

STUDIO E PROPOSTE DI MIGLIORAMENTO DEL COMPORTAMENTO ACUSTICO DI LOCALI UNIVERSITARI

STUDY AND PROPOSAL FOR IMPROVEMENT OF ACOUSTICAL BEHAVIOUR OF UNIVERSITY LOCATION

Fabio Brocchi *, Simone Secchi

Università degli Studi di Firenze

* Indirizzo dell'autore di riferimento - Corresponding author's address:

Via Calvana e Bollacchione, 19 - 51100, Pistoia, Italia

e-mail: brocchi_fabio@alice.it

(Ricevuto il 28/02/2018, accettato il 05/12/2018)

RIASSUNTO

La presente costituisce un'analisi del comportamento acustico di alcuni ambienti dell'Ateneo Fiorentino corrispondenti ad una casistica di tipi architettonici quanto più varia possibile. Al fine di migliorare le prestazioni di suddetti locali, si è progettato, mediante l'utilizzo di software agli elementi finiti, un sistema di pannelli fonoassorbenti che garantisca la massima efficienza, ai fini del raggiungimento dei limiti suggeriti dalla normativa nazionale e tecnica. Si è in seguito validato lo studio previsionale mediante verifiche sperimentali effettuate su un prototipo e infine si sono determinate le prestazioni di un locale a seguito dell'inserimento dei pannelli progettati.

ABSTRACT

This paper consists in an analysis of the acoustic behavior of some rooms of the University of Florence, corresponding to a series of architectural types as varied as possible. In order to improve the performance of the aforesaid rooms, a system of sound-absorbing panels was designed using finite element software to guarantee maximum efficiency, in order to achieve the limits suggested by national and technical legislation. The foresight study was then validated by experimental checks carried out on a prototype and the performance of a room was determined following the insertion of the designed panels.

Parole chiave: Sistemi Fonoassorbenti; Analisi FEM; Acustica dei locali scolastici.

Keywords: Sound-absorbing system; FEM Analysis; School environments acoustic.

1. Introduzione

Sale conferenze, auditorium, ma anche aule e spazi destinati a seminari e in generale tutti gli ambienti destinati all'ascolto, necessitano di una progettazione attenta ai requisiti acustici che tali locali richiedono, tenendo conto della configurazione planivolumetrica, della distribuzione delle unità assorbenti, degli eventuali provvedimenti da prendere nei confronti di potenziali fonti di disturbo, della distribuzione degli ascoltatori, della posizione della sorgente, dell'eventuale inserimento di dispositivi elettroacustici di supporto, ecc.

La forma dell'ambiente, come specificato sopra, risulta essere alla base della percezione del livello sonoro in un locale. Per una configurazione semplice dell'ambiente, ad esempio di forma parallelepipedica, è necessario verificare che non si vengano a creare fenomeni di risonanza, dovuti alla formazione di onde stazionarie. Si dovranno analizzare dunque sia la propagazione dei raggi sonori dalla sorgente agli ascoltatori, sia tutti i raggi riflessi sulle superfici riflettenti del locale per mezzo, ad esempio, di software di ray-tracing. In questo modo otterremo la maggior parte dei parametri necessari alla classificazione del locale, che mettano in luce eventuali carenze in determinati punti del locale. Tale analisi può condurre, quindi, ad un cambiamento della forma planivolumetrica del locale, in base alle informazioni ottenute, iterando l'analisi acustica con la progettazione architettonica, e viceversa, fino ad arrivare al risultato ricercato.

La progettazione dei sistemi di fonoassorbimento riveste pertanto un'importanza particolare nel processo progettuale di miglioramento della qualità acustica negli ambienti. Potersi affrancare dalle soluzioni standardizzate proposte dal mercato e realizzare, con costi contenuti, sistemi ad hoc che possano risolvere specificatamente le problematiche presentate dai locali in esame risulta essere una possibilità estremamente importante fornita al progettista. Lo studio di sistemi specifici può essere condotto mediante algoritmi semplificati proposti da letteratura scientifica o tramite software, fino ad arrivare ad una modellazione estremamente realistica del sistema in esame.

Nell'articolo è riportata un'analisi parametrica di un sistema fonoassorbente, che funzioni mediante un meccanismo di assorbimento per risonanza di cavità. Tale studio è stato effettuato mediante software specifici agli elementi finiti. L'elemento studiato, realizzato in forma di prototipo validato mediante verifiche sperimentali, viene valutato per la possibilità di produzione e l'inserimento in locali universitari.

2. Indagini sperimentali sugli ambienti universitari presi ad esame

Si è effettuata, al fine di valutarne in maniera adeguata le caratteristiche acustiche, una campagna di misurazioni condotta in locali tipologicamente rappresentativi di un'ampia gamma di casistiche che coprono, quanto più esaustivamente possibile, gran parte della forma e delle funzioni di locali dell'ateneo fiorentino. Si è utilizzato il metodo della sorgente stazionaria interrotta o il metodo della sorgente impulsiva. La mappatura degli ambienti è stata condotta selezionando locali che potessero fornire un campione adeguatamente rappresentativo della maggior parte degli ambienti universitari. Sono stati scelti soltanto ambienti che non presentassero sistemi di fonoassorbimento o di controllo della qualità acustica interna. Nell'articolo sono riportati in dettaglio i risultati delle misurazioni condotte nell'ambiente dell'Aula seminari della Scuola di Architettura di Firenze, per la quale è stato progettato e realizzato il prototipo di sistema fonoassorbente oggetto del presente studio, ed un confronto dei tempi di riverberazione medi di vari locali analizzati.

2.1 Indagini sperimentali sugli ambienti universitari presi ad esame

L'Aula seminari della Scuola di Architettura di Firenze, nel complesso di Santa Teresa, allo stato attuale, presenta una conformazione geometrica approssimativamente cubica, a pianta centrale, con dimensioni in pianta di circa 6.45m x 7.0m, con un'altezza di circa 4.45m all'imposta e di 7 m massima, e coperta con volta a crociera. Presenta inoltre due aperture vetrate che affacciano sul corridoio della facoltà e due aperture che affacciano su di un cortile interno attualmente non in uso. Vi sono poi due arcate, anch'esse vetrate, che collegano l'aula con le altre aule a questa adiacenti. Tutti i materiali presenti al momento delle misurazioni nell'aula in oggetto risultano pertanto essere fortemente riflettenti: alle pareti ed a soffitto abbiamo intonaco in calce, il pavimento è realizzato mediante grès ad effetto pietra e tutte le aperture sono realizzate in vetro. Tale composizione materica, considerati anche il volume e la forma cubica dell'aula, rende immediato stimare il comportamento acustico dell'ambiente come fortemente riverberante. Un tempo di riverbero eccessivo può comportare, per aule di volumetria ridotta, difficoltà nella comprensione del parlato ed un eccessivo affaticamento da parte degli oratori. Tali problematiche possono compromettere la funzionalità di locali dedicati all'ascolto del parlato. Si sono effettuate misurazioni del tempo di riverberazione nelle bande di terzi d'ottava da 50 Hz a 10 kHz. Il grafico di Figura 1 riporta i risultati delle misure, comprensive del valore medio e della deviazione standard per la valutazione dell'incertezza di misura.

