

IL PALAZZO DE ANDRE' DI RAVENNA: UN ESEMPIO DI CORREZIONE ACUSTICA EFFETTUATA MEDIANTE STUDIO SU MODELLO IN SCALA

Patrizio Fausti (*), Alessandro Cocchi (**), Angelo Farina (***)

(*) Istituto di Ingegneria, Università di Ferrara - Via Scandiana, 21 - Ferrara

(**) Istituto di Fisica Tecnica - Facoltà di Ingegneria - Viale Risorgimento, 2 - Bologna

(***) Dipartimento di Ingegneria Industriale - Università di Parma - Via delle Scienze - Parma

SOMMARIO

In questa memoria viene presentato un esempio di studio della correzione acustica di un palazzo dello sport effettuata mediante prove su modello in scala e successiva verifica mediante rilievi sperimentali sulla sala reale. Lo studio sul modello in scala ha permesso di individuare e correggere i principali difetti acustici quali echi, concentrazioni sonore e ombre acustiche. Con tale tecnica è stato anche possibile dimensionare una "camera acustica" avente la funzione di adattare l'acustica di tale ambiente per permettere l'effettuazione di manifestazioni concertistiche. In tale modo è stato possibile ridurre gli echi e le riflessioni dannose provocate dal volume così elevato e rinforzare il suono nei punti più lontani dal palcoscenico. I rilievi sperimentali sulla sala reale sono stati effettuati con moderne tecniche di analisi ed hanno permesso di verificare la forma e la collocazione della camera acustica oltre che misurare i principali parametri acustici che non è stato possibile calcolare con la tecnica dei modelli in scala.

INTRODUZIONE

L'acustica delle sale da concerto o delle sale per opera lirica e, in generale, delle sale progettate e realizzate per un uso prestabilito, è stata da sempre oggetto di numerosi ed approfonditi studi. Per le sale destinate invece ad un uso polivalente, come ad esempio i palazzi dello sport, dove si tengono oggi, oltre alle manifestazioni sportive, anche spettacoli musicali, manifestazioni culturali e riunioni politiche, le ricerche in campo acustico sono ancora carenti.

La tendenza in atto è quella di dotare tali ambienti di particolari accorgimenti al fine di poter variare le caratteristiche acustiche interne a seconda del tipo di manifestazione che vi si deve svolgere. Nasce così una certa affinità con le sale da spettacolo vere e proprie, e di conseguenza le esigenze che hanno sempre caratterizzato queste ultime si riflettono ora anche sulle nuove strutture. La differenza sostanziale tra le due è costituita dalla volumetria, nettamente maggiore nei palazzi dello sport, e quindi la loro progettazione acustica deve essere indirizzata verso la correzione ed il contenimento dei difetti acustici che possono derivare dai loro imponenti volumi.

I problemi più frequenti legati a questi tipi di strutture, sono dovuti all'eccessivo tempo di riverberazione ed a fenomeni di eco. Inoltre nelle sale polifunzionali di grandi dimensioni si possono verificare problemi per la limitazione e sfruttamento delle riflessioni multiple ai fini di una chiara ed efficace audizione, per la distribuzione dell'energia sonora in modo uniforme a tutti gli ascoltatori e per la conservazione delle caratteristiche delle onde sonore che, a causa di riflessioni o assorbimenti selettivi, potrebbero compromettere il godimento del suono e delle armoniche originarie.

In questa memoria viene presentata la procedura seguita per migliorare l'acustica di un palazzo dello sport e permetterne l'utilizzo per manifestazioni musicali di grande importanza.

TECNICHE DI MISURA

La correzione acustica del palazzo dello sport è stata effettuata mediante studio su modello in scala e successiva verifica mediante rilievi sperimentali sulla sala reale.

