificatori di misura, calibratori, registratore grafico, dosimetro/analizzatore statistico elettromeccanico, una sorgente dodecaedrica B&K), nonché un registratore di misura a nastro magnetico portatile Nagra-Kudelski IV SJ per registrazioni calibrate in campo e un generatore di calpestio normalizzato Elit 01. Buona parte delle apparecchiature menzionate sinora sono oggi esposte nella parte "museale" del laboratorio.

Nella seconda metà degli anni Ottanta il Laboratorio iniziò ad identificarsi anche con uno spazio fisico con la realizzazione della prima camera riverberante [1], oggi dismessa per esigenze di rinnovamento edilizio e sostituita con una nuova struttura. La camera aveva forma poligonale con copertura inclinata e aveva dimensioni libere interne di circa 10 m × 5 m in pianta ed un'altezza media di 4 m (Fig. 1).

Negli anni '90 vennero acquisiti due fonometri analizzatori Norsonic SA110 e Larson Davis 2900 e avviati studi sia sul rumore negli ambienti di ufficio, sia sui modelli numerici per la simulazione del campo riverberante[2]. Negli anni 2000, grazie ad una serie di progetti di ricerca finanziati, che contribuiscono a delineare i principali temi di ricerca ancora oggi sviluppati, il Laboratorio arricchì ulteriormente la sua dotazione

strumentale con un sistema di acquisizione a due canali 01dB Symphonie, completa di sonda per misure intensimetriche, due nuove sorgenti sonore omnidirezionali (una B&K e una di maggiore potenza sviluppata in-house), un sistema per la caratterizzazione delle qualità acustiche degli spazi confinati composto da microfono Soundfield MkV e Manichino binaurale B&K 4100D e nel 2006 venne realizzata la camera di ascolto attrezzata con sistema di riproduzione Ambisonic e Stereo-Dipole. In questi anni vennero anche condotti studi sul controllo attivo del rumore nelle canalizzazioni degli impianti ad aria, con la realizzazione di un dimostratore a scala reale[3]. Nel 2018 il Laboratorio ha cambiato sede e si è dotato di una nuova camera riverberante e di una piccola camera anecoica arricchendosi di nuovi strumenti di misura e di software. Nel corso degli anni, il Laboratorio ha offerto supporto alle attività di ricerca, alle attività didattiche nonché alle attività conto terzi e di consulenza scientifica per aziende ed enti.

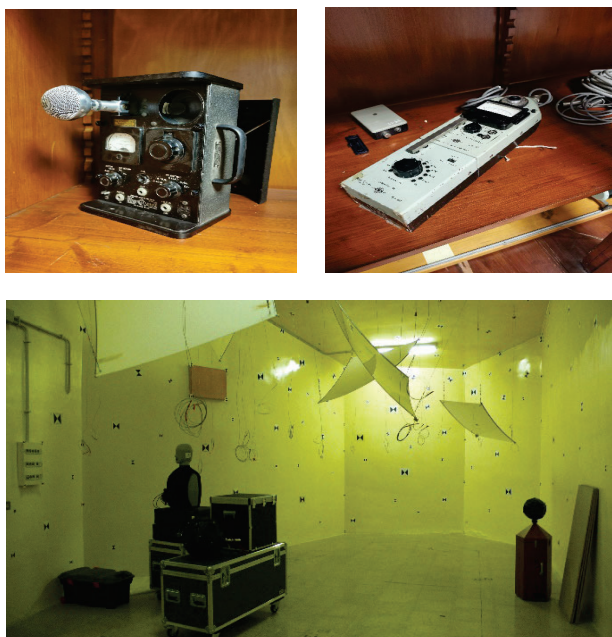


Fig. 1 – Alcuni degli strumenti antichi attualmente in mostra nel “museo” del Laboratorio e immagine della prima camera riverberante, realizzata negli anni '80

Photograph of some of the ancient instruments shown in the Laboratory “museum” and the first reverberant chamber built during the eighties

3 | Principali linee di ricerca

Le principali linee di ricerca attorno alle quali il Laboratorio si è sviluppato ed ampliato possono essere riassunte nelle seguenti:

1. studi sul rumore negli ambienti di lavoro e relazione con l'indoor environment quality (IEQ);
2. valutazione della qualità acustica degli ambienti confinati con particolare riferimento alle chiese e ai teatri;
3. modellazione del campo sonoro negli ambienti chiusi sia mediante modelli analitici sia mediante modelli numerici;
4. misura dell'assorbimento acustico in campo diffuso di materiali e elementi in laboratorio e in opera;

5. tecniche di acquisizione multicanale per la riproduzione e la visualizzazione dei campi sonori;
6. caratterizzazione sperimentale, design e modellazione di materiali fonoassorbenti innovativi.

