

ANALISI SPERIMENTALE E NUMERICA DELLA DIFFUSIVITÀ DEL CAMPO SONORO IN UNA CAMERA RIVERBERANTE

EXPERIMENTAL AND NUMERICAL ANALYSIS ON THE DIFFUSE SOUND FIELD IN REVERBERANT ROOM

Cristina Marescotti *, Francesco Pompoli

Mechlav Tecnopolo dell'Università di Ferrara

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

Via Francesco del Cossa, 1 - 44011, Argenta (FE), Italia

e-mail: mrcst@unife.it

(Ricevuto il 18/03/2019, accettato il 03/08/2019)

RIASSUNTO

La camera riverberante è un importante strumento di ricerca in ambito acustico, utilizzato nello svolgimento di numerose misure standardizzate. Tali procedure, basate sul concetto di campo sonoro diffuso, richiedono di verificare l' idoneità dello spazio di misura. Il mancato rispetto dei limiti imposti dalla norma [1], ha portato allo svolgimento di una duplice analisi: la prima riguarda una nuova metodica sperimentale per lo studio del decadimento sonoro a bassa frequenza, tramite la post elaborazione della risposta all' impulso; la seconda riguarda l' analisi numerica al FEM della camera riverberante. Differenti configurazioni di misura vengono studiate con lo scopo di valutarne l' effetto sulla diffusività del campo sonoro.

ABSTRACT

Reverberant chamber is an important research instrument in the acoustic field, mainly used to perform standardized measurements. Based on the concept of diffuse sound field, these procedures require to verify the suitability of the measurement space. The failure to respect the limits imposed by the standard [1], led to a double analysis of the reverberant sound field: the first is about a new experimental method for the study of low-frequency sound decay, through post-processing of the measured impulse response; the second concerns the numerical simulations of the reverberant chamber. Different measurement configurations are studied in order to evaluate their effect on the sound field diffusivity.

Parole chiave: camera riverberante; risposta all' impulso; analisi FEM.

Keywords: reverberant chamber; impulse response; FEM analysis.

1. Introduzione

La camera riverberante appartenente al Tecnopolo dell'Università degli Studi di Ferrara, costituisce un importante strumento di ricerca in ambito acustico per lo svolgimento di misure standardizzate, tra cui la norma UNI EN ISO 3741 [1] per la determinazione del livello di potenza sonora delle sorgenti di rumore e la UNI EN ISO 354 [2], per la determinazione del coefficiente di assorbimento per incidenza diffusa. Per verificare l'idoneità di tale ambiente, sono state applicate differenti procedure di qualificazione indicate nelle suddette norme, in modo da valutare che, all'interno dello spazio di misura e in un determinato range in frequenza, sia garantita una condizione minima di diffusività. È infatti il concetto teorico di campo sonoro diffuso che, alla base del funzionamento della camera riverberante, consente di determinare le grandezze fisiche di interesse (es. il livello di potenza sonora) dalle grandezze misurate (il livello di pressione sonora), tramite relazioni matematiche semplici.

La prima parte dell'elaborato riguarda la fase di collaudo sperimentale della camera in esame. Le normative utilizzate sono: UNI EN ISO 3741, per determinarne l'idoneità rispetto la misura di sorgenti di rumore a banda larga o a frequenze discrete; UNI EN ISO 354, con la procedura di collaudo da seguire per determinare il numero ottimale di diffusori statici, in modo da garantire il massimo grado di diffusione. Sono stati testati anche altri standard di misura (ASTM C423 – 09a e la proposta di revisione della UNI EN ISO 354), che vengono qui tralasciati.

A causa della mancata idoneità delle camere rispetto la qualifica secondo componenti a frequenze discrete [1], nasce la necessità di studiare nel dettaglio il campo sonoro a bassa frequenza (campo modale). Una nuova metodica di analisi del decadimento sonoro modale viene presentata, la quale si basa sulla post elaborazione della risposta all'impulso. Essa consiste nell'acquisire la risposta all'impulso della camera riverberante e, tramite opportune impostazioni relative sia al campionamento del segnale che all'analisi in frequenza eseguita dal software di post elaborazione, è possibile ottenere, con una buona risoluzione sia in frequenza che nel tempo, i decadimenti temporali associati ad ogni frequenza modale dell'ambiente di prova. Unitamente a questi, è possibile determinare i relativi tempi di decadimento modale. La metodica di analisi viene applicata alle differenti configurazioni di misura della camera riverberante e confrontata sia con la metodica di analisi della mezza potenza di banda (o metodo dei 3 dB), sia con il tempo di riverberazione calcolato secondo la UNI EN ISO 3382-2.

La fase finale riguarda lo studio della camera riverberante tramite l'analisi numerica agli elementi finiti. Una volta validato il modello, vengono svolte differenti indagini: la prima riguarda l'analisi numerica agli autovalori, per la determinazione delle frequenze e delle forme modali dei modi propri della camera; successivamente viene svolta la simulazione delle procedure di qualifica secondo la norma [1], sia a banda larga che a frequenze discrete. Questa fase di analisi numerica viene svolta con l'obiettivo di determinare se tale strumento di indagine può essere utilizzato in fase di progettazione della camera riverberante, in modo da ottimizzarla (geometria, diffusori, setup di misura) rispetto ai limiti imposti dalle procedure di qualifica.

2. Teoria del campo sonoro diffuso

Alla base delle procedure standardizzate di misura applicabili in camera riverberante, vi è il concetto di campo sonoro perfettamente diffuso. Tale concetto trova in letteratura molteplici definizioni [3-5], ma le principali caratteristiche possono essere riassunte come segue:

- il campo sonoro è omogeneo e isotropo, presentando lo stesso livello di pressione sonora in tutte le direzioni (condizione stazionaria);
- l'energia di ogni modo decade con una legge esponenziale nel tempo, o lineare se si considera in scala logaritmica (condizione di decadimento).

Nonostante il concetto di campo diffuso sia molto utile per studiare il campo sonoro che si instaura all'interno di un ambiente circoscritto, esso è una idealizzazione che si scosta molto dalla condizione reale, a causa della presenza di diversi fattori: dissipazione di energia [5]; riflessioni speculari [5]; campo sonoro generato da un tono puro [4].

A causa di tutte queste problematiche, è possibile ricreare in laboratorio (ambiente controllato) un campo sonoro che approssima la condizione di diffusività in una piccola regione di spazio (regione centrale) e in un range in frequenza limitato (medie-alte frequenze). A bassa frequenza l'ambiente circoscritto è caratterizzato da un comportamento modale: le frequenze proprie risultano essere ben distanziate (bassa densità modale), con una conseguente risposta in frequenza molto disomogenea, che si traduce in un'elevata variabilità del campo sonoro instauratosi.

Vi sono inoltre altri fattori che contribuiscono al non avere un campo diffuso in ambiente chiuso e che sarebbero da evitare: camere di prova con geometria regolare e assenza di elementi diffondenti; riflessione non diffusa dalle superfici costituenti la camera; non uniforme distribuzione di assorbimento sulle stesse superfici [5].