Le indagini con modelli in scala, già ampiamente descritte in altre memorie [1,2,3,4], vengono condotte mediante la tecnica impulsiva, con la quale è possibile individuare, con una opportuna strumentazione, la distribuzione temporale delle riflessioni multiple nell'ambiente chiuso. La risposta all'impulso è rappresentata da un diagramma che riporta in ascissa il tempo (in genere limitato ai primi 200-250 ms) e in ordinata le pressioni sonore corrispondenti all'arrivo sul microfono dell'onda diretta e delle onde riflesse successive. Dalla lettura dei tempi di ritardo delle successive riflessioni, considerando il rapporto di scala, si individuano facilmente le riflessioni pericolose per la formazione di echi. Con tale tecnica è possibile individuare le superfici che generano riflessioni fastidiose, e quindi le zone dove andranno effettuati interventi di correzione acustica con materiali fonoassorbenti o superfici diffondenti.

L'uso di un modello deve risultare vantaggioso sia sotto il profilo della semplicità d'impiego che sotto quello economico; inoltre il modello deve riprodurre correttamente i fenomeni fisici oggetto di studio. Quest'ultima condizione viene garantita dal rispetto di opportuni "criteri di similitudine".

Nei modelli fisici in scala deve essere garantita, oltre alla similitudine geometrica, quella dei seguenti fenomeni:

- a) similitudine del campo acustico;
- b) similitudine delle condizioni al contorno;
- c) similitudine delle sollecitazioni.

Il rispetto della prima condizione implica l'inversa proporzionalità tra la scala delle lunghezze e quella delle frequenze (teorema di Savart). Ciò porta a limitare il fattore di riduzione dei modelli; infatti la rappresentazione di ambienti grandi tramite modelli realizzati con un rapporto di scala troppo piccolo richiederebbe l'uso di frequenze molto elevate, tali da non poter essere studiate con le correnti strumentazioni acustiche.

Le superfici di contorno, come suggerisce la seconda condizione, devono in pratica presentare la stessa impedenza acustica di quelle reali, opportunamente traslata in frequenza, il che impedisce l'impiego degli stessi materiali dell'edificio reale per la costruzione del modello. Infatti, poiché l'impedenza è funzione della frequenza, si debbono utilizzare materiali che, alle alte frequenze impiegate nelle prove sul modello, forniscano valori dell'impedenza simili a quelli che le pareti dell'edificio reale hanno alle frequenze consuete.

La terza condizione dipende sostanzialmente dall'origine delle sollecitazioni stesse. Se queste ultime provengono da una sorgente di rumore aereo interna all'ambiente è sufficiente il rispetto delle prime due condizioni affinché sia rispettata anche la terza; nel caso, invece, di una vibrazione strutturale, dovrà essere rappresentato correttamente sul modello l'andamento delle sollecitazioni.

I rapporti di scala normalmente utilizzati per i modelli fisici sono compresi tra 1/10 e 1/100. La scelta del rapporto di scala condiziona enormemente la natura delle misure che si possono realizzare. Con l'utilizzo di modelli in scala 1:50 o 1:100 si possono misurare molti dei parametri acustici che interessano queste sale polivalenti ed il loro piccolo ingombro ed il costo contenuto li rende maggiormente utilizzabili rispetto a modelli di grandi dimensioni. Le misure su modelli vengono effettuate con strumentazioni particolarmente sensibili. Vengono utilizzati microfoni molto piccoli, sensibili anche agli ultrasuoni, e analizzatori che estendono il campo di frequenze misurato fino a 100 kHz. Come sorgenti sonore si utilizzano piccoli altoparlanti agli ultrasuoni alimentati con rumore stazionario, oppure scintille elettriche, che sono in grado di emettere energia fino a 200 kHz, per la simulazione di rumori impulsivi. L'uso di frequenze molto elevate è richiesto dal rispetto dei criteri di similitudine già illustrati.

I modelli vengono realizzati tenendo conto del tipo di studio acustico che si intende effettuare; in molti casi, pertanto, è sufficiente soddisfare solo quelle condizioni di similitudine che si rendono necessarie per il caso in esame.