Nel seguito verranno brevemente descritte le attività svolte in questi ambiti.

3.1 | Studi sul rumore negli ambienti di lavoro e relazione con l'indoor environment quality (IEQ)

I primi studi in questo ambito furono condotti alla fine degli anni '90 partendo dalla rilevazione dei livelli sonori in diversi uffici di Bari. Il Progetto di Ricerca di Interesse Nazionale PRIN 1998/99: “Ingegneria dell'Ambiente interno”, nell'ambito del tema “Analisi critica dei parametri descrittivi del benessere ambientale” offrì l'occasione per completare la campagna di rilevazioni differenziando il campione di ambienti rilevati (uffici, singoli, multipli, ma anche ambienti industriali), ampliando il campo di indagine includendo analisi spettrali, dei parametri statistici, dei principali indici di rumore, e affiancando alle rilevazioni oggettive anche la compilazione di questionari per la raccolta delle sensazioni soggettive, ottenendo così informazioni sui descrittori più idonei e sugli intervalli ottimali dei diversi parametri [4]. A questo studio ha fatto seguito, fra il 2008 e il 2012, una attività commissionata dall'INAIL Puglia, volta alla “caratterizzazione della qualità ambientale negli ambienti di lavoro non industriali”, con particolare riferimento alla grande distribuzione, in occasione della quale il tema è stato ulteriormente sviluppato ed esteso ad includere sia gli aspetti della comunicazione (anche per il tramite di misure di intelligibilità del parlato), sia aspetti non acustici (benessere visivo e termico) [5].

3.2 | Valutazione della qualità acustica degli ambienti confinati con particolare riferimento alle chiese e ai teatri

A partire dal 2002, due PRIN e un contratto di ricerca con il “Teatro Pubblico Pugliese” hanno consolidato questo importante filone di ricerca che era stato avviato con una tesi dottorale sulla caratterizzazione acustica delle chiese romaniche pugliesi. La caratterizzazione della qualità acustica dei grandi spazi, effettuata mediante la ripresa della risposta all'impulso ha comportato la messa a punto di una catena di misura composta da una sorgente omnidirezionale con sub-woofer per estendere la risposta in bassa frequenza e da un insieme di microfoni fra cui un B-format per l'acquisizione del campo sonoro 3D, una coppia binaurale con torso per la caratterizzazione degli effetti spaziali, un array a 32 canali per l'acquisizione del segnale in formato Ambisonic fino al terzo ordine. Con particolare riferimento alle chiese, allo scopo di caratterizzare le molteplici esigenze acustiche e tenere conto delle specificità di questi luoghi, fu messo a punto un protocollo condiviso non solo fra le università coinvolte nel progetto ma con la comunità scientifica internazionale [6].

Accanto alla caratterizzazione oggettiva di questi spazi (Fig. 2), all'interno del Laboratorio è stato condotto uno studio psicoacustico svolto mediante test di ascolto condotti nella camera di ascolto, allestita in modalità stereo-dipole, all'interno della quale un panel di esperti ha svolto una serie di confronti a coppie di brani "auralizzati" per riprodurre gli effetti degli spazi reali effettuando. Da tale indagine sono state tratte importanti informazioni sulle preferenze di ascolto specifiche per gli spazi di culto [7].