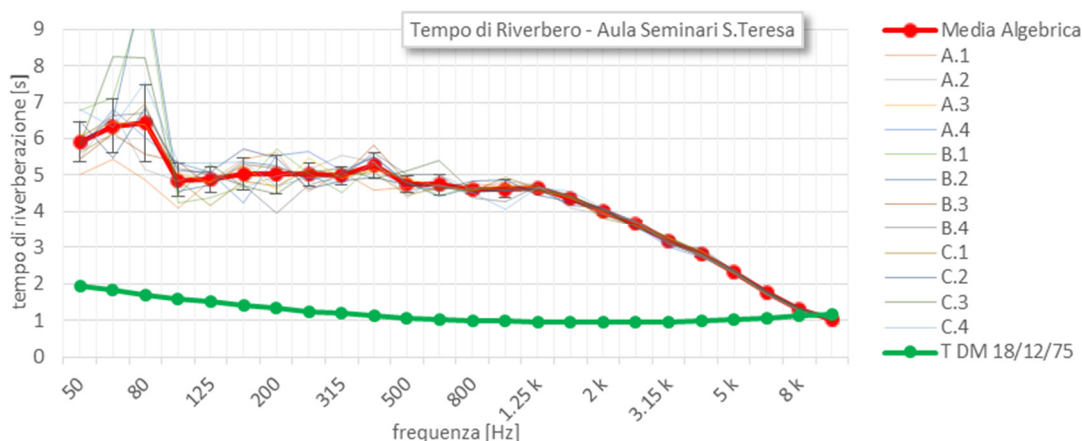


Figura 1 – Tempo di riverberazione del locale oggetto di studio - Reverberation time in study room.

Si osserva, dai valori mostrati precedentemente, un marcato superamento dei valori limite imposti dal DM 18/12/75, che si attesta in una differenza di oltre 4 secondi alle basse frequenze.

Il valore ottimale del tempo di riverberazione dettato dalla UNI 11367 (richiamata dal DM 11/1/17) ad ambiente non occupato, deve invece rispettare, in tutte le bande di ottava comprese fra 250 Hz e 4 kHz, il seguente valore: $T_{60} = 1.0$ s, valore più restrittivo di quanto prescritto dal DM 18/12/1975. Il tempo di riverbero misurato si dimostra essere comunque, prescindendo dai diversi limiti normativi che risultano comunque abbondantemente superati, eccessivamente alto, in special modo per ambienti ove l'intelligibilità del parlato e la qualità acustica interna risultano molto importanti. Si rende pertanto necessaria una correzione acustica mirata alle caratteristiche del locale in questione affinché si possa garantire la corretta funzionalità dello stesso.

2.2 Confronto tra gli ambienti analizzati

Gli ambienti analizzati mirano a coprire in maniera quanto più esaustiva possibile diversi tipi di locale universitario, differenti sia per conformazione architettonica, che per funzione che per dimensioni. Non si pretende di stilare una valutazione completa di tutti i possibili locali d'uso universitario, ma si cerca di riportare una descrizione quanto più completa possibile. Si sono individuati diversi tipi di locale suddivisi, nello specifico:

- Suddivisione per funzione: ambienti dedicati ad eventi ufficiali (mostre, proclamazioni), ambienti dedicati alla didattica tradizionale, ambienti dedicati a seminari;
- Suddivisione per conformazione architettonica: ambienti a pianta centrale, ambienti a pianta rettangolare, ambienti a gradoni;
- Suddivisione per dimensione: ambienti di piccola/media volumetria, ambienti di grande volumetria.

Gli ambienti analizzati risultano, per la maggior parte, ambienti di particolare pregio storico-architettonico, privi, come già specificato, di preesistenti sistemi di controllo della qualità acustica interna.

Si vogliono valutare, ora, le diverse caratteristiche acustiche dei locali analizzati, pur tenendo ben presenti le differenze, non trascurabili, tra i vari ambienti, di funzione, volumetria o caratteristiche geometriche. Tuttavia, si ritiene che un confronto tra tali caratteristiche possa permettere di valutare, per comparazione, gli ambienti che maggiormente necessitano di un intervento di riqualificazione acustica.

Non risulta tuttavia possibile, vista la limitata campagna di misure effettuata, assegnare a tali risultati una validità statistica che possa essere estesa ad altri locali dell'ateneo fiorentino, per quanto simili possano essere a quelli esaminati.

Ad ogni modo, i locali analizzati, come specificato precedentemente, sono sufficienti a coprire un'ampia casistica, e le analisi effettuate possono essere utilizzate come base di partenza per una campagna di misure più approfondita.

Si riportano quindi, per mezzo di un grafico riassuntivo (Figura 2), gli andamenti dei valori medi del tempo di riverberazione misurato in bande di terzi d'ottave.

Gli ambienti in cui abbiamo effettuato verifiche risultano essere i seguenti:

- *Sala Proclamazioni* della Scuola di Ingegneria di Firenze, Santa Marta;
- *Aula 1* della Scuola di Architettura di Firenze, Santa Verdiana;
- *Aula 8* della Scuola di Architettura di Firenze, Santa Verdiana;
- *Chiesetta Sconsacrata* della Scuola di Architettura di Firenze, Santa Verdiana;
- *Aula 111* della Scuola di Ingegneria di Firenze, Santa Marta;
- *Aula Seminari* della Scuola di Architettura di Firenze, Santa Teresa.

Osserviamo come, con l'eccezione dell'Aula 8 della Scuola di Architettura di Firenze, nel complesso di Santa Verdiana e dell'Aula 111 della Scuola di Ingegneria di Firenze, nel complesso di Santa Marta, che presentano comportamenti acustici, se non rispettosi dei requisiti minimi imposti, quantomeno accettabili, gli altri ambienti oggetto di analisi risultano particolarmente problematici, sotto il profilo dell'acustica interna. In particolare si osserva come l'andamento del tempo di riverbero dell'Aula seminari della Scuola di Architettura di Firenze risulta estremamente alto alle medio-basse frequenze, sensibilmente maggiore di tutti gli altri ambienti oggetto di studio, e tale da renderlo difficilmente utilizzabile.

Viste le peculiarità e le necessità evidenti di una correzione acustica di quest'ultimo ambiente, nel prosieguo della trattazione analizzeremo il locale mediante software specifici di modellazione acustica e valuteremo strategie mirate di correzione attraverso l'inserimento di pannelli forati adeguatamente progettati e valutati sperimentalmente.