Generalmente questi modelli vengono realizzati con materiali che non consentono di soddisfare la condizione di similitudine al contorno e i parametri determinabili direttamente sono solo gli echi e l'ITDG (tempo di ritardo della prima riflessione laterale).

Questo modo di procedere è quello più largamente utilizzato e, per quanto limitato, consente di valutare i fenomeni che influiscono fortemente sull'acustica della sala. Inoltre è possibile combinare questa metodologia con un'analisi numerica e pervenire alla quantificazione degli altri parametri fondamentali.

I rilievi sperimentali sulla sala reale sono stati effettuati utilizzando diverse tecniche di misura basate sia sull'uso di un analizzatore in tempo reale, sia sulla registrazione della risposta all'impulso e successiva analisi, sia sull'uso di un segnale pseudo-casuale (MLSSA) per la determinazione della risposta all'impulso. Il confronto tra i risultati ottenuti con le diverse tecniche è già stato riportato in altre memorie [3,5,6,7].

L'impiego di analizzatori di spettro in tempo reale (FFT o in terzi d'ottava) consente la misurazione diretta di alcuni parametri acustici molto importanti, quale lo spettro sonoro prodotto da una sorgente di rumore rosa o bianco (che fornisce la "coloritura" della sala), ed i tempi di riverberazione nelle diverse bande di frequenza. Solitamente non è possibile calcolare i valori dei criteri di chiarezza (rapporti fra energia utile ed energia tardiva, tempo baricentrico) se non tramite un computer collegato agli analizzatori, dotato di programmi che debbono essere realizzati allo scopo.

La registrazione della risposta impulsiva e successiva analisi in laboratorio è una tecnica molto semplice che permette di evitare il trasporto nella sala di strumentazioni molto ingombranti. Mediante un piccolo magnetofono digitale portatile (DAT) è possibile registrare la risposta all'impulso provocata da colpi di pistola; sfruttando i due canali di registrazione, è possibile impiegare una cuffia microfonica binaurale, cosicché dalla successiva elaborazione delle registrazioni con un analizzatore FFT bicanale è possibile calcolare anche il valore della Correlazione Mutua Inter-Aurale (IACC). Dalle risposte all'impulso possono poi venire calcolati quasi tutti i parametri acustici più importanti: tempi di riverbero, tramite integrazione all'indietro di Schroeder, rapporti di chiarezza (R, t_b) [8], etc.

Con la tecnica pseudo-impulsiva con MLSSA i rilievi vengono eseguiti impiegando un PC dotato della scheda di acquisizione dati A2D160 e del software MLSSA. Il PC viene connesso ad un altoparlante mentre il campo sonoro è rilevato mediante testa artificiale con microfoni auricolari Senheiser MKE 2002 SET.

La scheda A2D160 genera un segnale deterministico pseudocasuale, che viene correlato con il segnale ricevuto tramite il microfono; mediante la trasformata rapida di Hadamard, è possibile

ottenere direttamente nel dominio del tempo la funzione di correlazione, che fornisce la risposta all'impulso cercata. Il software di cui la scheda è dotata, denominato MLSSA, consente poi direttamente il calcolo di tutti i descrittori acustici già citati, oltre che numerosi altri, nonché la valutazione della matrice delle Modulation Transfer Function, da cui possono essere ottenuti RASTI ed STI. Per quanto riguarda questi ultimi due parametri, va osservato che la misura è a norma solo se l'altoparlante è costituito dalla cosiddetta "bocca artificiale", che riproduce esattamente la potenza sonora, lo spettro e la direttività della voce umana media.

PROGETTO ACUSTICO DI UN PALAZZO DELLO SPORT

In questo paragrafo viene descritto il procedimento seguito per progettare acusticamente l'interno di un palazzo dello sport in modo da permetterne l'utilizzo per manifestazioni musicali. Lo studio sperimentale è stato effettuato lavorando su due diversi ambienti: la sala reale e il modello in scala.