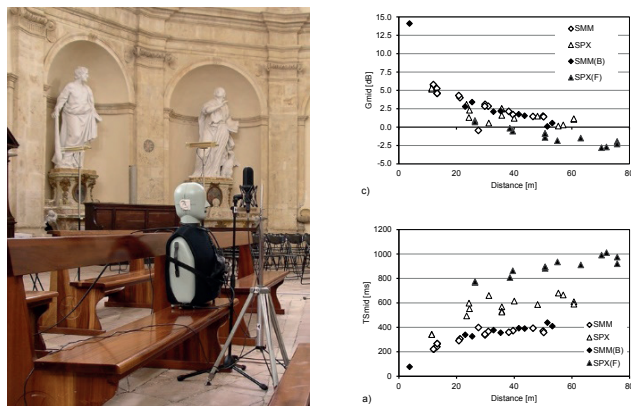


Fig. 2 – Rilevazione della risposta all'impulso binaurale e B-format e successiva analisi della distribuzione spaziale dei parametri
Measurement of binaural and B-format impulse response in a church and subsequent analysis of spatial distribution of measured parameters

Con riferimento agli spazi teatrali fu invece seguito il protocollo messo a punto da Pompoli e Prodi [8] rilevando 24 teatri storici delle diverse province pugliesi, proponendo poi un modello interpretativo dei risultati che partendo dai consolidati modelli di Beranek e Ando per i teatri d'opera è stato generalizzato anche ai teatri di prosa [9].

Ulteriori approfondimenti in questo filone di ricerca sono stati fatti con riferimento alla caratterizzazione acustica delle chiese rupestri [10] e, più recentemente, degli spazi dedicati alla performance corale.

3.3 | Modellazione del campo sonoro negli ambienti chiusi sia mediante modelli analitici sia mediante modelli numerici

Oltre agli studi avviati negli anni '90 sulla modellazione ray tracing [2] i quali ebbero la camera riverberante come caso studio, negli anni successivi, la disponibilità di un'enorme base di dati sperimentali acquisiti durante le attività sul campo ha consentito di portare avanti diversi studi sulla modellazione del campo sonoro, impiegando sia codici di calcolo commerciali basati sul cone-tracing (CATT-Acoustic), che sono stati pertanto verificati in diverse situazioni, sia sviluppando modelli semi-empirici per la modellazione analitica degli effetti di propagazione del campo sonoro [11], anche con riferimento alla presenza di volumi acusticamente accoppiati, sia, infine, arrivando a sviluppare un codice numerico basato sul

metodo del FDTD (Finite Difference Time Domain) con cui, data l'onerosità computazionale, sono stati condotti studi sulla propagazione del suono alle basse frequenze in ambienti di dimensioni contenute [10] (Fig. 3).

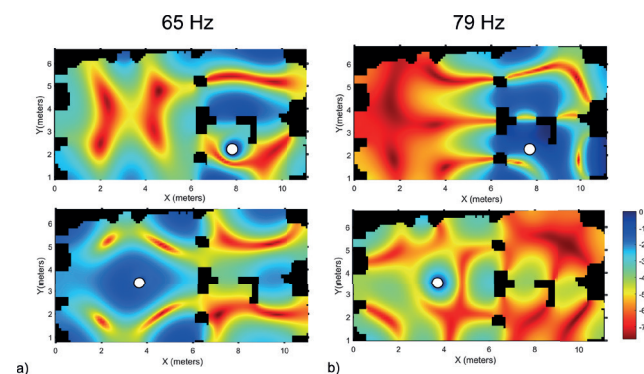


Fig. 3 – Simulazione FDTD della distribuzione dei livelli sonori in corrispondenza di alcune frequenze modali.
FDTD simulation of sound pressure distribution at some modal frequencies

3.4 | Misura dell'assorbimento acustico di materiali e elementi in laboratorio e in opera

La disponibilità di una camera riverberante conforme allo standard ISO 354 [12] ha rappresentato negli anni un punto di forza importante per le attività sperimentali del Laboratorio. Negli anni 2000 la camera fu dotata di un sistema di diffusori fissi in plexiglas che consentirono di rispondere meglio alle specifiche della norma e grazie a ciò, nella camera furono condotti sia test sperimentali funzionali alle attività conto terzi, sia studi legati alla caratterizzazione di "elementi" di più complessa valutazione come sedute, con e senza occupazione [13], tendaggi e arazzi, avendo come obiettivo la definizione non solo di valori utili alla qualificazione secondo normativa, ma soprattutto allo scopo di ottenere valori da impiegare nella pratica sia impiegando approcci analitici (formule di Eyring, Sabine, etc.), sia come dati di ingresso di software di modellazione acustica.