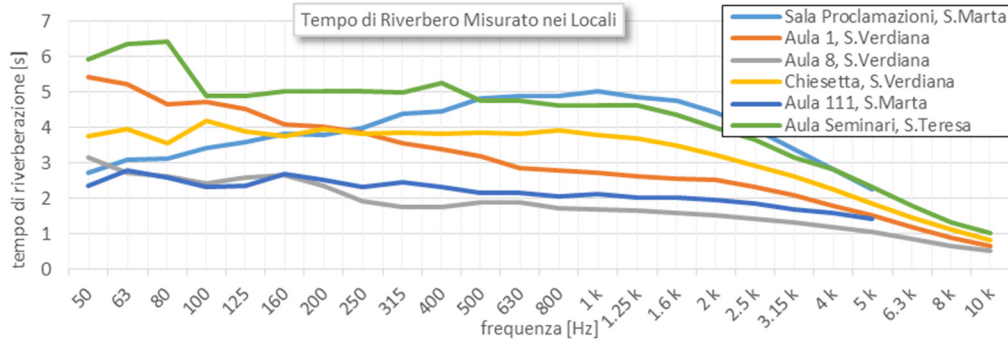


Figura 2 – Tempi di riverberazione degli ambienti analizzati - Reverberation time in study rooms.

3. Studio, progettazione e realizzazione di un pannello fonoassorbente per il miglioramento acustico di locali universitari

3.1 Sistemi di assorbimento per risonanza di cavità

Gli assorbitori per risonanza utilizzati in edilizia sono sistemi derivati da i cosiddetti risuonatori di Helmholtz, costituiti da un volume d'aria contenuto in una cavità con pareti rigide, collegato all'esterno mediante un'apertura detta collo del risuonatore. Tale risuonatore si comporta quindi come un sistema massa-molla, dove l'aria contenuta nella cavità si comporta come una massa vibrante e l'aria contenuta nel collo come una molla acustica. Richiamando le note formule per la determinazione della frequenza di risonanza dei sistemi ad un grado di libertà, in analogia con il comportamento meccanico delle strutture, possiamo ricavare la relazione:

$$(1) \quad f_0 = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{k}{M}} \quad [\text{Hz}]$$

dove:

k è la rigidezza della molla [N/m];

M è la massa del sistema [kg].

Da tale espressione, considerando il sistema adiabatico e le variazioni di pressione per unità di lunghezza, si ottiene:

$$(2) \quad f_0 = \frac{c}{2\pi} \sqrt{\frac{S}{Vl}} \quad [\text{Hz}]$$

dove:

c è la velocità del suono per il fluido considerato [m/s];

S è l'area di apertura del collo del risuonatore [m²];

V è il volume della cavità d'aria [m³];

l è la lunghezza del collo del risuonatore [m].

In alcune trattazioni, alla lunghezza del collo viene sostituita una lunghezza equivalente al fine di considerare le perdite viscosive alla bocca dell'apertura. Si nota come il valore della frequenza di risonanza sia proporzionale all'area dell'apertura e inversamente proporzionale alla lunghezza del collo e al volume della cavità. Il comportamento fonoassorbente di tali sistemi risulta quindi molto selettivo, con valori molto alti per la frequenza di risonanza, generalmente compresa in un range di frequenze tra i 50 e i 500 Hz. Possiamo rivestire l'interno dei risuonatori con materiale poroso fonoassorbente: in tal modo si riduce l'efficienza di fonoassorbimento alla frequenza di risonanza, ma si allarga l'intervallo di frequenze alla quale opera il risuonatore.

In edilizia, un'applicazione comune di tali risuonatori risulta costituita dai pannelli forati. Tali sistemi sono caratterizzati da una struttura rigida forata, collocata ad una certa distanza dalla parete ed eventualmente riempita di materiale fonoassorbente poroso. Possiamo considerare tale sistema come un insieme di risuonatori in cui ogni foro si comporta analogamente al collo del risuonatore di Helmholtz, e la parte d'aria corrispondente al foro rappresenta la cavità del risuonatore.

Risulta tuttavia corretto considerare formule che contemplino adeguati fattori correttivi che ci consentano di valutare la dispersione dell'onda sonora all'uscita del collo del risuonatore, in quanto, in condizioni reali, non è possibile valutare il comportamento del fluido assimilabile a quello di un'onda piana.

Dobbiamo pertanto considerare un incremento della lunghezza d'onda della frequenza di risonanza, di valore proporzionale al raggio del foro. Quindi, la lunghezza dello spessore del pannello deve essere sostituita da una lunghezza maggiore, che consideri anche il contributo di dispersione dell'onda dovuto alla dimensione del foro. Inoltre, il valore della frequenza di risonanza dipende dalla forma e dalle dimensioni del risuonatore (si ricorda che l'ordine di grandezza influisce, a causa del comportamento ondulatorio del fenomeno sonoro, in maniera non lineare).

Per risuonatori tradizionali, la letteratura scientifica propone di adottare un coefficiente di correzione $\gamma = 0.82$ [6].

$$(3) \quad f_0 = \frac{c}{2\pi} \sqrt{\frac{S}{V \cdot (L + \gamma a)}} \quad [\text{Hz}]$$

dove:

c è la velocità del suono per il fluido considerato [m/s];

S è l'area di apertura del collo del risuonatore [m²];

V è il volume della cavità d'aria [m³];

l è la lunghezza del collo del risuonatore [m];

a è la lunghezza del raggio del foro [m];

γ è un coefficiente correttivo che vale 0.82.

Nelle valutazioni che condurremo in seguito utilizzeremo pertanto tale formulazione per ricavare la frequenza di risonanza di un risuonatore per cavità.

Tuttavia, il comportamento di un pannello forato risulta molto diverso da quello di un risuonatore singolo. In presenza di più fori abbiamo l'interazione tra le varie cavità che, si specifica, non sono separate da pareti rigide l'una dall'altra.

A causa di tale comportamento, i pannelli forati hanno uno spettro di assorbimento più ampio rispetto ai risonatori singoli. Agendo sulle dimensioni dei fori, sullo spessore del pannello e dell'intercapedine e sulla percentuale di foratura possiamo tuttavia calibrare il pannello affinché si riesca ad ottenere un coefficiente di assorbimento acustico massimo alle frequenze desiderate.

Tali sistemi risultano pertanto utilizzabili in ambienti per i quali si abbia bisogno di una correzione specifica in un determinato range di frequenze. Si analizzeranno in seguito, nella presente trattazione, i risonatori di Helmholtz più approfonditamente, avvalendoci anche di software di calcolo specifici.

3.2 Metodo agli elementi finiti [FEM] per l'acustica

Il metodo agli elementi finiti è una tecnica numerica comunemente utilizzata in problemi di ingegneria, fluidodinamica, meccanica delle strutture, che consente di risolvere sistemi descritti da equazioni differenziali alle derivate parziali; l'acronimo FEM deriva dall'inglese "Finite Element Method".

