



Attendibilità dei Metodi Computerizzati di Auralizzazione nello Studio Acustico di un Palazzetto dello Sport

A. Farina*, L. Rocco**, S. Sauro**

- * Dipartimento Ingegneria Industriale, Università di Parma
** Dipartimento Processi e Metodi Prod. Edilizia, Università di Firenze.

Abstract

Measurement of 4 acoustical criteria, characterizing the ambient of a Sport Palace, were carried out and their values were after compared with the calculated values obtained by a program based on the Pyramid Tracing method, ascertaining a good agreement between the experimental and calculated results, mainly for the mean frequencies.

Defined two acoustical treatment hypothesis of the ambient in order to reduce the reverberation time, a comparison between the experimental and calculated impulse responses, working with speech and music signals, was carried out; by the hearing of convoluted signals it was then possible verify the substantial correspondence of the mathematical model to the physical reality and subjectively judge the effects of the proposal treatments.

1. Premessa

La tipologia dei Palazzetti dello Sport rientra in quella categoria di spazi caratterizzati da ambienti di notevole volume, di forma semplice sviluppati prevalentemente in pianta e con altezze rispetto all'estensione della pianta stessa relativamente contenute, spazi che generalmente richiedono, per il loro utilizzo come sale di audizione, interventi di correzione acustica.

I problemi più frequenti legati a questo tipo di strutture sono dovuti al notevole volume e alla presenza di estese superfici molto riflettenti che si traducono in elevati tempi di riverberazione e, se la copertura è a cupola o a volta, in fenomeni di focalizzazione dell'energia sonora. Per lo studio della correzione acustica di questi spazi sono attualmente disponibili metodi di calcoli computerizzati che consentono di simulare varie soluzioni di intervento.

Per verificare l'attendibilità di tali metodi è stato condotto su uno di questi spazi, il Palazzetto dello Sport di Modena - che per le sue dimensioni ben si presta allo scopo - un confronto fra i valori sperimentali di alcune grandezze caratterizzanti l'acustica degli spazi confinati ed i valori delle stesse ricavati col calcolo.

2. Misure sperimentali

Per lo studio del campo sonoro del Palazzetto dello Sport di Modena e dei possibili interventi di correzione acustica sono stati presi in considerazione i seguenti parametri acustici

- Tempo di riverberazione RT20, tempo necessario in secondi affinché il livello sonoro decada di 20 dB dalla cessazione del segnale.
- Early Decay Time EDT o T10, tempo necessario in secondi affinché il livello sonoro decada dei primi 10 dB dalla cessazione del segnale.
- Indice di chiarezza C80 definito dalla relazione:

$$C = 10 \log \left[\int_0^{80_{ms}} p^2(t) dt - 10 \log \int_{80_{ms}}^{\infty} p^2(t) dt \right] \quad (\text{dB})$$

descrittore della percezione soggettiva di nitidezza della musica. Da un punto di vista soggettivo infatti la chiarezza dell'ascolto in un punto della sala è legata alla parte iniziale della riverberazione, mentre la rimanente parte contribuisce negativamente o risulta indifferente alla chiarezza stessa. L'intervallo nel tempo della parte utile è legato al tempo di integrazione dell'orecchio umano, cioè all'intervallo di tempo in cui l'energia riverberata viene associata al suono emesso; la chiarezza del messaggio è legata ad un tempo di integrazione di 50 ms per la parola e di 80 ms per la musica.

- Istante baricentrico dell'energia Ts, descrittore della chiarezza del segnale, rapporto fra la somma dei prodotti degli elementi dell'energia di riverberazione per i rispettivi intervalli di tempo a partire da t_0 , istante in cui il segnale cessa e l'energia totale di riverberazione, secondo la relazione:

$$T_s = \frac{\int_0^{\infty} t p^2(t) dt}{\int_0^{\infty} p^2(t) dt} \quad (\text{s})$$

Per l'effettuazione delle misure fonometriche in opera è stata impiegata come sorgente sonora il colpo di pistola sorgente che si può assumere come omnidirezionale di tipo impulsivo, collocata nel punto ove abitualmente viene collocato il palco in concomitanza di eventi musicali.

Sono stati scelti 44 punti di ricezione, disposti come in Fig. 1, in ognuno dei quali è stata fatta la registrazione con un DAT delle risposte all'impulso del colpo di pistola.

Ogni risposta all'impulso registrata sul DAT è stata poi rielaborata al PC con software "Melissa", che ha permesso di restituire graficamente i reflectogrammi di ciascuna posizione e di ottenere tramite l'analisi delle risposte all'impulso tutti i valori numerici dei parametri considerati.