L'impiego di questi ultimi, a partire dai dati raccolti in camera riverberante, ha supportato la validità dell'approccio inverso, proposto da Spagnolo e Benedetto, secondo cui il modo migliore per ottenere i coefficienti da imputare in un software è quello di modellare l'ambiente di test e ottenere per iterazione i coefficienti di assorbimento che restituiscono i parametri acustici misurati (tempo di riverberazione).

Impiegando questo approccio sono state effettuati successivi studi che hanno consentito la caratterizzazione acustica di oggetti difficili da trasportare in laboratorio (come grandi arazzi), direttamente in opera [14].

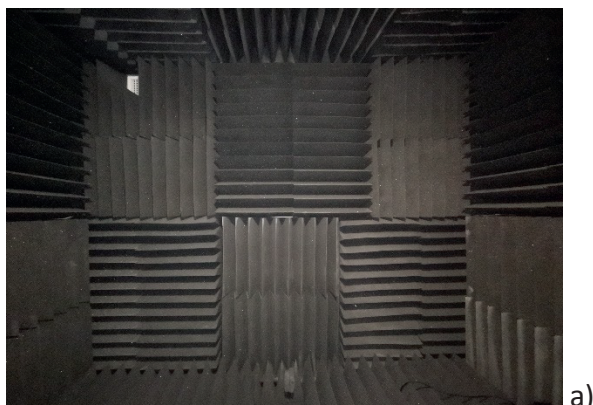
Le esperienze condotte negli anni hanno comunque messo in evidenza la grande "delicatezza" della misura in camera riverberante e, allo scopo di meglio comprendere gli effetti di ciascuna camera sulla misura, nel 2018 il Laboratorio ha partecipato a un Round Robin Test nazionale, i cui esiti hanno

contribuito a supportare i lavori della commissione ISO incaricata della revisione della norma [15].

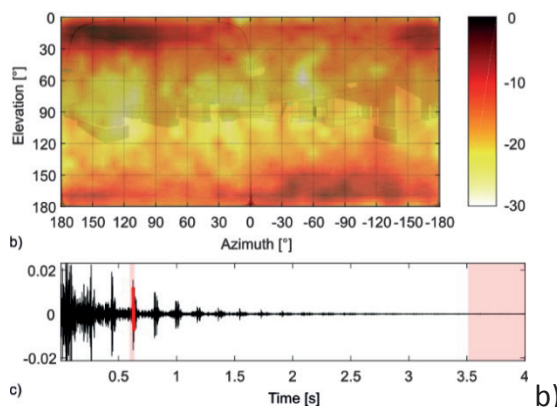


Fig. 4 – Veduta interna della nuova camera riverberante del Laboratorio

Interior view of the new reverberant chamber of the Laboratory



a)



b)

Fig. 5 – Camera d'ascolto del Laboratorio e visualizzazione della distribuzione spaziale delle riflessioni tardive nella Cripta della Cattedrale di Cadice (l'area ombreggiata nella risposta all'impulso denota la porzione di cui sono visualizzati i risultati)
Listening room of the Laboratory and directional reflection maps measured in the Cathedral of Cadiz (shaded areas indicating the time interval portion that is visualized)

Come anticipato, dal 2019 la camera riverberante è stata spostata e riprogettata (Fig. 4), ottimizzando la distribuzione dei diffusori e replicando tutti i test che erano stati condotti nel precedente RRT, impiegando i risultati raccolti per costruire un modello numerico della camera, utile a coadiuvare il posizio-

namento dei campioni e dei punti di misura per minimizzare le deviazioni. Attualmente sono in corso misure per la caratterizzazione di arredi fonoassorbenti a base di scarti tessili.