Il presente elaborato concentra quindi la propria analisi nella regione modale (al di sotto della frequenza di Schroeder [4, 5]), in cui il concetto di campo diffuso viene a mancare, soprattutto in presenza di eccitazioni date da frequenze discrete [4], sia in condizione stazionaria che in fase di decadimento. Per descrivere il comportamento modale, viene utilizzato il modello ad onde piane [4], un modello di tipo analitico che si basa sulla risoluzione dell'equazione delle onde, tenendo conto delle condizioni al contorno dell'ambiente studiato: esso porta alla descrizione del campo acustico in termini di modi propri della camera. All'interno della tesi viene inoltre descritto il campo sonoro diffuso, sia in condizione stazionaria che di decadimento, riportando sia le relazioni matematiche alla base delle grandezze fisiche delle norme di misura, sia le condizioni che portano ad una diminuzione del grado di diffusione che si può instaurare.

3. Camera riverberante dell'Università di Ferrara

La camera riverberante realizzata presso il Dipartimento di Ingegneria dell'Università di Ferrara è costituita da un guscio esterno in cemento armato dello spessore di 30 cm, con un volume interno di 252.5 m³. Essa è caratterizzata da una geometria interna irregolare priva di superfici tra di loro parallele: solo due pareti appartenenti al perimetro laterale sono ortogonali tra di loro e rispetto al pavimento. All'interno della camera di prova sono inoltre presenti, per motivi strutturali antisismici, sei colonne di acciaio del diametro di 300 mm. In base al tempo di riverberazione misurato e al volume della camera di prova, la frequenza di Schroeder è stata stimata pari a 330 Hz. Con lo scopo di incrementare la diffusione al di sotto di tale frequenza (in campo modale), nella norma [2] viene consigliata l'installazione di diffusori fissi o rotanti. In un primo tempo sono stati installati 4 diffusori fissi in MDF (Medium density fiberboard) i quali presentano dimensioni di 2.0x2.2 m con spessore di 20.0 mm (4.35 m² di area frontale e 0.46 m³ di volume). I diffusori presentano una curvatura di raggio 5 m; le dimensioni dei diffusori sono state individuate secondo [2], comparabili ad

almeno metà della lunghezza d'onda della frequenza di lavoro (88 Hz, valore limite inferiore del terzo di ottava di 100 Hz).

Per la misura di potenza sonora secondo [1] è fortemente consigliata la presenza di un diffusore rotante che migliori la distribuzione del suono in presenza di componenti di frequenza discrete. È stato pertanto realizzato un pannello verticale di 2.00 x 1.50 m in grado di ruotare a velocità costante compresa tra 7.5 e 21.4 giri/min. Il pannello è realizzato in sandwich (lamiera di acciaio zincato spessore 4/10 e riempimento interno con schiumatura di resine poliuretaniche) con una massa superficiale di 11 kg/m². Esso viene inoltre collocato, all'interno dell'ambiente di misura, in 2 posizioni differenti, in modo da valutarne l'influenza rispetto alla variabilità spaziale del livello di pressione sonora. In figura 1 viene riportato il CAD 3-D della camera, con la disposizione e l'ingombro spaziale dei diffusori descritti.

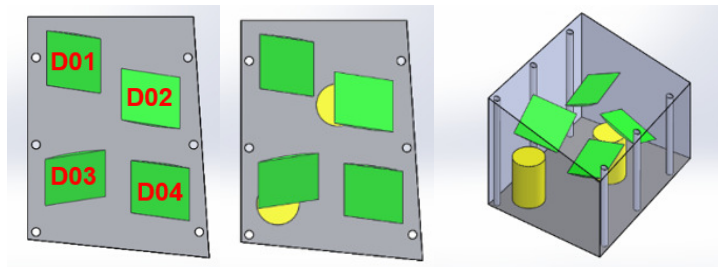


Figura 1 – Geometria e diffusori della camera riverberante – Geometry and diffusers of the reverberant room.

4. Qualificazione della camera riverberante dell'Università di Ferrara

La camera riverberante viene utilizzata per lo svolgimento di numerose misure standardizzate, le quali riportano al loro interno una serie di procedure di qualifica per attestare l'idoneità dell'ambiente di misura. Per questo motivo e per valutare il grado di diffusione del campo sonoro rispetto ai limiti normati, sono state eseguite differenti procedure di qualificazione, riportando 2 tra le più significative:

- UNI EN ISO 3741: prevede 2 procedure di qualifica: la prima riguarda la misurazione del suono ad ampio spettro; la seconda riguarda invece la misurazione di componenti di frequenze discrete;
- UNI EN ISO 354: al suo interno viene riportata la procedura di collaudo per l'installazione del numero ottimale di diffusori statici.

4.1 UNI EN ISO 3741: Appendice D

All'interno della norma per la determinazione della potenza sonora, la fase di qualificazione che denota maggiore importanza risulta essere quella per la misurazione di sorgenti sonore con componenti di frequenze discrete. La presenza di tali componenti, porta ad elevate problematiche nella fase di misura: la variabilità spaziale del campo sonoro risulta essere molto elevata e fortemente dipendente dalla configurazione della camera di prova, con conseguente riduzione della ripetibilità e riproducibilità dei test, soprattutto a bassa frequenza dove vi è la predominanza del comportamento modale.

Tale procedura, se superata, va a stabilire in modo permanente le posizioni del setup di misura (posizioni microfoniche e di sorgente), senza dover effettuare ulteriori verifiche in fase di misura. Essa consiste nell'eccitare la camera di prova tramite l'utilizzo di un altoparlante, le cui caratteristiche sono definite in [1], il quale deve

emettere specifiche frequenze (Prospetto D.2). Determinato il livello di pressione sonora per le diverse posizioni microfoniche, si calcola lo scarto tipo s_f , come definito in equazione (1), dove:

- L_{pk} : livello di pressione sonora temporale medio (corretto con la risposta in frequenza dell'altoparlante di prova) relativo alla k -esima frequenza di prova, mediato su tutte le posizioni microfoniche (e di sorgente se sono multiple) [dB];
- L_{pm} : media aritmetica dei valori di L_{pk} su tutte le frequenze appartenenti alla singola banda di terzo di ottava [dB];
- N_f : numero di frequenze di prova contenute all'interno della singola banda di terzo di ottava.

$$(1) \quad s_f = \sqrt{\sum_{k=1}^{N_f} \frac{(L_{pk} - L_{pm})^2}{N_f - 1}} \quad [\text{dB}]$$

La procedura viene svolta utilizzando 6 posizioni microfoniche discrete (posizionate all'interno dello spazio di misura rispettando i vincoli geometrici imposti dalle norme considerate), al variare dell'allestimento della camera di prova:

- Camera vuota: camera senza elementi diffondenti;
- Camera con 4 diffusori statici: la camera presenta i 4 diffusori descritti in paragrafo 3;
- Diffusore rotante 0.19 Hz: la camera presenta, unitamente ai 4 diffusori statici, il diffusore rotante alla frequenza di 0.19 Hz, che corrisponde a 11.32 giri/min. Esso viene posizionato in 2 differenti postazioni (figura 1), in angolo e al centro della stanza.