La caratteristica fondamentale del palazzo dello sport è la copertura costituita da quattro spicchi di volta a botte di un telo membranoso (Sherfill) sorretto da una struttura reticolare. La sala principale è a pianta quadrata e su due lati vi sono le gradinate che hanno la possibilità di scorrere su due binari fino all'esterno attraverso ambienti laterali con pareti mobili. La struttura è stata quindi realizzata per essere estremamente flessibile e permettere la realizzazione dei più svariati allestimenti interni. Il volume dell'ambiente principale è molto elevato a causa della elevata altezza della copertura.

Il modello in scala è stato realizzato allo scopo di studiare gli allestimenti interni e le varie configurazioni per gli spettacoli che si svolgono nella sala. Il modello è stato realizzato in poliuretano espanso ricoperto di cartoncino il quale possiede proprietà altamente riflettenti. La scelta dei materiali è stata dettata da esigenze di tipo specifico. Questo modello è stato infatti realizzato con lo scopo di ottenere similitudine geometrica e similitudine del campo acustico in modo da poter effettuare correttamente lo studio dell'andamento delle riflessioni tralasciando il problema relativo al tempo di riverberazione, direttamente analizzabile in opera.

I problemi che sono stati affrontati sono i seguenti:

- determinazione del valore del coefficiente di assorbimento della membrana di copertura, con approccio Sabiniano conoscendo il volume e le unità assorbenti delle altre superfici, al fine di calcolare il tempo di riverberazione teorico della sala con i diversi allestimenti progettati per spettacoli musicali;
- individuazione dei principali difetti acustici e loro possibile eliminazione mediante prove sull'edificio reale e sul modello;
- analisi dei vantaggi o svantaggi relativi all'impiego di una conchiglia riflettente, già esistente, da utilizzare per il rinforzo del suono prodotto da un'orchestra (figura 1);
- analisi dei risultati ottenuti con l'impiego di un riflettore acustico appositamente progettato per questa sala (figure 2,3).

Il grande vantaggio ottenuto con l'impiego del modello in scala è stato di poter effettuare ed analizzare in modo rapido e preciso un gran numero di misure per ogni tipo di allestimento interno considerato e poter effettuare confronti tra le varie ipotesi di progetto.

L'impiego della conchiglia riflettente elimina solo in parte gli echi dovuti alla superficie di copertura e non riesce ad offrire un certo rinforzo sonoro a tutti gli ascoltatori presenti nella sala. Questo è dovuto al fatto che la sua struttura non consente di coprire interamente l'orchestra in quanto la conchiglia era stata progettata per essere utilizzata in ambiente esterno di fronte ad una piazza stretta e lunga (Spoleto).

I risultati riguardanti l'impiego del riflettore acustico appositamente progettato hanno messo

in luce che elimina quasi tutti gli echi dovuti alla superficie di copertura permette il rinforzo sonoro, anche se non in modo completamente uniforme, in tutti i posti in cui è collocato il pubblico. La configurazione ottimale viene infine ottenuta inserendo materiale fonoassorbente nelle posizioni critiche individuate con gli studi effettuati. In tal modo si può inoltre controllare il tempo di riverberazione in funzione del tipo di spettacolo.

Il diagramma in figura 4 mostra i risultati dell'inserimento del riflettore acustico progettato ottenuti con le prove sul modello. Si nota che scompaiono tutte le riflessioni dannose e compaiono picchi di rinforzo sonoro.