3.5 | Tecniche di acquisizione multicanale per la riproduzione e la visualizzazione dei campi sonori

Nell'ambito delle attività descritte al punto 3.2, il laboratorio si è dotato negli anni di diversi microfoni Soundfield (un Mk-V e poi un ST-350), e successivamente ha acquisito un Eigenmike 32, con i quali è stato possibile acquisire, per tutti gli ambienti rilevati e per tutte le combinazioni sorgente ricevitore esaminate, almeno la risposta B-format in grado di restituire una scomposizione campo sonoro in formato Ambisonic del primo ordine, fino ad arrivare, grazie all'array a 32 canali, al terzo ordine, così da consentire la riproduzione multicanale all'interno della camera di ascolto (Fig. 5a).

Partendo da questo ricco archivio di risposte all'impulso, accanto all'impiego nell'ambito della camera di ascolto per i test psicoacustici e di preferenza soggettiva, il Laboratorio ha sviluppato un applicativo per la visualizzazione della distribuzione delle riflessioni nel tempo e per l'analisi della diffusione del campo sonoro (Fig. 5b) che è stato impiegato per esaminare e risolvere numerose situazioni in cui le anomalie del campo sonoro risultavano difficilmente spiegabili limitandosi ad una analisi del solo segnale omnidirezionale [16].

3.6 | Caratterizzazione sperimentale, progettazione e modellazione di materiali fonoassorbenti e fonoisolanti innovativi

Il tema della caratterizzazione acustica dei materiali è stato un filo conduttore delle attività del laboratorio, vista la disponibilità sia del tubo di Kundt, sia della camera riverberante. Negli anni 2000 fu messo a punto un sistema per la misura dell'assorbimento acustico in opera secondo normativa UNI ISO 13472-1, testandolo su vari tipi di materiali.

Negli ultimi anni, il Laboratorio ha visto un crescente coinvolgimento su tematiche legate alla caratterizzazione del comportamento acustico di materiali fonoassorbenti ad elevato contenuto di scarti provenienti o dal settore industriale (principalmente tessili) [17], o da quello agricolo (sfalci di potatura o sottoprodotti di altre lavorazioni, come paglia o canapa), unitamente allo sviluppo di metamateriali fonoassorbenti basati sia sull'impiego di membrane microforate [18] sia, in tempi più recenti, di tecniche di manifattura additiva (Fig. 6). Queste ultime sono altresì impiegate nell'ambito di un progetto PRIN per lo sviluppo di elementi fonoisolanti ventilati da impiegare all'interno di finestrature innovative.

La caratterizzazione dei materiali avviene attraverso la misura dell'impedenza superficiale secondo lo standard ISO 10534-2 [19], della resistenza al flusso d'aria secondo la ISO 9053-1 [20], della porosità e della distribuzione dei pori. Ai fini della individuazione delle caratteristiche microstrutturali

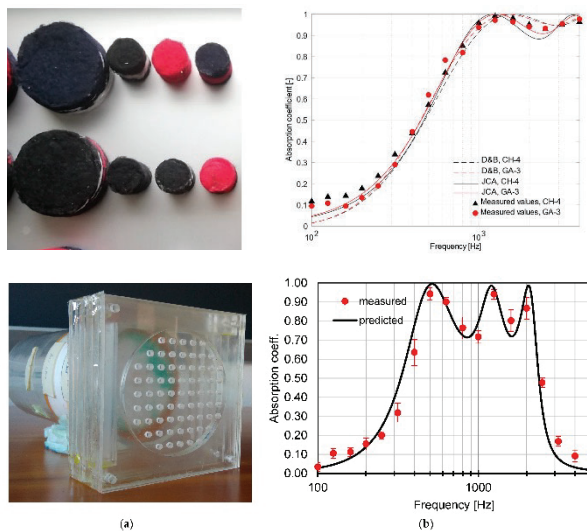


Fig. 6 – Esempi di materiali testati e confronti fra curve sperimentali e curve ottenute per ottimizzazione dei parametri del modello JCA

Examples of tested materials and comparison between experimental curves and those resulting from parameter optimization of JCA model

non misurabili direttamente è stato messo a punto un codice di calcolo che, attraverso un fitting con i valori misurati di assorbimento acustico, estrae i parametri rimanenti una volta prescelto il modello computazionale fra quelli disponibili in letteratura, a partire dal classico Johnson-Champoux-Allard. Dalla conoscenza di tali parametri è poi possibile modellare strutture più complesse e materiali compositi, impiegando il metodo della funzione di trasferimento implementato sia in codici proprietari, sia nel software commerciale Alphacell. Per i materiali per i quali il dato è rilevante, è possibile anche la caratterizzazione della rigidità dinamica secondo ISO 9052-1 [21].