I valori del tempo di riverberazione T20 e dell'EDT sono risultati superiori ai valori ottimali, attestandosi a 1000 Hz intorno a 5,45s per l'RT20 e a 5,51s per l'EDT. L'indice di chiarezza è risultato anch'esso molto al di fuori dell'intervallo ritenuto ottimale, attestandosi a

1000 Hz su valori di -6,6 dB. I valori dell'istante baricentrico Ts sono risultati a 1000 Hz mediamente pari a 390 ms e cioè superiori al valore ottimale alle medie frequenze che è inferiore a 140ms.

3. Simulazione del campo sonoro

L'acustica dello spazio interno del Palazzetto dello sport è stata simulata al computer utilizzando il software di previsione "Ramsete" del campo sonoro in grandi ambienti ed in esterno.

Il programma Ramsete è un pacchetto software costituito da sette programmi: Ramsete Cad, Material Manager, Source Manager, Ramsete Trace Win, Ramsete Trace Dos, Ramsete Graf, Ramsete View.

Ramsete Cad è un vero e proprio Cad per la creazione di visioni assonometriche e tridimensionali della sala oggetto di studio.

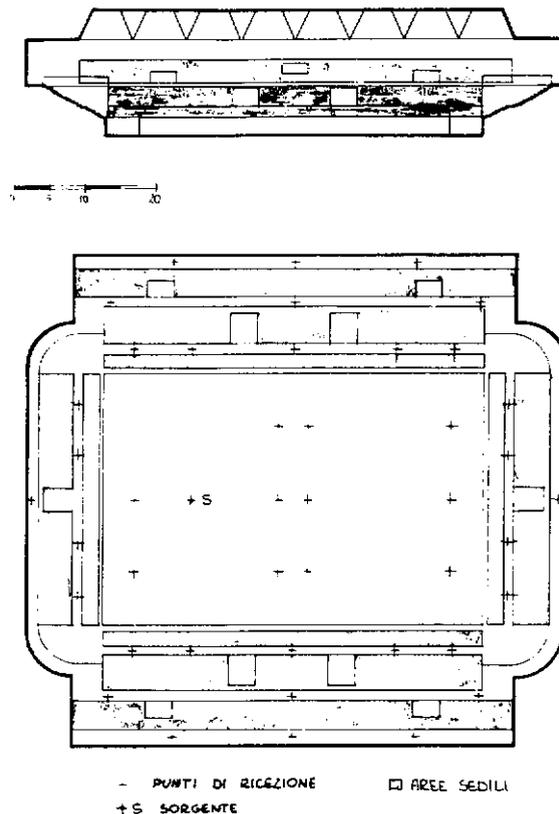


FIG. 1: SEZIONE LONGITUDINALE E PIANTA DEL PALAZZETTO DELLO SPORT

Il Material Manager è invece costituito da un ambiente di "foglio elettronico", nel quale vengono inseriti i dati relativi al coefficiente di assorbimento ed isolamento acustico dei materiali nelle 10 bande di ottava di frequenza da 31,5 Hz a 16 kHz.

Per generare e visualizzare i files che contengono i dati sulle sorgenti sonore si utilizza il Source Manager; per mezzo di questo programma è possibile importare files che contengono le caratteristiche delle casse acustiche eventualmente utilizzabili come sorgente.

I files elaborati da Ramsete Trace, che costituisce il tracciatore di piramidi vero e proprio, vengono letti da Ramsete Graf, il quale consente di visualizzare in forma grafica le seguenti informazioni: risposta all'impulso in ciascun ricevitore, risposta integrata con Schroeder (curva di decadimento), spettro di ottave in ciascun punto ricevente, tabelle numeriche di tutti i dati.

Infine Ramsete View consente di effettuare visualizzazioni tridimensionali prospettiche di quanto realizzato con Ramsete Cad o con Autocad e di mappare in pianta o in prospettiva i risultati di Ramsete Graf.

La tecnica di modellizzazione del campo sonoro redatta dal programma Ramsete è denominata Pyramid Tracing e si basa sul tracciamento di piramidi anziché di raggi; essa rappresenta un netto miglioramento rispetto alla più tradizionale tecnica del Ray Tracing, ovviando ai due principali problemi del Ray Tracing, la definizione del volume del ricevitore ed il lungo tempo di elaborazione.

Il modello in scala dell'ambiente interno della struttura oggetto di studio realizzato al calcolatore in grafica tridimensionale attraverso il software di disegno tecnico Autocad, è stato salvato in un file con estensione Dxf e successivamente importato in Ramsete e qui sottoposto ad elaborazione numerica.