In figura 2 vengono mostrati gli andamenti dello scarto tipo s_f relativo alle configurazioni di indagine. Per nessuna di queste ultime, lo scarto tipo risulta essere inferiore ai valori limite stabiliti dalla norma (linea tratteggiata rossa): vi è una riduzione dello scarto tipo utilizzando il diffusore rotante in centro stanza, ma, a causa del marcato comportamento modale a bassa frequenza, permane un'elevata variabilità spaziale del campo sonoro instauratosi.

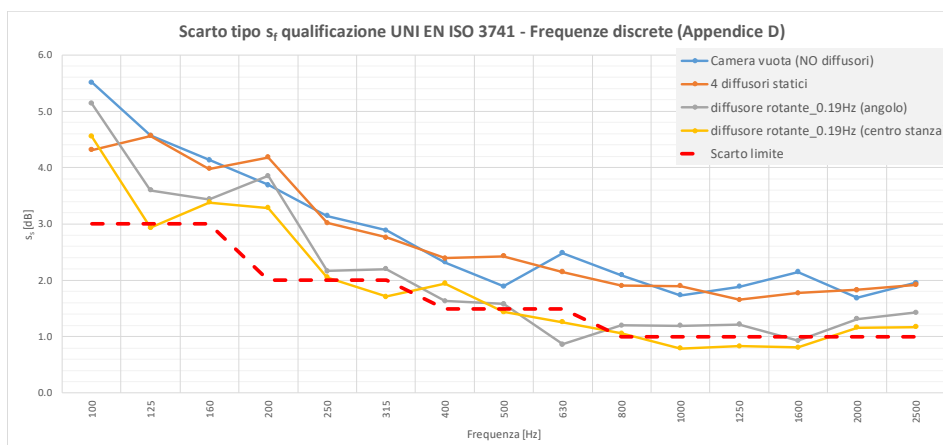


Figura 2 – Scarto tipo s_f , qualificazione a frequenze discrete: 6 posizioni microfoniche – Standard deviation s_f , qualification for the discrete frequency components: 6 microphone positions.

4.2 UNI EN ISO 354: Appendice A – Diffusività del campo sonoro in camera riverberante

La procedura di collaudo per l'installazione dei diffusori statici, propone una metodologia sperimentale per determinare il numero ottimale di elementi diffusivi da collocare nell'ambiente di prova, con lo scopo di aumentare il grado di diffusione del campo sonoro. Esso prevede di determinare il coefficiente di assorbimento acustico per un materiale assorbente, poroso ed omogeneo, il quale presenta un coefficiente di assorbimento maggiore di 0.9 all'interno del range in frequenza [500 – 4000] Hz, secondo differenti configurazioni:

- in assenza di diffusori;
- introducendo un numero limitato di diffusori statici (all'incirca 5 m² in area);
- introducendo un numero maggiore di diffusori (step di circa 5 m² in area).

Il materiale utilizzato nel presente elaborato è costituito da 6 pannelli di dimensioni 2.0 x 1.0 m e spessore 0.1 m di fibra di poliestere, di densità 40 kg/m³. Il tempo di riverberazione è stato misurato utilizzando il metodo della risposta all'impulso integrata (metodo indiretto) tramite sine-sweep logaritmica, utilizzando 3 posizioni sorgente e 6 posizioni microfoniche per un totale di 18 combinazioni sorgente/ricevitore.

I diffusori sono introdotti all'interno dell'ambiente di misura con orientamento casuale e cercando di coprire tutto lo spazio disponibile. Per ogni misura deve essere determinato il valore medio del coefficiente di assorbimento α in un range in frequenza di terzo di ottava [500 – 5000] Hz: il valore medio deve essere poi graficato (figura 3) in funzione dell'area totale dei diffusori installati, unitamente alle barre di errore (stimate determinando l'errore percentuale delle grandezze usate per il calcolo di α e, tramite la legge di propagazione dell'errore, ottenendo l'errore combinato).

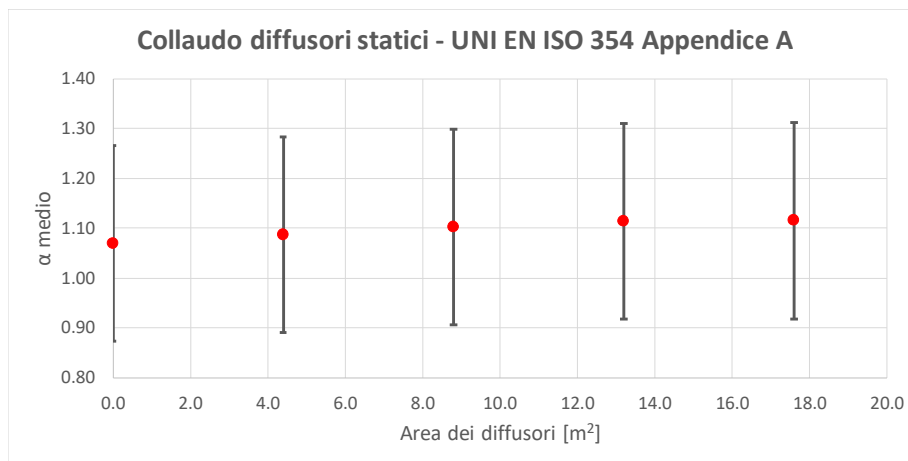


Figura 3 – Coefficiente di assorbimento α all'aumentare dei diffusori statici installati – Absorption coefficient α with increasing static diffusers.

Le barre di errore sono utili per far capire come l'introduzione dei diffusori in camera riverberante non portino ad una sostanziale modifica del coefficiente di assorbimento del materiale testato. Se tale grandezza viene presa come indicatore del grado di diffusione dell'ambiente di misura, rapportato alle barre di errore, il coefficiente rimane pressoché costante e di conseguenza i diffusori non portano ad un consistente miglioramento del campo sonoro, probabilmente dovuto alla già complessa geometria della camera riverberate e al loro posizionamento.

5. Metodica per la misura del decadimento modale

Le norme riguardanti le procedure di misura applicabili in camera riverberante, sono ritenute valide in un ristretto range in frequenza, limitato superiormente dall'assorbimento dell'aria e inferiormente dalla presenza di un campo sonoro con bassa densità modale. Al di sotto della banda di terzo di ottava dei 100 Hz, considerata negli standard di misura come frequenza limite per cui la condizione di diffusività è rispettata, le misure non risultano idonee a causa dei bassi livelli di accuratezza raggiunti.