Il metodo suddivide il modello in elementi di una determinata forma, discretizzando un modello continuo in un modello discreto e pertanto risolubile per mezzo di procedure codificate. La procedura seguita è composta da due fasi distinte: in primis si semplifica il modello reale ad uno ideale semplificato, che tenga conto del grado di precisione che si necessita. Suddivideremo quindi detto modello semplificato in una mesh discreta di elementi finiti. La procedura consentirà quindi di risolvere le equazioni di governo del modello per tutti i nodi di discretizzazione, utilizzando funzioni di forma ("shape functions") polinomiali per garantire precisione e accuratezza nel passaggio tra un elemento ed il successivo.

Nel caso in analisi, il problema posto è descrivibile come un "problema non accoppiato" ovvero la pressione acustica esercita una sollecitazione trascurabile sulla struttura. Saranno pertanto considerate tutte le strutture facenti parte dell'analisi, in prima approssimazione, come infinitamente rigide, e non interessate da fenomeni vibroacustici.

L'attuale letteratura scientifica [2] ha dimostrato che, per garantire la validità della soluzione, risulta necessario discretizzare il modello in un numero di elementi sufficientemente elevato, in modo da garantire, per ogni lunghezza d'onda, almeno 6 elementi (altri autori consigliano, più cautelativamente, 10 elementi). Considereremo nelle nostre analisi almeno 8 elementi per lunghezza d'onda. Nel nostro caso specifico, la valutazione del potere fonoassorbente del pannello oggetto di studio è stata condotta mediante il software commerciale CFD FEM COMSOL® Multiphysics.

3.3 Analisi di un risonatore di Helmholtz ideale mediante metodo agli elementi finiti

Si è scelto di intraprendere, a questo punto, un'analisi semplificata, al fine di validare il modello agli elementi finiti che utilizzeremo in seguito. Confrontando i risultati ottenuti con quelli derivanti dalle relazioni teoriche, stabiliremo il campo di applicabilità di detti modelli. In questa analisi valuteremo un semplice esempio di risonatore di Helmholtz ideale, sferico, realizzato mediante un modello geometrico

assialsimmetrico, costituito da un tubo e un volume chiuso posti in serie, sottoposti ad una sollecitazione armonica di pressione all'estremità. Si è scelto di realizzare, sfruttando la simmetria assiale, un modello bidimensionale sottoposto in seguito ad una rivoluzione attorno all'asse centrale. Tale scelta è stata presa per poter aumentare la precisione e il numero di elementi finiti in cui si scomporrà il modello e diminuire, conseguentemente, i tempi di computazione. Si è realizzato, in tal modo, un volume sferico sormontato da un elemento cilindrico. Il raggio della sfera ha una dimensione di 0.1 m, mentre il raggio del collo ha una lunghezza di 0.01 m. L'altezza del collo, viceversa, al fine di testare la bontà della simulazione, è stata fatta variare in un range da 0.001 m fino a 0.1 m, a passi di 0.005 m. Si è utilizzata tale conformazione geometrica per richiamare, quanto più possibile, i primi risuonatori realizzati alla fine del XIX secolo, su progetto dello stesso Helmholtz. Il modello realizzato consta di pareti rigide, condizione di Sound Hard Boundary Wall. Si è assegnato un valore di pressione imposta (pari ad 1Pa) all'estremità del cilindro. Assegneremo, al volume, le caratteristiche del materiale Air implementate nel software.

A seguito della discretizzazione del modello in 45713 elementi (si è impostato una lunghezza massima di ogni elemento pari ad 1mm) otteniamo la frequenza massima per la quale valgono i risultati proposti: $f_{lim} \sim 42875$ [Hz]. Effettueremo uno studio nel dominio delle frequenze, in un range da 1Hz a 500Hz, procedendo a passi di 1Hz. La Figura 3 riporta la variazione della pressione media di diversi risuonatori in funzione della frequenza, valutata mediante il comando Derived Values - Surface Average.

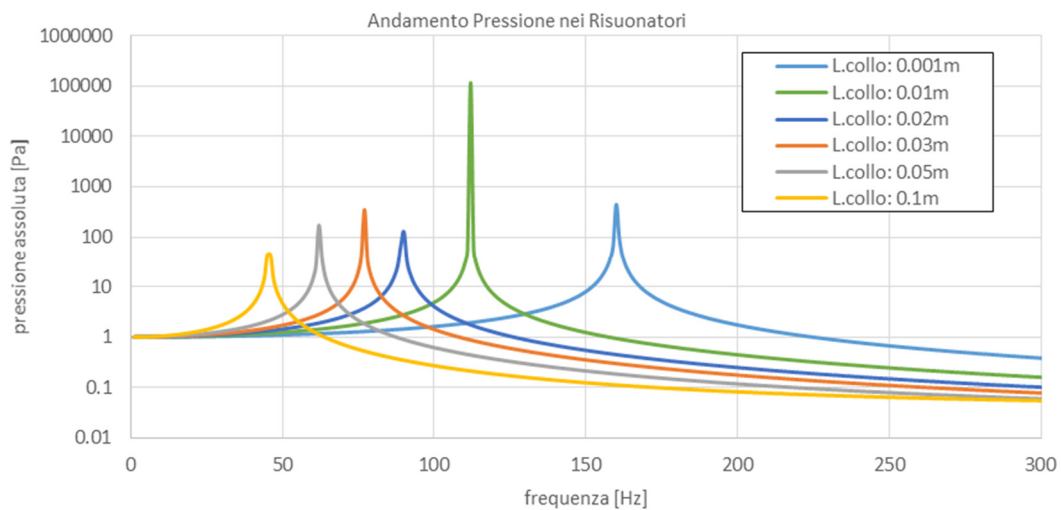


Figura 3 – Andamento della pressione assoluta media nei risuonatori in esame - Average absolute pressure in examined resonators.

Ogni picco corrisponde chiaramente alla frequenza di risonanza propria del risuonatore. Come preventivato, la frequenza di risonanza si abbassa all'aumentare della lunghezza del collo. La Figura 4 mostra il confronto tra il valore teorico della frequenza di risonanza, come descritto dalla relazione (3), con quello ottenuto dalla modellazione agli elementi finiti. Si è scelto, come parametro di controllo, la lunghezza del collo del risuonatore.