La prima fase del lavoro è consistita dunque nell'importare il modello in Ramsete Cad e nel trattarlo inserendo la sorgente ed i vari ricevitori negli stessi punti ed alla stessa altezza di quelli scelti nelle prove sperimentali sulla struttura reale.

La seconda fase è consistita nell'aggiornare il Material Manager con l'inserimento dei coefficienti di assorbimento acustico ipotizzati dei materiali presenti all'interno del Palazzetto.

Successivamente si è provveduto a lanciare Ramsete Trace, il programma tracciatore di piramidi.

4. Risultati del confronto tra i valori sperimentali e quelli calcolati

La corrispondenza tra i valori sperimentali e i valori previsti dal programma è stata ricercata intervenendo sui valori del coefficiente di assorbimento dei materiali di cui sono costituite le superfici interne del Palazzetto.

La stima della affidabilità del programma come simulatore del campo sonoro in questione è stata effettuata calcolando per ciascun punto considerato la differenza tra i valori sperimentali ed i valori calcolati per ciascuna frequenza in banda di ottava tra 125 e 4000 Hz e facendo poi la media aritmetica e lo scarto quadratico medio di queste differenze (v. Tabella 1). Nella suddetta tabella sono riportati inoltre per ciascun parametro considerato la media aritmetica e lo scarto

quadratico medio dei valori sperimentali e la media aritmetica e lo scarto quadratico medio dei valori calcolati.

I risultati dei calcoli sugli scarti sono stati confrontati per ciascun parametro con i limiti della minima variazione avvertibile ("subjective difference limen") stabiliti nella ISO/DIS 3382. Per il tempo di riverberazione RT20 e per l'EDT la variazione minima apprezzabile dell'orecchio umano è pari al 5% della grandezza stessa per l'indice di chiarezza C80 la variazione è avvertibile quando supera i 0,5 dB, mentre per l'istante baricentrico la variazione è apprezzabile quando supera i 10ms rispetto al valore originario.

Per quanto riguarda il tempo di Riverberazione RT20, dal confronto tra i valori ottenuti sperimentalmente ed i valori ottenuti con il programma di calcolo Ramsete (v. Tabella 1) emerge che i valori calcolati sono tutti risultati leggermente più alti di quelli rilevati sperimentalmente

La differenza tra valori sperimentali e valori calcolati è risultata elevata soprattutto alle basse ed alle alte frequenze. A 125 Hz la media delle differenze è pari a 2,8 s con uno scarto quadratico medio fra i vari punti di 1,03 s; rispetto ai valori sperimentali tale differenza è pari a circa il 77% (v. Tabella 2) pertanto molto al di sopra del limite del 5%. A 4000 Hz la media delle differenze, pari a 1,29 s con uno scarto quadratico medio di 0,23 s rappresenta il 38% della media dei valori sperimentali.

Alle medie frequenze, 500 Hz, 1000 Hz e 2000 Hz gli scarti fra i valori sperimentali e i valori calcolati sono invece decisamente più contenuti, essendo inferiori a 0,5 s; tale scarto rappresenta una percentuale che varia tra l'8% e l'1% del valore sperimentale (v. tabella 2). per le suddette frequenze pertanto l'accordo tra valori sperimentali e valori calcolati dal programma Ramsete è da considerarsi ottimo attestandosi in alcuni casi al di sotto del limite di 5%.

Anche per l'Early Decay Time EDT i valori calcolati sono quasi tutti risultati più alti di quelli rilevati sperimentalmente ed anche per questo parametro la differenza è maggiore alle basse frequenze (125 Hz) e alle alte frequenze (4000 Hz) (v. Tabella 1). In particolare a 125 Hz tale differenza rappresenta mediamente il 58% del valore sperimentale, mentre a 4000 Hz essa raggiunge il 70% del valore sperimentale; alle medie frequenze gli scarti sono più contenuti attestandosi tra il 28% ed il 12% dei valori sperimentali. Il programma Ramsete pertanto calcola valori che si attestano su differenze con i valori sperimentali da 3 a 5 volte superiori, alle medie frequenze, al limite della minima variazione avvertibile. Per questo parametro il programma di calcolo qui utilizzato si comporta come altri programmi di previsione del campo sonoro, basati sul Ray Tracing o su altri metodi di simulazione come risulta da uno studio condotto da M. Vorlander [1] dal quale è emerso che l'errore sull'EDT rispetto ai valori sperimentali è da due a cinque volte superiore al limite soggettivo.