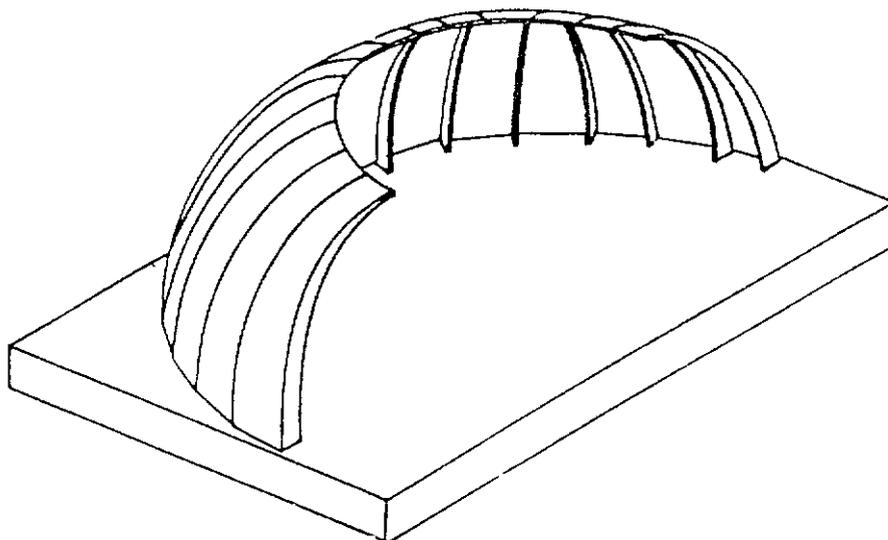


Figura 1: Conchiglia esistente usata per il rinforzo del suono prodotto dall'orchestra

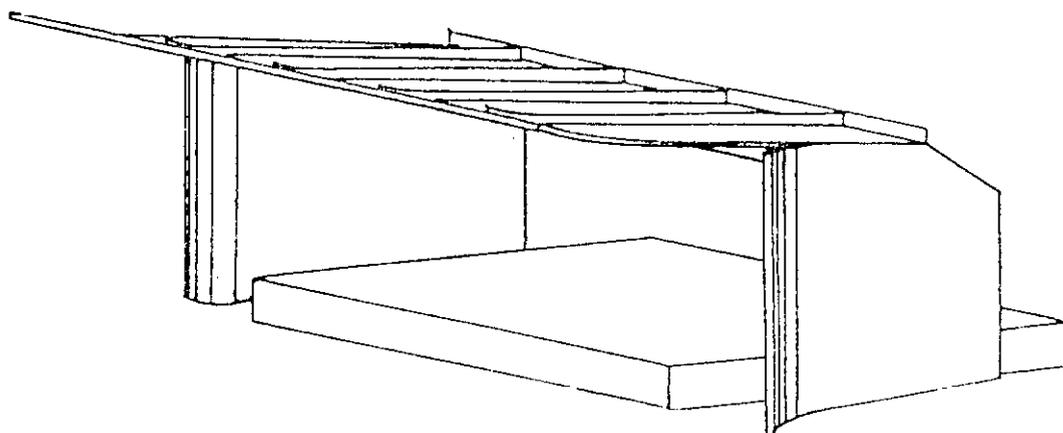


Figura 2: Camera acustica appositamente progettata mediante studio su modello in scala