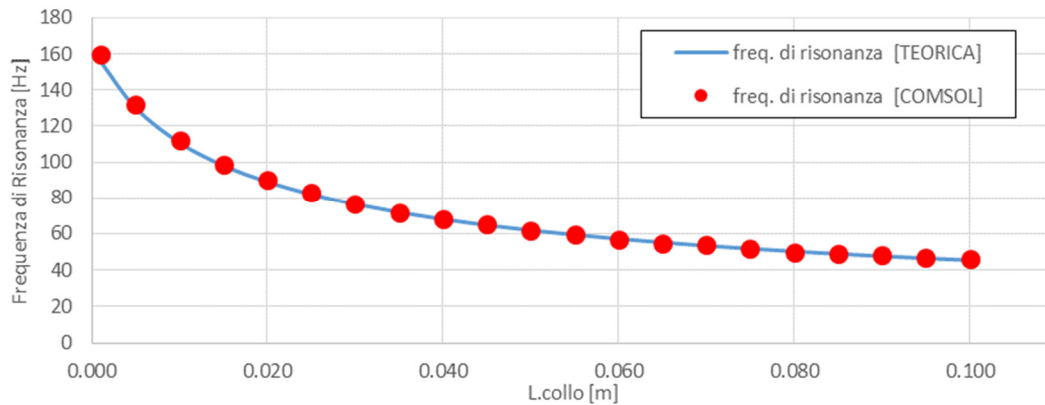


Figura 4 – Confronto tra frequenza di risonanza teorica e ottenuta dalla modellazione - Comparison between theoretical resonance frequency and obtained from modelling.

Osserviamo un'ottima corrispondenza tra i valori teorici e quelli calcolati con il metodo FEM, che indica una buona affidabilità del software utilizzato, ed anche un'ottima approssimazione della relazione teorica.

3.4 Progettazione di un sistema fonoassorbente per risonanza di cavità

Si è scelto di progettare un sistema apposito per il miglioramento acustico dei locali analizzati. La soluzione meglio rispondente alle esigenze sia acustiche che architettoniche del locale risultava pertanto la realizzazione di un pannello forato, riempito di materiale poroso, nello specifico fibra poliestere ignifuga. La realizzazione di tale sistema, ed in particolare del pannello forato, è stata resa possibile dalla collaborazione e dal supporto fornitoci dal Laboratorio Modelli della Scuola di Architettura, che ha permesso l'utilizzo dei macchinari a controllo numerico per il taglio laser di lastre in compensato. La distribuzione dei fori e la percentuale di foratura scelta risultano quindi funzionali al raggiungimento delle caratteristiche di fonoassorbimento richieste. Avendo validato la modellazione sul software utilizzato nel paragrafo [3.3], si riterranno validi i risultati ottenuti, senza la necessità di confrontarli con la relazione teorica precedentemente descritta. Si è quindi impostato sul software COMSOL® un tubo a sezione quadrata avente lato pari a 0.2 m e lunghezza pari a 4m. Abbiamo poi posizionato una porzione del pannello, mantenendone tuttavia la distribuzione di foratura, sul fondo del volume considerato. Si è stabilito l'interasse tra i fori pari a 4cm, in entrambe le direzioni, uno spessore del pannello di 4mm e una profondità dell'elemento, riempito di fibra poliestere, pari a 6 cm. Si riportano, in tabella 1, i parametri geometrici assegnati al modello.

La resistività al flusso della fibra poliestere utilizzata è quella corrispondente al prodotto effettivamente impiegato per il prototipo (pannelli Sinterm EVO - MANIFATTURA MAIANO Spa). Il modello realizzato presenta pareti rigide, condizione di Sound Hard Boundary Wall, su tutte le superfici di contorno. Si specifica come il pannello ligneo forato, realizzato in compensato nel prototipo, è stato ipotizzato infinitamente rigido. Tale approssimazione, comunque, può essere ragionevolmente considerata trascurabile per le ragioni precedentemente descritte.

Tabella 1 – Parametri geometrici assegnati al modello agli elementi finiti - Geometric parameters assigned to the finite element model.

Dati Modello		
Diametro tubo	[m]	0.2
Spessore pannello	[m]	0.004
Spessore fibra	[m]	0.06
interasse fori	[m]	0.04
Fori TOT	[n.]	25
Fori 20 mm	[%]	35%
Fori 10 mm	[%]	30%
Fori 5 mm	[%]	20%
Fori 2 mm	[%]	15%
Resistenza al flusso della fibra	[Pa m/s]	5275

Per ottenere una maggior precisione rispetto agli esempi precedentemente illustrati, la mesh è stata impostata per avere 12 elementi (e non 8, come in precedenza) per lunghezza d'onda; tale grandezza, al fine di ottenere risultati attendibili, vale circa 0.15 m. La frequenza massima risulta quindi: $f_{lim} \sim 2254$ Hz. Condurremo tuttavia uno studio che oltrepassa tale limite. Non è risultato possibile aumentare il livello di suddivisione dell'elemento, a causa dei limiti computazionali del processore. Tuttavia, il modello risulta attendibile per le frequenze di interesse, alle quali si vuole far lavorare con efficienza il pannello.

In base a tali considerazioni, conducendo due differenti studi nel dominio delle frequenze, il primo in un range da 50 Hz a 4000 Hz, a passi di 50 Hz, il secondo per ogni frequenza centrale delle bande di terzi d'ottava da 50 a 5000 Hz, dovremo osservare una dispersione dei risultati per le frequenze superiori a, circa, 2 kHz. Per la determinazione del coefficiente di assorbimento del pannello per incidenza normale, è stata utilizzata la tecnica della funzione di trasferimento in un tubo ad onde piane. Tale metodo consente di misurare le proprietà superficiali dell'elemento grazie alla misura della pressione (complessa, che tenga quindi conto della direzione dell'onda) in due punti.

Mediante tale tecnica si ottengono i contributi Incidente e Riflesso sul pannello. Si specifica come tale sistema sia effettivamente utilizzabile in quanto è presente una componente smorzante nel sistema (il materiale fibroso, la cui impedenza è modellizzata, come visto, mediante il modello di Delany-Bazely-Miki). Inseriremo pertanto due punti nel modello, nei quali estrapoleremo la pressione complessa. Il grafico di Figura 5 riporta l'andamento del coefficiente di assorbimento per entrambi gli studi nel dominio delle frequenze condotti.

Si osserva come i pannelli, come previsto e auspicato, presentano un picco di assorbimento acustico nell'intervallo tra i 400 ai 500 Hz. Si nota una dispersione dei risultati oltre i 2 kHz, anch'essa pronosticata, dovuta ad errori di calcolo del modello causati da una meshatura non sufficientemente fitta. Tuttavia, i risultati risultano adeguatamente chiari per valutare il comportamento del pannello, specialmente nell'intervallo di frequenza di nostro interesse. Si osserva che per il pannello in esame,

come per ogni sistema analogo a quello studiato, ad una diminuzione della percentuale di forature si migliorano le prestazioni alle basse frequenze (Figura 6).

Considerati i risultati ottenuti dallo studio agli elementi finiti sopra descritti, sono state valutate le prestazioni di assorbimento acustico per incidenza normale di altri tipi di pannelli, variandone la distribuzione di forature, aumentando il diametro medio per aumentare l'efficienza alle alte frequenze. A riprova di quanto detto, si è realizzato, in via semplificata, un pannello, analogo a quello precedentemente mostrato (e di cui è stato realizzato il prototipo), con una distribuzione di fori omogenea. È stato valutato il comportamento di sistemi che presentassero rispettivamente, fori del diametro di 2 mm, 5 mm, 10 mm, 20 mm. Per quanto riguarda le caratteristiche geometriche, le condizioni al contorno, la frequenza limite di attendibilità dei risultati e il dominio di frequenze in cui si è effettuato lo studio, si rimanda a quanto precedentemente descritto.