All'interno di un ambiente confinato, si instaurano a bassa frequenza modi propri caratterizzati sia da forma modale che da energia differenti [4,5]. Quando una sorgente stazionaria viene improvvisamente spenta, l'energia associata ad ogni modo decade, in scala logaritmica, con andamento lineare. Essendo ogni modo caratterizzato dalla propria distribuzione di energia, anche il decadimento associato varia: poiché le norme utilizzate nella valutazione del tempo di riverberazione forniscono dei valori in banda di terzi di ottava, se all'interno della singola banda sono presenti 2 o più modi energeticamente differenti, il decadimento globale risulterà caratterizzato da più pendenze, rendendo problematica la determinazione del tempo di riverberazione corretto [6].

Dai risultati del collaudo acustico si nota inoltre come l'introduzione dei 4 diffusori fissi, progettati per agire a partire da 88 Hz, non mostrino un miglioramento dei parametri acustici al di sotto della frequenza di Schroeder (330 Hz), soprattutto in presenza di sorgenti di rumore con componenti tonali. Da ciò nasce la necessità di analizzare nel dettaglio il comportamento della camera riverberante a bassa frequenza, tramite lo studio dei modi propri ed il calcolo dei relativi tempi di decadimento, utilizzando un approccio di tipo modale.

Viene quindi mostrata una metodica sviluppata per la determinazione del tempo di decadimento modale, la quale si propone due differenti obiettivi: il primo riguarda la determinazione del tempo di decadimento modale a bassa frequenza, confrontando i valori ottenuti con i metodi di misura standardizzati. Il secondo obiettivo riguarda lo studio del campo sonoro in ambiente circoscritto: tramite questa metodica, è possibile individuare i singoli modi e valutarne il decadimento nello spazio. È inoltre possibile effettuare delle valutazioni sulla tipologia di modo che si instaura e sulla presenza o meno di un campo sonoro sufficientemente diffuso (campo sonoro diffuso: il decadimento dell'energia, in scala logaritmica, è lineare; condizione di non diffusione: il decadimento non è approssimato da una linea retta [5]. Decadimenti con pendenze multiple sono indice di un basso grado di diffusione del campo sonoro [7]).

5.1 Calcolo del tempo di decadimento modale: post processamento della risposta all'impulso

La metodica, basata sul calcolo del tempo di decadimento modale tramite il post processamento della risposta all'impulso, fornisce sia il tempo di decadimento modale, che le curve di decadimento dei singoli modi analizzati, restituendo un'informazione più dettagliata sul campo sonoro che si instaura in fase di transitorio (spegnimento della sorgente di misura).

Il set up di misura prevede l'utilizzo di 6 posizioni microfoniche discrete: 3 ricettori sono stati posizionati a circa 5 cm dagli angoli dell'ambiente di misura, poiché essi costituiscono i punti di massima eccitazione modale [8]; i restanti 3 ricettori sono stati posizionati nella zona centrale della camera, per avere ulteriori punti di misura. Per poter eseguire la risposta all'impulso dell'ambiente di prova, una sorgente dodecaedrica è stata posizionata anch'essa in un angolo della camera riverberante, in modo tale da

poter eccitare tutti i modi propri dell'ambiente [5]: essa emette una sweep lineare di durata 30 s nel range in frequenza [40 – 500] Hz. Del segnale acquisito viene eseguita la successiva fase di post elaborazione: si ottiene così la curva FFT della risposta all'impulso, impostata in modo tale da consentire sia una buona risoluzione temporale ($\Delta t=0.04$ s) che in frequenza ($\Delta f=0.4$ Hz). Successivamente, alla storia temporale dei decadimenti delle frequenze modali, si applica l'integrale all'indietro di Schroeder per poter calcolare sia i tempi di decadimento T_{10} e T_{30} che i relativi coefficienti di correlazione delle curve di interpolazione $R^2_{T_{10}}$ e $R^2_{T_{30}}$.

Per poter automatizzare il calcolo dei tempi di decadimento modali, rendendo l'analisi più veloce, e per selezionare solo i decadimenti associati ai singoli modi, è stato definito un criterio di selezione delle frequenze modali, che si basa su due condizioni:

- Differenza relativa del tempo di decadimento modale: esclusione delle frequenze e dei ricettori in cui la differenza relativa tra T_{10} e T_{30} è superiore al 10%. Ciò elimina tutti i decadimenti che sono caratterizzati da una doppia pendenza.

$$(2) \quad \frac{|(T_{30} - T_{10})|}{T_{10}} \leq 0.10 \quad [-]$$

- Valore minimo assoluto tra i coefficienti di correlazione $R^2_{T_{10}}$ e $R^2_{T_{30}}$: esclusione delle frequenze e dei ricettori in cui il valore minimo assoluto tra i due coefficienti di correlazione è minore del 97%. Ciò permette di escludere tutti i decadimenti che presentano delle pulsazioni.

$$(3) \quad \min(R^2_{T_{30}}; R^2_{T_{10}}) \geq 0.97 \quad [-]$$

5.2 Applicazione del metodo: analisi della camera riverberante

Le analisi svolte applicando la nuova metodica sono molteplici e indagano: la variazione della posizione microfonica, su 6 differenti posizioni (3 ad angolo e 3 centrali); variazione della posizione sorgente, su 4 differenti posizioni (1 ad angolo e 3 centrali); variazione della configurazione della camera di prova, in assenza e presenza dei 4 diffusori statici. Per brevità verranno riportate solo alcune delle più significative indagini.

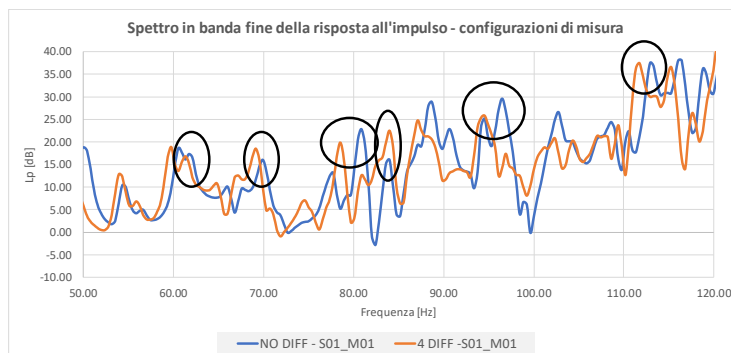


Figura 4 – FFT della risposta all'impulso: confronto al variare dei diffusori – FFT of the impulse response: compare with the variation of the diffusers.

La più significativa riguarda l'analisi in presenza ed assenza dei 4 diffusori statici, poiché va a valutare l'influenza che questi elementi hanno sul decadimento modale. In figura 4 viene riportata la funzione in frequenza delle due configurazioni, in cui si nota come l'introduzione dei 4 elementi (curva arancio) porti ad uno shift delle frequenze modali, mentre mantenga pressoché inalterata l'ampiezza del picco modale.

Andando ad applicare la metodica di analisi, vengono determinati i tempi di decadimento dei singoli modi, come mostrato in figura 5. I dati riportati in tabella 1 sono relativi alle frequenze modali e ai corrispettivi tempi di decadimento dei modi sopra evidenziati: ogni riga riporta i valori delle due configurazioni a parità di modo eccitato.

Tabella 1 – Frequenze modali: [20 - 120] Hz – Modal frequencies: [20 - 120] Hz.