Allo scopo di supportare le attività di ricerca connesse al citato PRIN sulle “meta-finestre” con la caratterizzazione dei metamateriali isolanti ventilati, accanto allo sviluppo di modelli numerici agli elementi finiti sviluppati con il software commerciale Comsol, è stata messa a punto una modifica del tubo ad impedenza per consentire anche la misura del coefficiente di trasmissione col metodo a 4 microfoni (secondo ASTM E2611[22]) e una modifica del sistema per la misura della resistenza al flusso allo scopo di caratterizzare la trasmissione.

4 | Principali dotazioni sperimentali

Il Laboratorio di Fisica Tecnica si è dotato negli anni di diversi apparati di misura per supportare l'attività di ricerca, prima esposta, con una intensa attività sperimentale. Di seguito verranno descritte le principali apparecchiature raggruppate per tipologie.

4.1 | Acustica architettonica

Ai fini della caratterizzazione della propagazione del suono negli ambienti confinati, sono attualmente nella disponibilità

del laboratorio tre diverse sorgenti omnidirezionali di diversa potenza (B&K 4295, Look-Line D301, Outline Globe-source), con i relativi amplificatori, corredate di un subwoofer per misure estese in bassa frequenza fino a 30 Hz. Sul fronte microfonico, accanto ai classici omnidirezionali calibrati da campo diffuso (GRAS 40AR)-si affiancano un Neumann TLM-127 a risposta polare variabile, un Soundfield ST350 portatile, una testa binaurale (B&K 4100D) e un array sferico Eigenmike 32 (Fig. 7). Ad eccezione di quest'ultimo che dispone di una scheda di acquisizione dedicata, la catena di misura è completata da diverse schede audio multicanali gestite tramite un software di acquisizione e analisi interamente sviluppato in Matlab in modo da assicurare una costante adattabilità alle esigenze della ricerca.



Fig. 7 – Tipico setup di misura per acquisizione della risposta all'impulso in ambiente chiuso
Typical measurement setup for impulse response acquisition in indoor environment

Sono inoltre disponibili registratori digitali portatili a 2 e 4 canali per misure in luoghi sprovvisti di alimentazione elettrica e un sistema di acquisizione ad alta frequenza di campionamento (corredato di microfono da 1/8" GRAS 40DP) con sorgente sonora tetraedrica miniaturizzata e generatore di scintille per effettuare misurazioni su modelli in scala.

Sul fronte software il Laboratorio dispone della suite CATT Acoustic per la modellazione conetracing della propagazione del suono in ambiente confinato, unitamente ad altri tool opensource (i-Simpa, Pachyderm).

4.2 | Acustica ambientale/edilizia

Sul fronte delle misure di acustica ambientale ed edilizia, il Laboratorio dispone di un fonometro a due canali 01dB Symphonie e un fonometro palmare 01dB Solo, corredati di microfoni ad incidenza casuale (GRAS 40 AR) e direttivi (MCE 212), con possibilità di collegare al sistema bicanale anche una sonda intensimetrica. Per misure di isolamento di facciata è in dotazione una sorgente direttiva Lookline FL01 con il relativo amplificatore e una sorgente di calpestio normalizzata Elit01.