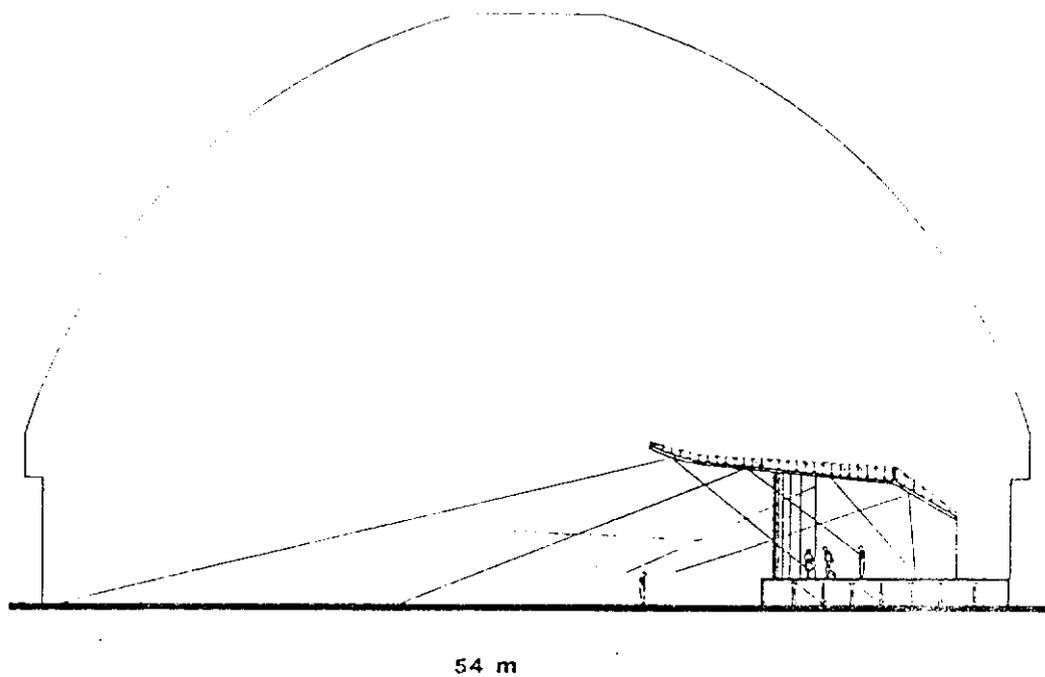


Figura 3: Collocazione interna della camera acustica con alcuni esempi di riflessioni utili

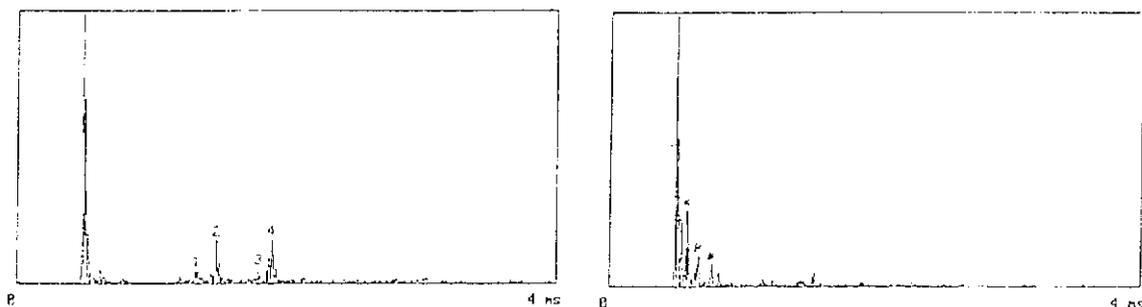


Figura 4: Confronto tra le risposte all'impulso ottenute prima e dopo l'introduzione della camera acustica

VERIFICHE SPERIMENTALI DOPO L'ALLESTIMENTO DELLA SALA

Le misure sulla sala reale sono state effettuate sia nella configurazione prevista per le manifestazioni sportive e sia nella configurazione per manifestazioni musicali con la camera acustica appositamente progettata.

Nella figura 5 è stato messo a confronto il tempo di riverberazione nelle due configurazioni. Entrambe i rilievi sperimentali sono stati effettuati in assenza di pubblico sulle gradinate. Si può vedere che la presenza della camera acustica riduce fortemente il tempo di riverberazione alle medie frequenze, dove i valori sono più critici. Ciò è dovuto al fatto che la presenza dei

riflettori al di sopra della sorgente sonora e ai lati, riduce il libero cammino medio delle onde sonore e di conseguenza il tempo di riverberazione. Inoltre, il campo acustico diventa parzialmente non sabiniano, poiché le prime riflessioni sono indirizzate prevalentemente verso la platea, dove la presenza di sedili, anche se in plastica, produce un certo assorbimento acustico e soprattutto impedisce ulteriori riflessioni speculari.