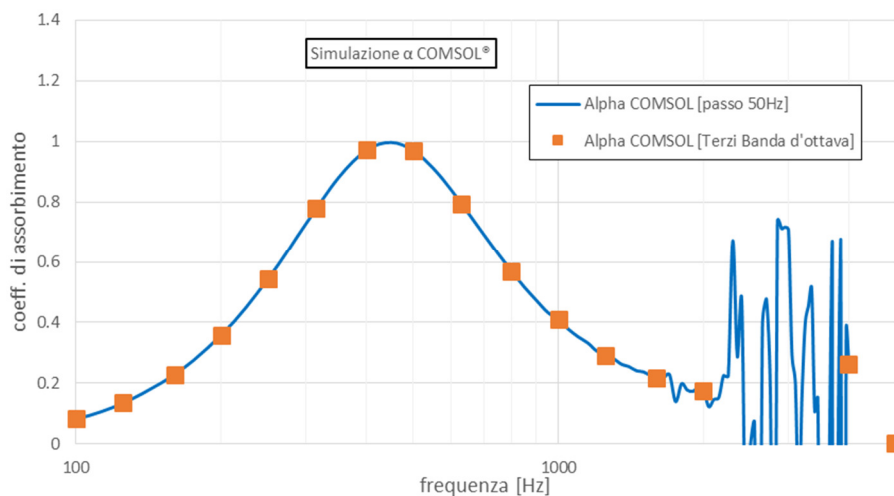


Figura 5 – Andamento coefficiente di assorbimento calcolato su COMSOL® - Absorption coefficient on COMSOL®

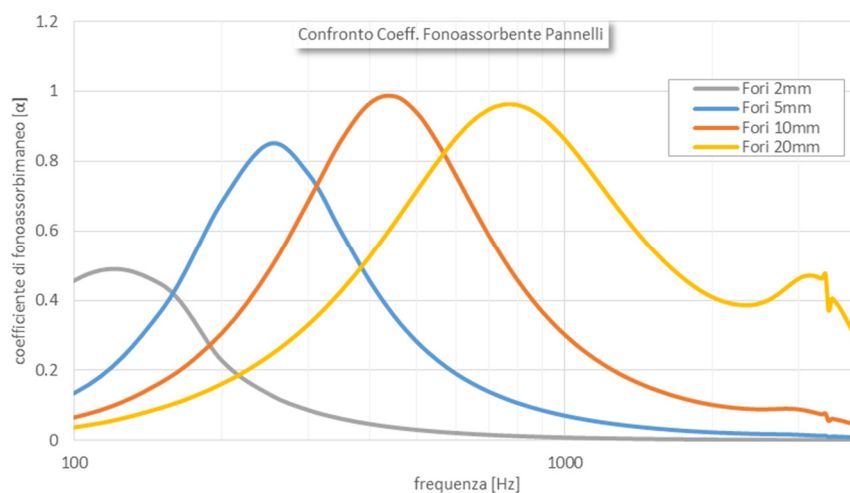


Figura 6 – Confronto coefficiente di assorbimento per diversi pannelli - Absorption coefficients comparison for different surface absorber.

Sulla base di tale comportamento potremo pertanto valutare di differenziare la produzione di pannelli, assegnando diverse percentuali di forature, al fine di riuscire a coprire un ampio range di frequenze, così da poter scegliere, per ogni ambiente oggetto di bonifica acustica, lo specifico pannello (o la specifica combinazione di pannelli) adeguata alle problematiche proprie del locale. Nel nostro caso, tuttavia, considerando sia le buone prestazioni che ci si attende dal pannello con fori di diametro variabile, sia la necessità di semplificare, quanto possibile, la realizzazione del prototipo, si è scelto di verificare sperimentalmente unicamente il pannello fonoassorbente specificatamente progettato per l'inserimento nell'ambiente oggetto di studio.

3.5 Verifiche sperimentali del pannello fonoassorbente oggetto di studio

Il prototipo del pannello progettato è stato realizzato grazie alla collaborazione del Laboratorio Modelli della Scuola di Architettura i cui ricercatori e tecnici hanno realizzato un apposito script che permettesse di ottenere una distribuzione randomizzata, pur rispettosa delle percentuali sopra riportate, per i vari pannelli testati, di dimensioni 120x60cm. La Figura 7 mostra il pannello disposto sul pavimento durante le prove sperimentali per determinarne l'assorbimento acustico.

Le misurazioni sperimentali sono state eseguite in accordo con la normativa tecnica UNI EN ISO 3382-2, al fine di determinare il coefficiente di assorbimento acustico del sistema progettato e realizzato in forma di prototipo. Ciò allo scopo di validare le valutazioni previsionali precedentemente descritte. Vi sono relazioni in letteratura che permettono di approssimare i valori di Alfa Sabine nei valori di Alfa Vero, mediante un polinomio approssimante di secondo grado. Nel nostro caso si è utilizzata la relazione proposta dal prof. Farina A. [13].

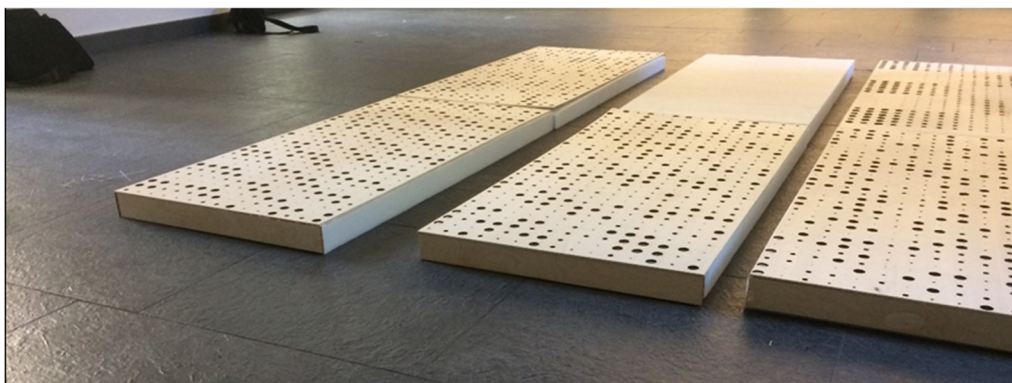


Figura. 7 – Pannello oggetto di studio - Studied surface absorber.

Il grafico di Figura 8 mostra il confronto tra i valori misurati e quelli valutati per mezzo della simulazione effettuata con software FEM.