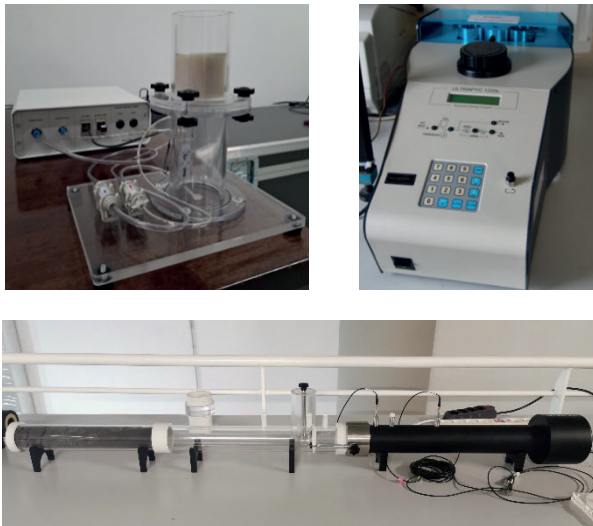


Fig. 8 – Dispositivo per la misura della resistenza al flusso, della porosità e tubo ad onde stazionarie adattato per la misura della trasmissione

Device for air flow resistance measurement, porosity and standing-wave tube adapted for transmission coefficient measurement.

4.3 | Acustica dei materiali

Per la caratterizzazione acustica dei materiali su piccoli campioni vengono impiegati un tubo ad impedenza BSWA SW260, con relativo amplificatore e scheda di acquisizione bicanale, cui è stato affiancato un alimentatore e condizionatore di segnale a quattro canali, unitamente ad una estensione del tubo e del portacampione, funzionale ad effettuare anche misure di trasmissione per i materiali per i quali questa proprietà è significativa (Fig. 8). L'acquisizione ed elaborazione dei segnali viene effettuata mediante software proprietario sviluppato in Matlab. In collaborazione con una azienda locale (Kleitek) è stato sviluppato un dispositivo per la misura della resistenza al flusso d'aria secondo il metodo del flusso stazionario, mentre le misure di porosità e di distribuzione dei pori vengono effettuate con un picnometro ad elio (ULTRAPYC 1200-e Quantachrome) e un porosimetro (Quantachrome Autosorb Ai). Ai fini della caratterizzazione della rigidità dinamica, invece, sono impiegati uno shaker Dataphysics con relativo amplificatore, accelerometri monoassiali e un sensore di forza e accelerazione con relativi condizionatori di segnale.

Sul fronte software il Laboratorio dispone del tool Alpha-cell di Matelys per la modellazione di sistemi complessi di materiali fonoassorbenti, e del pacchetto Comsol per simulazioni acustiche e fluidodinamiche agli elementi finiti.

5 | Collaborazioni

Nel corso degli anni il Laboratorio ha ospitato diversi dottorandi provenienti da università estere, con le quali sono state conseguentemente instaurate proficue collaborazioni scientifiche (in particolare con l'Università di Siviglia e l'Università di Biskra in Algeria) [23,24].

In termini di collaborazioni istituzionali, il Laboratorio, come delineato nelle sezioni precedenti, ha sviluppato numerose collaborazioni con altre università italiane e, nel contempo, ha svolto attività di ricerca in convenzione con l'INAIL Puglia, con il Teatro Pubblico Pugliese, con la Conferenza Episcopale Italiana, con l'Associazione Regionale dei Cori Pugliesi e con la Fondazione Paolo Grassi. Inoltre, il Laboratorio ha svolto attività di consulenza scientifica e supporto sia per la progettazione acustica dell'Auditorium del Conservatorio di Bari sia per l'adeguamento acustico di numerosi luoghi di culto. Attualmente, è in corso una convenzione con l'Autorità Portuale di Bari per il monitoraggio acustico dell'area portuale. In parallelo a tali attività, il Laboratorio offre i propri servizi di misurazione e certificazione acustica ad aziende e privati.