4 DIFF - S01_M01		SENZA DIFF - S01_M01	
Frequenza [Hz]	T_{30}	Frequenza [Hz]	T_{30}
61.33	9.43	61.72	10.76
69.14	4.95	69.92	5.38
78.52	8.67	80.86	8.10
83.98	8.65	83.98	9.27
94.53	5.49	96.48	6.66
111.72	8.84	112.89	9.13

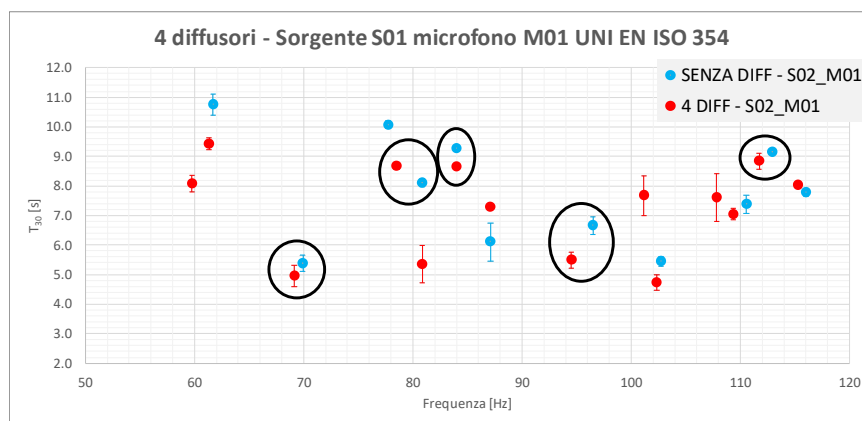


Figura 5 –Storie temporali dei decadimenti: confronto al variare dei diffusori – Decay time history: comparison with different diffusers.

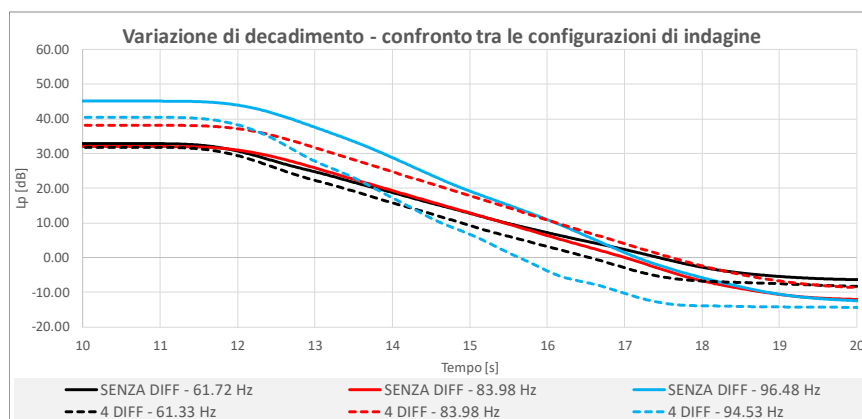


Figura 6 – Storie temporali dei decadimenti: influenza dei 4 diffusori statici – Decay time history: effect of 4 static diffusers.

Dei suddetti modi vengono graficati i decadimenti temporali: in figura 6 sono riportati i decadimenti relativi alle frequenze che risentono dell'introduzione dei diffusori statici, mostrando una variabilità sia di pendenza del decadimento che di livello in fase stazionaria. Per comprendere cosa accade dopo l'inserimento dei 4 diffusori statici, vengono mostrate le forme modali ottenute al FEM (figura 7) delle 3 frequenze che mostrano una variazione di pendenza in figura 8.

Dalla rappresentazione delle forme modali si può vedere l'influenza dei diffusori statici: analizzando la forma modale relativa al 1° modo rappresentato in figura 7, si nota come i piani nodali vengano riorientati dalla presenza dei 4 diffusori, ottenendo quindi un modo più complesso. Ciò giustifica la diminuzione del tempo di decadimento associato: il modo assiale, che si manifesta in assenza dei diffusori (10.76 s) presenta un minor numero di riflessioni lungo il suo cammino, rispetto al modo obliquo generato dai 4 diffusori statici che porta ad una diminuzione del tempo di decadimento (9.43 s). Anche per le altre frequenze di figura 7, si nota una tendenza dei 4 diffusori a distorcere le curve nodali, rendendo il modo più complesso, dimostrato anche in queste due casistiche dalla riduzione del tempo di decadimento associato.

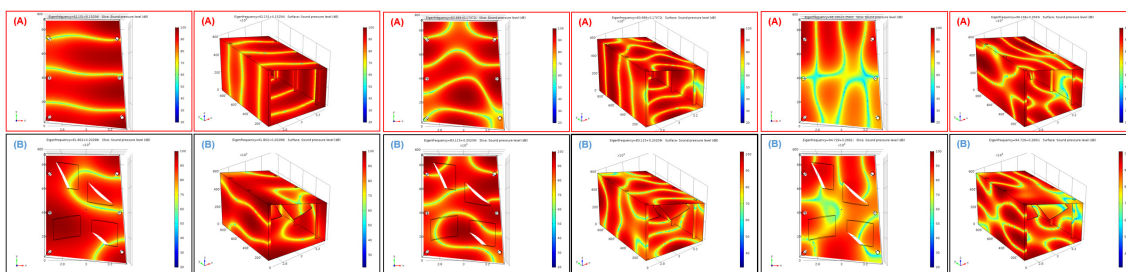


Figura 7 – Forme modali al FEM: camera riverberante vuota (A); 4 diffusori statici (B) – FEM Modal forms: empty reverberant chamber (A); 4 static diffusers (B).

5.3 Confronto tra il metodo della post elaborazione della risposta all'impulso e il metodo della mezza potenza di banda

La stima del tempo di decadimento modale è stata effettuata utilizzando un'altra metodica di indagine che consiste nel metodo della mezza potenza di banda, o noto anche come metodo dei 3 dB. Utilizzando il medesimo setup di misura definito in paragrafo 5.1, dal segnale della risposta all'impulso della camera di prova viene effettuata un'analisi FFT con una risoluzione in frequenza molto elevata: impostando un overlap del 98.5%, è possibile infatti ottenere una FFT caratterizzata da $\Delta f = 0.05$ Hz, centrata nelle frequenze relative alla banda in terzi di ottava che si vuole analizzare.

Ottenuta la curva FFT con elevata risoluzione in frequenza, è quindi possibile applicare il metodo della mezza potenza per determinare il tempo di decadimento modale: una volta determinato lo smorzamento modale alla relativa frequenza di picco, si calcola così il tempo di decadimento modale. Le formule relative alla determinazione dello smorzamento modale e del tempo di decadimento modale sono descritte in [9].

Il presente metodo di indagine ha dei limiti a causa dell'interazione tra modi adiacenti, portando alle seguenti casistiche:

- presenza di picchi in frequenza troppo ravvicinati, che non consentono di distinguere la singola frequenza modale (B);
- presenza di picchi non simmetrici (A), con conseguente errore nella determinazione del Δf modale;

- necessità di un elevato numero di posizioni microfoniche per poter determinare tutti i picchi modali (C).