Si osserva come l'andamento risulta coerente con quello misurato, con un evidente picco di assorbimento situato nell'intervallo di frequenze tra i 400 e i 630 Hz. Tale comportamento rispetta la valutazione preliminare effettuata mediante il software previsionale. Si nota inoltre uno scarto maggiore alle basse frequenze dovuto a superfici parzialmente fonoassorbenti che non sono state prese in considerazione durante il calcolo: il pannello rigido in compensato si è difatti modellato come infinitamente rigido e perfettamente riflettente. Inoltre, la principale differenza tra la simulazione effettuata e le

misurazioni risiede nel fatto che nel primo caso si è calcolato il coefficiente di assorbimento per incidenza normale, viceversa, nelle verifiche sperimentali abbiamo ottenuto il coefficiente di assorbimento per incidenza diffusa.

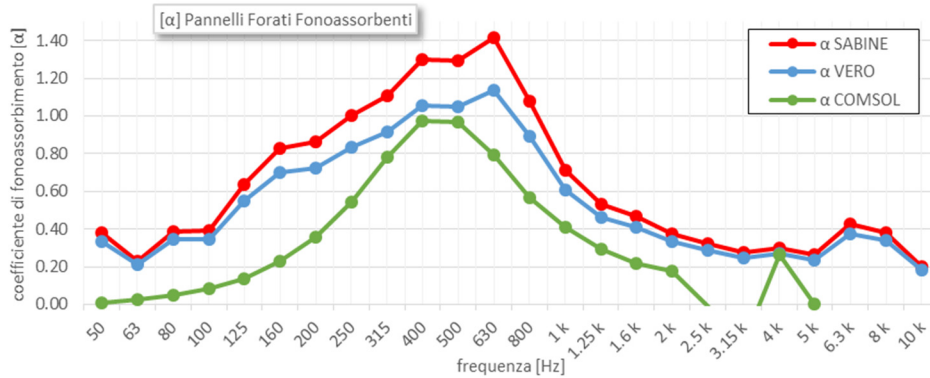


Figura 8 – Confronto coefficienti di assorbimento misurati sperimentalmente e calcolati mediante software FEM - Absorption coefficients comparison between experimental measurements and computational evaluation.

In definitiva, valutata la buona rispondenza tra modello simulato e verifiche sperimentali, i valori di assorbimento acustico misurati sono stati impiegati per valutare la quantità di materiale necessario affinché l'ambiente presenti un'acustica interna rispondente alle prescrizioni normative.

4. Simulazione dell'ambiente acusticamente riqualificato

Si valuteranno ora interventi di miglioramento acustico dell'ambiente in esame. Nel caso specifico, visti i risultati ottenuti dalle misure sperimentali eseguite nel locale vuoto, confermati successivamente dalla modellazione dello stesso su software tracciatore di raggi piramidali e su software agli elementi finiti (qui non riportati), si deduce la necessità di un intervento specifico alle basse frequenze, dove si osservano le maggiori problematiche per la qualità acustica del locale, mediante l'inserimento dei pannelli precedentemente progettati. Sulla base delle prescrizioni normative definite dal DM 18/12/1975 è stata quindi stimata la quantità di materiale necessario affinché l'ambiente possa rispondere ai limiti prescritti. È stato ipotizzato, in prima approssimazione, di inserire 30 m² di sistemi di fonoassorbimento all'interno del modello, precedentemente tarato, realizzato mediante il software tracciatore di raggi piramidali RAMSETE®. I sistemi sono stati applicati alle pareti, posizionando una fascia perimetrale di 60cm ad un'altezza da terra di 4.30 m. Oltre a questi sistemi sono stati inseriti dei totem fonoassorbenti realizzati col medesimo sistema dei pannelli sopra valutati di dimensioni pari a 1.2x2.4x0.3 m, anch'essi testati sperimentalmente. Si è ipotizzato un maggiore spessore per i totem per ragioni estetico funzionali, al fine di non realizzare pannelli troppo sottili potenzialmente soggetti a danneggiamenti durante la movimentazione degli stessi. Tali sistemi saranno pertanto realizzati inserendo una lastra rigida al loro interno che garantirà il corretto spessore della camera risonante, lasciando un'intercapedine vuota. I sistemi in oggetto risultano particolarmente adeguati per il recupero di ambienti sottoposti a vincoli di tutela storico-architettonici: sono difatti garantite tutte le caratteristiche di riconoscibilità e di reversibilità necessarie per gli interventi edilizi su edifici storici. Si riportano in forma tabellare i coefficienti di assorbimento assegnati alle

diverse superfici del locale nel software tracciatore di raggi piramidali:

Tabella 2 – Coefficienti di fonoassorbimento assegnati alle superfici - Surface absorption coefficient.

Coefficienti di fonoassorbimento										
Hz	31.5	63	125	250	500	1k	2k	4k	8k	16k
Serramento vetrato	0.02	0.03	0.03	0.03	0.03	0.03	0.02	0.02	0.02	0.02
Pavimento in grès	0.005	0.005	0.01	0.01	0.01	0.02	0.02	0.02	0.03	0.03
Intonaco	0.02	0.035	0.04	0.04	0.04	0.045	0.055	0.07	0.085	0.1
Pannelli Forati	0.30	0.30	0.53	0.82	1.00	0.65	0.34	0.25	0.30	0.30
Legno Verniciato	0.06	0.11	0.11	0.12	0.12	0.12	0.10	0.10	0.10	0.12

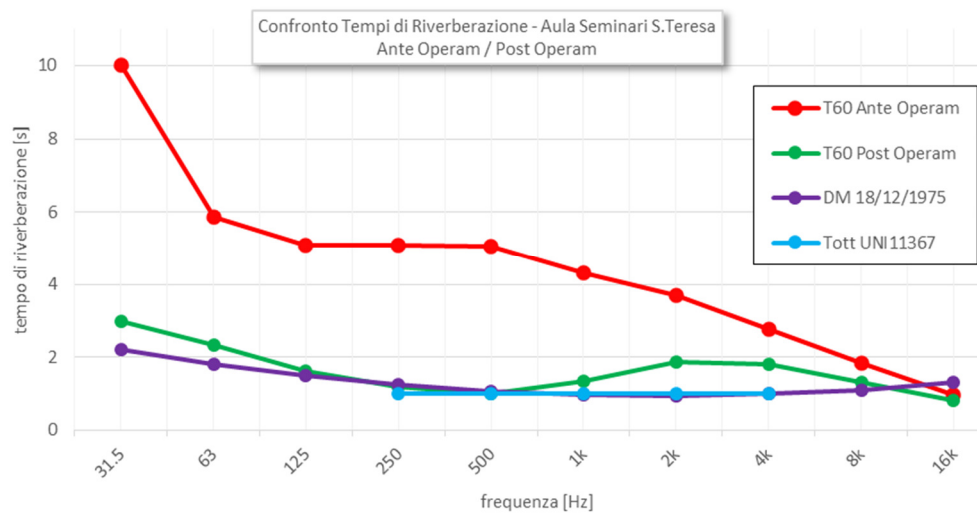


Figura 9 – Confronto tempi di riverberazione nel locale in esame - Reverberation time comparison in study room.