Per quanto riguarda l'Indice di Chiarezza C80 l'accordo tra valori sperimentali e valori calcolati è risultato molto meno soddisfacente essendo le differenze medie comprese tra 1,1 dB e 3,3 dB con uno scarto quadratico medio tra i vari punti compreso tra 1,9 e 3,2 dB. I valori calcolati da Ramsete per il C80 sono pertanto nettamente superiori al limite soggettivo che per il

C80 è pari a 0,5 dB, ma anche in questo caso occorre rilevare che il programma si comporta come altri programmi di simulazione di campo sonoro che sono stati oggetto dallo studio menzionato.

In merito all'Istante Baricentrico la differenza fra i valori sperimentali e quelli calcolati è risultata molto variabile essendo mediamente compresa tra 6,2 ms e 72,3 ms con uno scarto quadratico medio intorno a 47+48 ms. Solo per pochi punti e per la frequenza di 500 Hz si hanno differenze inferiori a 10 ms. Pertanto anche per questo parametro non si è ottenuto un accordo soddisfacente tra situazione sperimentale e situazione simulata.

Le differenze sopradescritte emerse con la simulazione ottenuta con il programma di Pyramid Tracing possono essere dovute a due fattori:

- valori del coefficiente di assorbimento ipotizzati per le superfici interne del palazzetto non corrispondenti alla realtà;
- inesatta schematizzazione con il programma Autocad dei volumi e delle forme delle travi reticolari di copertura e delle tribune telescopiche.

Comunque considerando la facilità con cui si è raggiunto tale risultato, senza dover procedere ad una taratura del programma sull'ambiente reale molto accurata, i dati sopra esposti dimostrano che il pacchetto Ramsete è un modello di previsione numerica molto attendibile per le medie frequenze come mezzo di indagine e di previsione sul campo sonoro, mentre deve essere trattato con una certa cautela soprattutto per le basse frequenze ed in parte anche per le alte.

5. Trattamenti acustici e verifiche mediante l'auralizzazione

Il modello così ottenuto è stato utilizzato per lo studio di due ipotesi di trattamento acustico dell'ambiente.

Una prima ipotesi prevedeva l'impiego di tendaggi pesanti da appendere alla struttura delle travi reticolari di sostegno della copertura in modo da ricoprire tutta la superficie.

La seconda soluzione prevedeva l'impiego di una pannellatura in fibra di resina poliestere disposta in modo da ricoprire completamente le travi di copertura.

La prima verifica che è stata eseguita è stato il confronto oggettivo, mediante l'analisi dei valori numerici e dei grafici, tra le soluzioni proposte e le situazioni pre-trattamento, situazione reale e situazione simulata da Ramsete.

La seconda verifica è consistita nella valutazione soggettiva della qualità acustica riscontrabile nelle varie situazioni, senza trattamento e con i trattamenti acustici proposti, mediante l'ascolto dei segnali convoluti ottenuti con la tecnica di auralizzazione [2].

L'auralizzazione è il processo combinato di riverberazione artificiale e ricostruzione della sensazione spaziale prodotta da una sala su un segnale sonoro originariamente anecoico.

Tale effetto è generalmente ottenibile mediante la convoluzione del segnale anecoico originario con due risposte all'impulso relative alle due orecchie (binauralizzazione). Il sistema di auralizzazione utilizzato impiega un PC MS-DOS ed una scheda audio a 16 bit; grazie ad un nuovo algoritmo di elaborazione del segnale nel dominio della frequenza i tempi di elaborazione

TABELLA 1

RT 20

Frequenza (Hz)	Valori sperimentali		Valori calcolati		Differenze	
	Media. aritm.	Scarto quadratico	Media. aritm.	Scarto quadratico	Media. aritm.	Scarto quadratico
125	3,54	0,83	6,42	0,40	2,83	1,03
250	4,67	0,21	5,31	0,24	0,58	0,32
500	5,43	0,11	5,35	0,11	0,07	0,18
1000	5,45	0,07	4,93	0,26	- 0,46	0,21
2000	4,89	0,06	5,01	0,19	0,13	0,21
4000	3,38	0,11	4,68	0,22	1,29	0,23

EDT

Frequenza (Hz)	Valori sperimentali		Valori calcolati		Differenze	
	Media. aritm.	Scarto quadratico	Media. aritm.	Scarto quadratico	Media. aritm.	Scarto quadratico
125	3,43	0,46	5,49	0,49	2,05	0,68
250	4,32	0,31	5,73	0,32	1,52	0,49
500	5,30	0,32	6,83	0,33	1,52	0,35
1000	5,51	0,26	6,19	0,38	0,67	0,37
2000	4,75	0,41	5,97	0,45	1,13	0,40
4000	3,22	0,52	5,49	0,46	2,26	0,53