Nella figura 6 vengono messe a confronto, per la configurazione concertistica, le risposte in frequenza al crescere della distanza. Come si può notare i livelli alle varie frequenze diminuiscono progressivamente fino a circa 20 metri di distanza dalla sorgente, mentre per distanze superiori rimangono pressoché costanti, almeno finché si rimane entro la zona in cui perviene l'onda riflessa proveniente dalla camera acustica. A questo proposito va detto che in presenza di una ulteriore gradinata posta dietro la platea occorre aumentare l'inclinazione della copertura della camera d'orchestra poiché essa è attualmente calibrata per non inviare energia sonora verso la parete di fondo della sala.

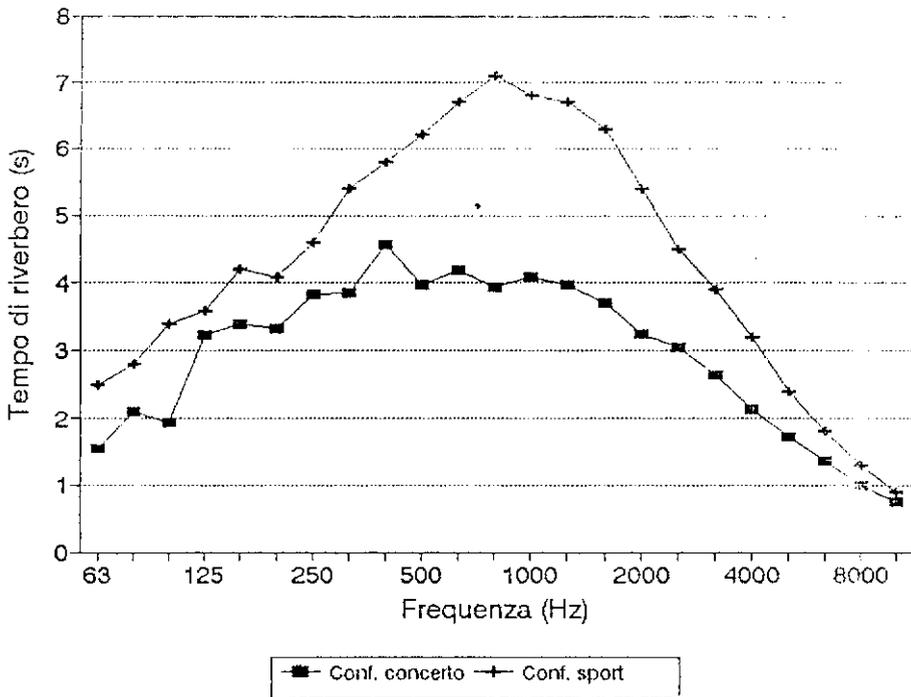


Figura 5: Confronto tempi di riverberazione prima e dopo l'introduzione della camera acustica

CONCLUSIONI

I palazzi dello sport sono sempre più spesso utilizzati non solo per manifestazioni sportive ma anche per spettacoli, conferenze e manifestazioni musicali. La possibilità di utilizzare tali ambienti per manifestazioni concertistiche di grande importanza richiede una severa progettazione acustica tendente ad eliminare i notevoli problemi causati dai grandi volumi e a permettere una buona qualità dell'ascolto.

In questo lavoro è stato presentato un esempio di correzione acustica di un palazzo dello sport effettuato mediante studio su modello in scala e successiva verifica nella sala reale. Con lo

studio sul modello è stato possibile individuare i principali difetti acustici e progettare una apposita camera d'orchestra tendente a ridurre tali problemi e a rinforzare il suono verso le posizioni più lontane della platea. Le misure effettuate dopo la realizzazione dell'allestimento della sala hanno permesso di verificare il corretto posizionamento della camera d'orchestra e valutare gli effetti migliorativi di tale intervento.