Analizzando il singolo picco modale, non è quindi possibile verificare l'andamento del decadimento alla frequenza analizzata, incorrendo nelle problematiche elencate e, di conseguenza, stimando in modo non corretto il tempo di decadimento modale.

In figura 9 viene riportato il confronto tra le due metodiche di indagine in termini di tempo di decadimento modale, nella configurazione con 4 diffusori statici e per una singola combinazione microfono/sorgente. In tratteggiato viene riportato il valore del tempo di riverberazione determinato secondo la UNI EN ISO 3382-2, il quale risulta essere costante all'interno della singola banda di terzo di ottava.

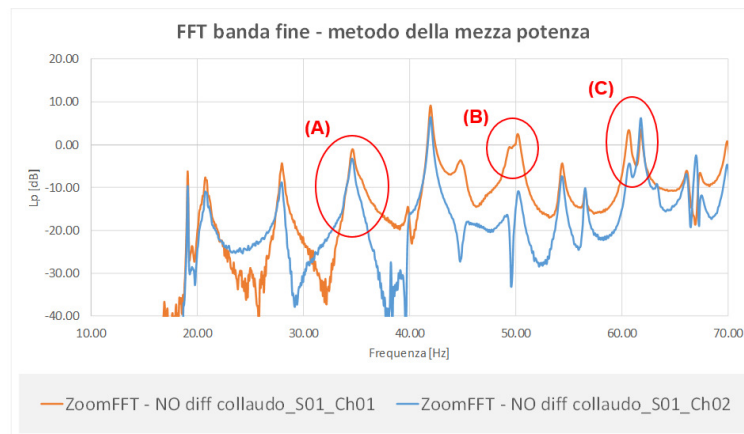


Figura 8 – FFT a banda fine per il metodo della mezza potenza: confronto tra 2 microfoni – FFT for the half-power bandwidth method: comparison between 2 microphones.

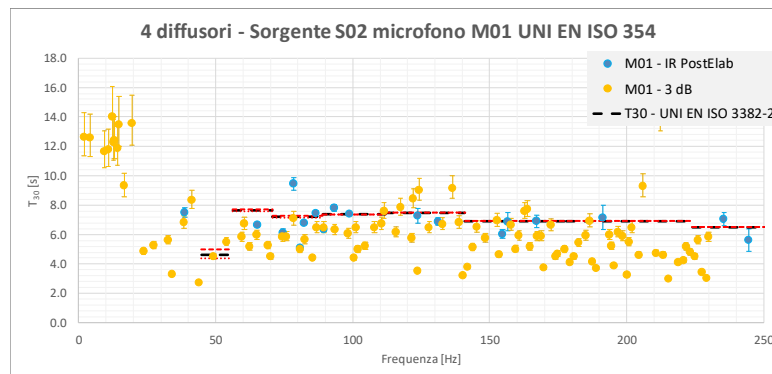


Figura 9 – Confronto tra le metodiche di calcolo del tempo di decadimento – Comparison of the methods for the calculation of the decay time.

Per quanto riguarda il metodo della post elaborazione della risposta all'impulso, in tutte le configurazioni non sono riportati i tempi di decadimento modale per frequenze inferiori ai [40 – 50] Hz, in cui sono presenti i primi modi della camera riverberante come mostrato in figura 8. La post elaborazione della risposta all'impulso necessita della storia temporale relativa al decadimento energetico del singolo modo per la stima

del T_{30} : se la sorgente non eccita sufficientemente, a livello energetico, le frequenze modali, non si riesce ad ottenere un rapporto segnale rumore tale da garantire un decadimento di 30 dB. Nel caso della metodica della mezza potenza di banda, si ha invece che essa si basa sui picchi del livello di pressione sonora ottenuti dallo spettro in frequenza della risposta all'impulso: di conseguenza necessita di un rapporto segnale rumore inferiore rispetto alla precedente metodica.

Confrontando le due metodiche di calcolo, si ha che a parità di frequenza indagata, sia in figura 9 che in tabella 2, la metodica relativa alla mezza potenza di banda presenta dei valori di tempo di decadimento sempre inferiori rispetto alla metodica della risposta all'impulso post elaborata. Ciò è imputabile a due problematiche principali: il Δf disponibile nella curva FFT sperimentale in banda fine, acquisita dall'analizzatore; il Δf utilizzato nella fase di interpolazione del picco di indagine. La sovrastima di Δf -3dB, dovuto da una non sufficiente risoluzione in frequenza, porterebbe infatti ad una riduzione del tempo di decadimento modale stimato.

In generale si può osservare:

- a parità di posizione e di metodo, vi è un'elevata variabilità tra frequenze adiacenti, causata dalla diversa natura dei modi che si instaurano in camera;
- confrontando le due metodologie di misura per la determinazione del tempo di decadimento modale, il metodo dei "3 dB" sembra sottostimare in maniera sistematica tale grandezza;
- se si confrontano le due metodiche con la misura standardizzata del tempo di riverberazione secondo la UNI EN ISO 3382-2, quest'ultima presenta diverse problematiche. Essa fornisce un valore del tempo di riverberazione costante all'interno della banda in percentuale di ottava, il quale risulta essere determinato dal decadimento modale che presenta un contributo energetico maggiore; inoltre perde qualsiasi tipologia di informazione legata ai singoli modi che ricadono all'interno della banda in frequenza analizzata.

Tabella 2 – Confronto tra le due metodiche sperimentali (4 diffusori statici) -
Comparison between the two experimental methods (4 static diffusers).

Modi FEM [Hz]	4 DIFFUSORI				
	Mezza potenza di banda (3 dB)		IR PostElab		
	Frequenza [Hz]	T_{30} [s]	Frequenza [Hz]	T_{30} [s]	
1	20.70	20.63	9.21	-	-
2	27.27	27.52	5.75	-	-
3	32.39	32.60	5.34	32.81	5.42
4	34.26	34.26	3.89	-	-
5	38.33	38.46	6.77	38.28	7.85
6	41.65	41.37	7.98	41.41	9.31
7	43.70	43.72	3.22	-	-
8	48.02	49.23	3.44	-	-
9	49.55	49.33	4.21	49.61	4.58
10	53.86	53.92	5.36	-	-
11	55.60	55.92	5.97	-	-
12	59.81	59.73	7.08	59.77	8.25
13	60.52	60.46	6.22	60.55	7.79
14	61.80	61.34	7.57	61.33	9.83
15	62.14	62.52	6.32	62.50	6.98

6. Studio numerico della camera riverberante

L'ultima parte dell'elaborato riguarda lo studio numerico effettuato sulla camera riverberante dell'Università di Ferrara. Lo scopo di tale analisi risiede nel valutare se il calcolo agli elementi finiti può essere considerato un buon strumento di indagine sia per comprendere le dinamiche del campo sonoro che si instaura all'interno dell'ambiente chiuso e valutarne l'effettivo grado di diffusione, sia per l'utilizzo di tale mezzo di ricerca nella progettazione di futuri ambienti adibiti allo svolgimento di misure standardizzate.