C80

Frequenza (Hz)	Valori sperimentali		Valori calcolati		Differenze	
	Media. aritm.	Scarto quadratico	Media. aritm.	Scarto quadratico	Media. aritm.	Scarto quadratico
125	- 3,21	3,12	- 1,29	1,57	- 1,92	3,21
250	- 5,44	2,69	- 2,62	1,67	- 2,79	2,47
500	- 6,06	2,09	- 4,29	1,87	- 1,34	2,35
1000	- 6,6	2,03	- 3,26	1,88	- 3,33	1,95
2000	- 5,3	1,77	- 2,73	1,94	- 2,56	1,91
4000	- 3,23	1,67	- 2,12	1,94	- 1,11	2,17

TS

Frequenza (Hz)	Valori sperimentali		Valori calcolati		Differenze	
	Media. aritm.	Scarto quadratico	Media. aritm.	Scarto quadratico	Media. aritm.	Scarto quadratico
125	226,96	57,55	286,7	50,1	- 59,73	73,87
250	308,54	31,51	322,05	46,67	- 13,5	47,12
500	379,74	42,39	424,05	53,01	- 44,31	48,42
1000	394,47	42,19	356,95	50,47	37,52	46,7
2000	336,22	36,54	330	51,33	6,22	44,88
4000	218,86	29,179	291,2	49	- 72,34	47,57

TABELLA 2 — Variazione percentuale dei valori calcolati rispetto ai valori sperimentali

RT 20	
125	77,3%
250	12,3%
500	1,3%
1000	8,6%
2000	2,65%
4000	38,1%

EDT	
125	58,2%
250	34,6%
500	28,5%
1000	11,9%
2000	23,1%
4000	69,3%

sono molti brevi, di un ordine di grandezza inferiori a quelli sinora ottenuti con computer più potenti. Tale sistema è stato impiegato per confrontare le risposte all'impulso previste dal software Ramsete (Pyramid Tracing) e le risposte all'impulso sperimentali.

Le risposte all'impulso nel formato digitale ottenute o sperimentalmente o col calcolo numerico del software Ramsete sono state convolute con il segnale musicale o parlato anecoico desiderato; si è realizzato così un file contenente quello stesso brano anecoico filtrato con le caratteristiche acustiche della sala.

In altre parole si è ottenuta una versione del brano parlato che in origine era anecoico come se fosse stato emesso da un altoparlante situato nel punto in cui è stata posizionata la testa artificiale con i microfoni binaurali per la registrazione della risposta all'impulso (situazione sperimentale); quando si è usata la risposta all'impulso completamente sintetica creata con il software Ramsete la posizione dell'ascoltatore e della sorgente erano quelle introdotte mediante il CAD come le altre caratteristiche acustiche ed architettoniche della sala.

Per ottenere la comunicazione fra computer, DAT e CD è stata semplicemente usata una scheda audio munita di convertitori A/D e D/A stereo a 16 bit.

Si sono così realizzati nastri DAT contenenti in sequenza uno spezzone del brano parlato anecoico usato come campione, lo stesso brano riverberato artificialmente con la risposta all'impulso sperimentale (situazione reale) e lo stesso brano ottenuto in modo completamente sintetico, cioè partendo da un brano registrato su CD convoluto con le risposte all'impulso ottenute con Ramsete (situazione simulata senza e con il trattamento acustico).

6. Conclusioni

Il programma di calcolo Pyramid Tracing ha permesso di riprodurre abbastanza fedelmente il campo sonoro della sala e di elaborare due progetti di trattamento acustico, consentendo la valutazione oggettiva dei risultati ottenibili.

Con il metodo dell'auralizzazione si sono potuti confrontare, simulando la sensazione acustica prodotta dalla sala, i comportamenti della stessa nelle situazioni di progetto. La tecnica di auralizzazione ha consentito di apprezzare anche soggettivamente gli effetti dei trattamenti acustici convalidando così le previsioni numeriche operate con il programma di calcolo Pyramid Tracing di Ramsete.

Bibliografia

- [1] M. Vorländer, *Internaitonal round robin on room acoustical computer simulations*, ICA Giugno 1995, Trondheim.
- [2] A. Farina, *Tecniche di convoluzione applicate al trattamento di segnali sonori per prove di ascolto*, XII Convegno Nazionale AIA, Lecce 13-15 Aprile 1994.