Dai risultati delle valutazioni previsionali e delle misure effettuate si osserva che il sistema progettato consente una buona correzione del riverbero soprattutto alle medie frequenze del suono. I risultati delle analisi previsionali e delle misure evidenziano un superamento dei valori limite prescritti alle frequenze più basse ed un lieve superamento alle frequenze più alte. Tuttavia, possiamo ragionevolmente trascurare tale discrepanza in quanto, per le bassissime frequenze non si hanno sorgenti degne di considerazione al di sotto dei 100 Hz. Viceversa, alle alte frequenze, considerando la presenza di occupanti e arredo, si raggiungeranno con ogni probabilità adeguati valori di assorbimento acustico, che porteranno ad un tempo di riverbero ottimale. Vale la pena notare come il drastico abbassamento del tempo di riverbero nell'intervallo tra i 400 e i 630 Hz corrisponda alle frequenze del parlato. Si possono pertanto considerare i risultati ottenuti come un buon punto di partenza per lo sviluppo di sistemi da adattare alle più varie esigenze degli ambienti, permettendo di intervenire nell'intervallo di frequenza che i locali richiedono. Mediante la metodologia di studio presentata potranno essere

risolte problematiche dovute per esempio a difficoltà nella comprensione del parlato di ambienti molto riverberanti, smorzamento di frequenze modali di risonanza, abbassamento del livello di pressione sonora dovuto alla presenza di sorgenti con componenti tonali che insistono sul locale.

Conclusioni

L'obiettivo dello studio era la messa a punto di un sistema fonoassorbente e la sua caratterizzazione teorica e, conseguentemente, la valutazione dell'efficienza dei pannelli progettati per la bonifica acustica di vari ambienti universitari. Si è stabilito come le prestazioni di tali sistemi ben si accordino alle differenti necessità di diversi ambienti, in quanto il range di frequenze nel quale lavorano con maggiore efficienza corrisponde alle frequenze del parlato, garantendo caratteristiche di fonoassorbimento che sistemi tradizionali solitamente non garantiscono. Un aspetto importante dello studio è che le prestazioni di tali sistemi possano essere modificate variando la percentuale di foratura del pannello: in tal modo si possono progettare e realizzare sistemi per interventi mirati nei locali che si intende riqualificare acusticamente, facendo sì che questi lavorino in uno specifico range di frequenze.

La metodologia di analisi e calcolo presentata mostra una buona affidabilità nel campo di frequenze di interesse e risulta validata dalle misure in campo effettuate.

In conclusione, le possibilità di intervento, utilizzando la metodologia descritta, aumentano notevolmente, fornendo al progettista acustico, in accordo con quello architettonico, la possibilità di diminuire le superfici necessarie per raggiungere le adeguate prestazioni acustiche.

Conclusions

The aim of the study was the development of a sound-absorbing system and its theoretical characterization and, consequently, the assessment of the efficiency of the panels designed for the acoustic remediation of various university rooms. It has been established that the performances of such systems are well suited to the different needs of different rooms, since the range of frequencies in which they work with greater efficiency corresponds to the frequencies of speech, ensuring sound absorption characteristics that traditional systems do not usually guarantee. An important aspect of the study is that the performance of these systems can be modified by varying the drilling percentage of the panel: in this way it is possible to design and implement systems for targeted interventions in rooms that are intended to be acoustically redesigned, making them work in a specific frequency range.

The analysis and calculation method presented shows a good reliability in the range of frequencies of interest and is validated by experimental measurements performed.

In conclusion, the possibilities of intervention, using the methodology described, increase considerably, providing the acoustic designer, in agreement with the architectonic one, the possibility of reducing the surfaces necessary to reach the appropriate acoustic performances.

Bibliografia

- [1] Spagnolo, R. (2008). *Manuale di Acustica Applicata*. Città Studi Edizioni, Torino.
- [2] Bonfiglio, P. (2008). *Metodo agli Elementi Finiti per l'Acustica*, Corso di Formazione Avanzato Scuola di Acustica dell'Università di Ferrara.
- [3] <http://pcfarina.eng.unipr.it/Public/APPA-BZ/Dispense/> (ultimo accesso 02/03/2019).

- [4] Abrami, B., Armani A., Danieli I. (1993). Fondamenti di acustica e le loro relazioni con le tecniche di misura, Brüel & Kjaer Italiana.
- [5] Armani A. (2009), RT60 Metodi per la misura del tempo di riverberazione, Note applicative Spectra s.r.l.
- [6] Pierce, A.D. (1989). Acoustics: An introduction to its physical principles and applications, Acoustical Society of America.
- [7] Astorino, S. (2014). Determinazione del coefficiente di assorbimento di pannelli acustici per incidenza normale, Atti del 41° Convegno Nazionale AIA, Pisa, 17-19 giugno.
- [8] Miccoli, G. (2014). Simulazione acustica mediante tecniche BEM & FEM di un sistema Audio Professionale, Atti del 41° Convegno Nazionale AIA, Pisa, 17-19 giugno.
- [9] Visentin, C. (2014). Sulla previsione del potere fonoisolante dei pannelli alveolari: misure sperimentali e simulazioni numeriche, Atti del 41° Convegno Nazionale AIA, Pisa, 17-19 giugno.
- [10] <https://www.comsol.it/model/helmholtz-resonator-analyzed-with-different-frequency-domain-solvers-20263> (ultimo accesso 02/03/2019).
- [11] Astolfi, A., Giovannini, M., Acustica delle aule scolastiche, Rockwool.
- [12] Astolfi A., Garai M. (2017). Linee guida per una corretta progettazione acustica di ambienti scolastici, Pubblicazioni AIA, Roma.
- [13] <http://pcfarina.eng.unipr.it/Public/CorsoCSPMI/> (ultimo accesso 02/03/2019).
- [14] Decreto 11 gennaio 2017, Ministero dell' Ambiente e della Tutela del Territorio e del Mare, Adozione dei criteri ambientali minimi per gli arredi per interni, per l' edilizia e per i prodotti tessili.
- [15] D.M. 18/12/1975, Norme tecniche aggiornate relative all' edilizia scolastica.
- [16] Circolare del Ministero dei Lavori Pubblici n. 3150 del 22 maggio 1967, Criteri di valutazione e collaudo dei requisiti acustici negli edifici scolastici.
- [17] UNI (2010). UNI 11367:2010 - Classificazione acustica delle unità immobiliari.
- [18] UNI (2014). UNI 11532:2014 - Caratteristiche Acustiche di Ambienti Confinati.
- [19] UNI (2008). UNI 3382-2 - Misurazione dei parametri acustici degli ambienti - Parte 2: Tempo di riverberazione negli ambienti ordinari.
- [20] ISO (2003). ISO 354, Measurement of sound absorption in a reverberation room. ISO, Geneva, Switzerland.