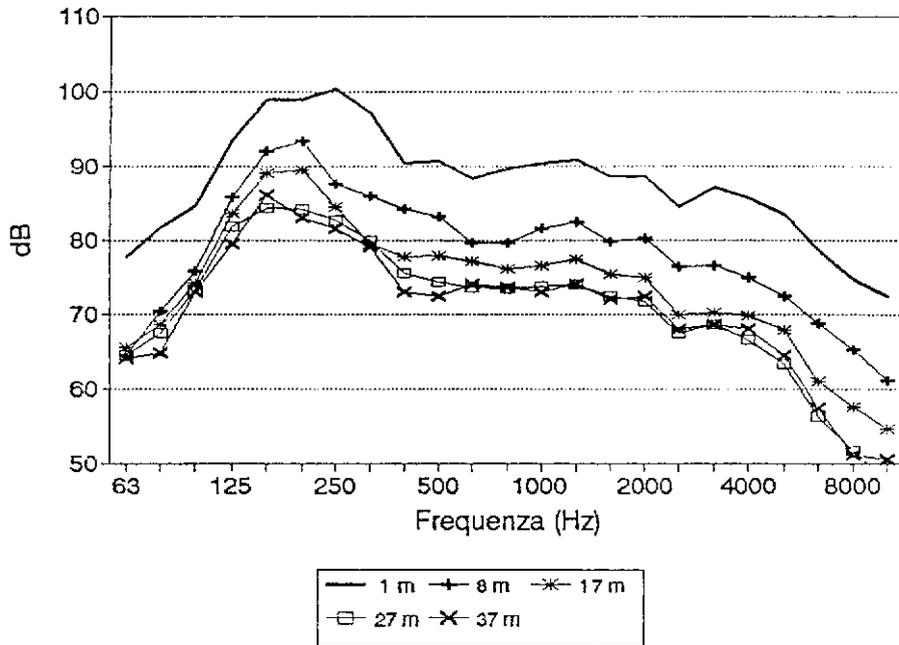


Figura 6: Variazione dello spettro sonoro con la distanza: configurazione per concerti

BIBLIOGRAFIA

- [1] A. Cocchi, A. Farina, L. Rocco, Reliability of Scale-Model Researches: a Concert Hall Case, *Applied Acoustics*, vol. 30 no. 1 (1990) pagg. 1-13.
- [2] A. Cocchi, P. Fausti, Metodologie di valutazione delle caratteristiche acustiche dei palazzetti dello sport, XVIII Convegno Nazionale AIA, L'Aquila (1990).
- [3] P. Fausti, A. Cocchi, The acoustics of Sports Halls, 14° ICA Congress, Beijing, 1992.
- [4] A. Cocchi, P. Fausti, G. Raffellini, L'acustica nei palazzi dello sport: problemi generali e studi di previsione effettuati per il palazzo dello sport polivalente di Casalecchio (BO), Inarcos, settembre 1993.
- [5] A. Cocchi, A. Farina, Rilevamento sperimentale delle caratteristiche acustiche dei teatri e delle sale da spettacolo, Atti del XVI Convegno AIA 1988, Milano, (1988).
- [6] A. Cocchi, P. Fausti, A. Farina, Qualificazione acustica dei palazzi dello Sport: alcuni casi sperimentali, XIX Convegno Nazionale AIA, Napoli, (1991).
- [7] A. Cocchi, A. Farina, P. Fausti, M. Garai, G. Semprini, New possibilities in Room Acoustics Measurements: Real-Time Analyzers, DAT, Computer: a comparative approach, FASE Congress, Zurigo, 1992.
- [8] L.L. Beranek, T.J. Schultz, Some recent experiences in the design and testing of concert halls with suspended panel arrays, *Acustica*, vol. 15, p. 307 (1965).