Le simulazioni che vengono eseguite sono molteplici:

- studio degli autovalori (eigenfrequency) dell'ambiente di misura, per l'analisi delle frequenze e delle forme modali, in modo tale da determinare la tipologia di modo che si instaura e che distribuzione di pressione presenta all'interno dello spazio indagato;
- esecuzione delle 2 procedure di qualifica definite all'interno della norma UNI EN ISO 3741. La prima riguarda la misura del suono ad ampio spettro; la seconda riguarda la misura di componenti di frequenze discrete.

6.1 Modello FEM 3D

Per l'analisi numerica della camera riverberante dell'Università di Ferrara, viene costruito un modello FEM 3D, con il software Comsol Multiphysics, il quale possiede le seguenti caratteristiche:

1. Pressure acoustic: definisce le equazioni di risoluzione e le caratteristiche del dominio fluido analizzato. Trattandosi di aria, il dominio viene modellato come un fluido lineare elastico, che necessita soltanto delle grandezze relative alla velocità del suono (c_0) e alla densità (ρ_0) per essere caratterizzato. Le grandezze sono determinate imponendo una temperatura dell'aria pari a $T=20$ °C.

Sempre all'interno della fisica di modellazione, viene definita la condizione al contorno riguardante l'impedenza delle pareti e degli elementi strutturali della camera. Sotto le ipotesi di pareti localmente reagenti e con basso smorzamento (condizioni verosimili per la camera vuota), il valore immaginario dell'impedenza si annulla. Utilizzando l'equazione 4, riportata nella norma UNI EN ISO 10534-2, si riesce a determinare il valore reale dell'impedenza tramite l'assorbimento per incidenza diffusa:

$$(4) \quad \alpha_{st} = 8 \frac{1}{z'} \left[1 - \frac{1}{z'} \ln(1 + 2z' + z'^2) \right] \quad [-]$$

Dove:

- α_{st} : coefficiente di assorbimento sonoro per incidenza diffusa per materiali localmente reagenti;
 - $z' = R/\rho_0 c_0$: parte reale dell'impedenza acustica normalizzata.
2. Mesh: la mesh utilizza degli elementi di tipo tetraedrici per la discretizzazione del dominio. L'accuratezza della soluzione dipende dal numero di elementi e migliora all'aumentare di questi ultimi, fino a giungere alla condizione di convergenza della soluzione. Nelle presenti simulazioni, la frequenza massima f_{max} è stata stabilita pari a 300 Hz e sono stati utilizzati 6 elementi per lunghezza d'onda. Queste due grandezze sono state scelte in modo tale da limitare i costi computazionali delle simulazioni, a causa dell'elevato volume della geometria da discretizzare.

6.2 Analisi agli autovalori – modi propri della camera riverberante

La prima simulazione condotta riguarda l'analisi agli autovalori dell'ambiente di prova, per la determinazione dei modi propri e delle relative forme modali. Le simulazioni sono svolte sia in assenza che in presenza dei 4 diffusori statici e i valori numerici vengono confrontati con i valori sperimentali, ottenuti dalla risposta in frequenza dell'ambiente di misura. In tabella 3 viene riportato tale confronto, unitamente alla variazione percentuale $\Delta f(\%)$ presente tra le due metodiche a parità di modo indagato.

Dall'analisi effettuata agli autovalori si ha quindi che la simulazione agli elementi finiti riesce a stimare con buona precisione le frequenze modali della camera di prova. Esso inoltre riesce ad individuare lo shift in frequenza presente tra le due diverse configurazioni della camera riverberante, tale per cui si ha che i modi con 4 diffusori si manifestano a frequenze inferiori. Tale shift viene mostrato e confermato sia dall'andamento relativo ai picchi delle risposte in frequenza sperimentale di figura 4, sia dal confronto dei dati di tabella 3, relativi ai primi 10 modi indagati.

Tabella 3 – Frequenze modali: confronto FEM e sperimentale – Modal frequencies: comparison between FEM and experimental data.

SENZA DIFFUSORI				4 DIFFUSORI			
Indice modo	Freq. sperimentali [Hz]	Freq. FEM [Hz]	Δf (%)	Indice modo	Freq. sperimentali [Hz]	Freq. FEM [Hz]	Δf (%)
1	20.86	20.70	0.77	1	20.70	20.70	0.00
2	27.70	27.73	0.14	2	27.73	27.27	1.66
3	33.46	33.59	0.40	3	32.81	32.39	1.28
4	34.67	34.77	0.28	4	34.38	34.26	0.34
5	39.60	39.84	0.62	5	38.28	38.33	0.12
6	42.12	41.80	0.77	6	41.41	41.65	0.59
7	44.68	44.92	0.54	7	49.22	49.55	0.67
8	50.08	50.00	0.16	8	53.91	53.86	0.08
9	54.06	54.30	0.44	9	55.86	55.60	0.46
10	56.22	56.25	0.06	10	60.55	60.52	0.04

6.3 Qualificazione numerica della camera riverberante

Dopo aver validato il modello, confrontando la FFT ottenuta dalle misure sperimentali con quella ottenuta numericamente, viene eseguita la qualifica numerica della camera riverberante secondo la norma UNI EN ISO 3741. Viene ora mostrata soltanto la parte riguardante la misura delle sorgenti di rumore con componenti di frequenze discrete.

La simulazione viene svolta secondo la configurazione con 4 diffusori statici e 6 punti microfoniche discreti, mentre la posizione sorgente viene collocata sul pavimento, in analogia alla condizione di misura sperimentale. La sorgente, non presente nell'analisi agli autovalori, viene simulata come un monopolo con un'eccitazione pari a 1 W costante in frequenza. Le frequenze di analisi sono quelle indicate nel prospetto D.2 della norma [1], dove sono riportati i valori delle frequenze discrete necessarie per la validazione della camera secondo lo standard di misura. La mesh viene inoltre impostata in modo tale da arrivare ad una frequenza di terzo di ottava massima pari a 500 Hz. Determinato il livello di pressione sonora numerico alle varie postazioni microfoniche, si calcola lo scarto tipo s_f numerico, come definito in equazione 1. In figura 10 viene riportato il confronto tra l'andamento numerico e quello sperimentale dello scarto tipo s_f ottenuto per la configurazione con 6 postazioni microfoniche discrete.

In conclusione, il responso del collaudo virtuale è analogo a quello sperimentale, poiché vi è un buon accordo tra le due curve, le quali presentano un massimo scostamento, pari a 1.3 dB, alla banda di terzo di ottava di 100 Hz. Le principali approssimazioni, che determinano le differenze rilevate tra i 2 andamenti, sono imputabili alle condizioni al contorno imposte nel modello: la prima riguarda la condizione di impedenza imposta alle pareti, costante per ciascun terzo di ottava; la seconda riguarda una rappresentazione semplificata della sorgente sonora, la quale, simulata con potenza costante in frequenza, non è caratterizzata dal reale spettro di emissione.