Bibliografia

- [1] E. Cirillo, A. Scaramuzzi, G. Talucci, "La camera riverberante dell'Istituto di Fisica Tecnica e Impianti Termotecnici di Bari"; Atti del Convegno Nazionale AIA, Catania 22-24 aprile 1987, 81-85.
- [2] U. Ayr, F. Piccininni, "Metodo del tracciamento dei raggi sonori: algoritmo e verifica sperimentale", Rivista Italiana di Acustica Gennaio-Giugno 1997.
- [3] U. Ayr, E. Cirillo, "Controllo attivo del rumore di bassa frequenza negli impianti RCV: un sistema sperimentale", 31° Convegno Nazionale AIA, Venezia, 2004.
- [4] U. Ayr, E. Cirillo, F. Martellotta, "An Experimental Study on Noise Indices in Air Conditioned Offices", Applied Acoustics, 62(6) (2001), 633-643.
- [5] Della Crociata S., Simone A., Martellotta F., "Acoustic comfort evaluation for hypermarket workers", Building and Environment 59 (2013) 369-378.
- [6] Martellotta F., Cirillo E., Carbonari A., Ricciardi P., "Guidelines for acoustical measurements in churches", Applied Acoustics 70 (2009), pp. 378-388, doi: 10.1016/j.apacoust.2008.04.004.
- [7] Martellotta F., "Subjective study of preferred listening conditions in Italian Catholic churches", Journal of Sound and Vibration, 317(1-2), (2008) 378-399.
- [8] Prodi N., Pompili R., "Guidelines for acoustical measurements inside historical opera houses: procedures and validation", J. Sound Vib., (2000), 232 (1), 281-301.
- [9] Martellotta F., "L'acustica dei Teatri Storici Pugliesi: un ulteriore sviluppo della ricerca", Atti del Convegno: Teatri d'Opera dell'Unità d'Italia, Venezia, 23 Novembre 2011.
- [10] F. Martellotta, S. Liuzzi, C. Rubino, "Reviving the Low-Frequency Response of a Rupestrian Church by Means of FDTD Simulation", Acoustics 5 (2), 396-413, 2023.
- [11] Martellotta F., "A multi-rate decay model to predict energy-based acoustic parameters in churches" J. Acoust. Soc. Am., 125(3), (2009), 1281-1284.
- [12] ISO 354:2003 Acoustics — Measurement of sound absorption in a reverberation room.
- [13] Martellotta F., D'Alba M., Della Crociata S., "Laboratory measurement of sound absorption of occupied pews and standing audiences", Applied Acoustics, 72 (2011), 341-349.
- [14] Martellotta, F., Pon, L., "On-site acoustical characterization of Baroque tapestries: The Barberini collection at St. John the

- Divine Cathedral", *Journal of the Acoustical Society of America*, 144(3) (2018), 1615-1626.
- [15] Scrosati C., Martellotta F., Pompoli F., [...], Di Filippo S., "Towards more reliable measurements of sound absorption coefficient in reverberation rooms: an Inter-Laboratory Test", *Appl. Acoust.*, 2020, 165, 107298.
- [16] Martellotta F., "On the use of microphone arrays to visualize spatial sound field information", *Applied Acoustics*, 74 (2013), 987–1000.
- [17] Rubino, C., Bonet Aracil, M., Liuzzi, S., Stefanizzi, P., Martellotta, F., "Wool waste used as sustainable nonwoven for building applications", *Journal of Cleaner Production*, 2021, 278, 123905.
- [18] Pan L, Martellotta F., "A Parametric Study of the Acoustic Performance of Resonant Absorbers Made of Micro-perforated Membranes and Perforated Panels", *Applied Sciences*, 10 (2020), Article number 1581, DOI: 10.3390/app10051581.
- [19] 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*.
- [20] ISO 9053-1:2018, *Acoustics — Determination of airflow resistance Part 1: Static airflow method*.
- [21] ISO 9052-1:1989 *Acoustics – Determination of dynamic stiffness Part 1: Materials used under floating floors in dwellings*.
- [22] ASTM E2611-19, *Standard Test Method for Normal Incidence Determination of Porous Material Acoustical Properties Based on the Transfer Matrix Method*.
- [23] Martellotta F., L. Álvarez-Morales; S. Girón; T. Zamarreño, "An investigation of multi-rate sound decay under strongly non-diffuse conditions: the Crypt of the Cathedral of Cadiz", *J Sound and Vibration* 421 (2018), 261-274. DOI: 10.1016/j.jsv.2018.02.011.
- [24] Benferhat, M.L., Debache B.S., Bouttout A., Martellotta F., *Acoustical characterization of three Ottoman masjids built in Algeria, Building Acoustics* 29(4), pp. 481–501, 2022.

Copyright © FrancoAngeli.

This work is released under Creative Commons Attribution - Non-Commercial – No Derivatives License.

For terms and conditions of usage please see:

<http://creativecommons.org>.