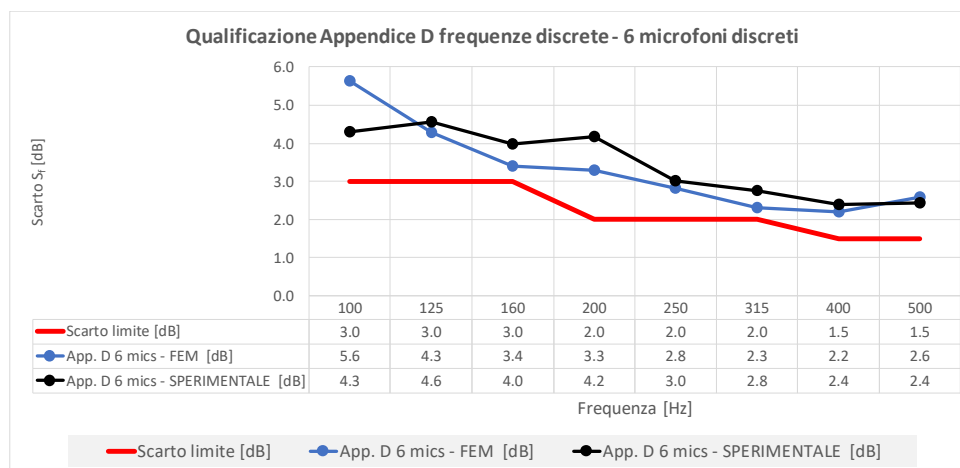


Figura 10 – Confronto tra andamento numerico e sperimentale: Appendice D [1] – Comparison between numerical and experimental: Annex D [1].

Conclusioni

In questo articolo è stata presentata l'intera analisi, sperimentale e numerica, di cui la camera riverberante del Dipartimento di Ingegneria dell'Università di Ferrara è oggetto. Dopo una prima introduzione al concetto teorico di campo diffuso, che permette di collegare con semplici relazioni matematiche le grandezze misurate a quelle di interesse, vengono descritte le principali procedure di collaudo sperimentali. Tali procedure, definite nelle norme [1] e [2], sono necessarie per verificare l'idoneità dello spazio di misura. Particolare attenzione si è posta sulla qualificazione per la misura di sorgenti sonore con componenti di frequenze discrete: la camera risulta infatti oltre i limiti imposti dalla norma, mostrando un'elevata variazione spaziale del livello di pressione sonora, causato da un marcato comportamento modale della camera a bassa frequenza. Viene inoltre riportata la procedura di collaudo eseguita durante l'introduzione dei diffusori statici, mostrando come l'aumento di assorbimento associato sia in realtà trascurabile rispetto all'errore ottenuto.

La seconda fase dell'articolo riguarda la nuova metodica di determinazione del tempo di decadimento modale e delle relative curve di decadimento, tramite il post processamento della risposta all'impulso. Applicando tale metodica alle diverse configurazioni della camera riverberante, è stato possibile mostrare come i diffusori statici agiscano su determinati modi, sia a livello di decadimento temporale (transitorio) che di forma modale (stazionario). Il confronto con altre metodiche sperimentali (metodo della mezza potenza di banda e tempo di riverberazione secondo la UNI EN

ISO 3382-2), mostra come la post elaborazione della risposta all'impulso riesca a fornire maggiori informazioni riguardo i singoli modi, ponendo attenzione soprattutto su quegli standard di misura che forniscono valori costanti all'interno di bande in percentuale di frequenza.

Viene riportata infine l'analisi numerica effettuata al FEM. Le simulazioni svolte sono molteplici: analisi agli autovalori per la determinazione delle frequenze e forme modali; qualifica numerica dell'ambiente di misura secondo la [1]. In entrambi i casi, lo strumento di simulazione mostra un buon accordo con i dati sperimentali, sottolineando l'importanza di tale mezzo nello studio del campo sonoro in ambiente circoscritto e in fase di progettazione di nuovi laboratori.

Conclusions

In this article the experimental and numerical analysis was presented, of which the reverberating room of the Engineering Department of the University of Ferrara is under test. After a first introduction to the theoretical concept of diffuse field, which allows to link the measured quantities to those of interest with simple mathematical relations, the main experimental testing procedures are described. These procedures, defined in the standards [1] and [2], are necessary to verify the suitability of the measurement space. Particular attention has been placed on the qualification for the measurement of sound sources with discrete frequency components: the camera is in fact beyond the limits imposed by the standard, showing a high spatial variation of the sound pressure level, caused by the modal behavior of the camera at low frequencies. The test procedure carried out during the introduction of the static diffusers is also reported, showing how the increase in absorption is in fact negligible compared to the measurement error.

The second part of the article concerns the new method to calculate the modal decay time and the related decay curves, through the post processing of the impulse response. By applying this method to the different configurations of the reverberation chamber, it was possible to show how the static diffusers act on different modes, both in terms of temporal decay (transitory) and modal form (stationary). The comparison with other experimental methods (half-bandwidth method and reverberation time by the UNI EN ISO 3382-2), shows how the post-processing of impulse response is able to provide more information regarding the individual modes, with particular attention to those measurement standards that provide constant values within third octave bands.

Finally, the numerical analysis, using the FEM, is reported. The simulations performed are many: eigenvalue analysis, in order to calculate the modal frequencies and modal forms; numerical qualification of the measurement environment according to [1]. In both cases, the simulation tool shows a good agreement with the experimental data, underlining the importance of this method to study the sound field in a closed space and during the design phase of new laboratories.

Bibliografia

- [1] UNI (2010). UNI EN ISO 3741:2010. Determinazione dei livelli di potenza sonora e dei livelli di energia sonora delle sorgenti di rumore mediante misurazione della pressione sonora. metodi di laboratorio in camera riverberante.
- [2] UNI (2003). UNI EN ISO 354:2003. Acustica: Misura Dell'assorbimento Acustico In Camera Riverberante.

- [3] Jacobsen F. (1979). The diffuse sound field: statistical considerations concerning the reverberant field in the steady state, Report No 27 Technical University of Denmark, pp.11-22.
- [4] Jacobsen F. (2011). The Sound Field in a Reverberation Room, Note No 31261 Technical University of Denmark, 2011.
- [5] Hopkins C. (2007). Sound Insulation. Elsevier, Oxford, 2007.
- [6] Waterhouse R.V. (1955). Interference Patterns in Reverberant Sound Fields. J. Acoust. Soc. Am.
- [7] Schroeder M.R. (1965). New Method of Measuring Reverberation Time. J. Acoust. Soc. Am., 37, pp.409–412.
- [8] Schultz T.J. (1971). Diffusion in Reverberation Rooms, Journal of Sound and Vibration.
- [9] Prato A., Schiavi A., Casassa F. (2016). Reverberation Time Measurements in non-diffuse Acoustic Field by the Modal Reverberation Time. Applied Acoustic.