

## **PROBLEMATICHE ACUSTICHE DELLE GRANDI SALE: CRITERI PROGETTUALI.** **Prof. Arch. Antonio Carbonari, Ch.<sup>mo</sup> Prof. Ing. Mauro Strada.**

Il presente testo costituisce la bozza di un capitolo del libro curato dal Prof. Umberto Trame: *Lo spazio della musica, studi e progetti per il nuovo auditorium della città di Padova*. Pagine 63 – 67, Edizioni Skira, Milano 1999.

### **1. Caratteristiche del campo sonoro nelle grandi Sale**

Il campo acustico in un ambiente fisicamente confinato differisce da quello di uno spazio aperto per la presenza, accanto alle onde sonore dirette (sorgente-ascoltatore), di onde sonore riflesse in vario modo dalle superfici delimitanti l'ambiente.

La qualità acustica di una sala è determinata dalle rispettive entità e dalle modalità di sovrapposizione dei due campi sonori: quello diretto e quello riverberato (o diffuso).

La combinazione ottimale dei due campi varia con il tipo di segnale sonoro da trasmettere nella sala: parlato o musica di vario genere. Nel caso delle sale per concerti infatti è desiderabile un prolungamento di ogni singolo impulso sonoro (fonema o nota musicale) senz'altro maggiore che per le sale per conferenze o i teatri per la prosa; l'entità di tale prolungamento, che chiameremo 'coda sonora', varia con i generi musicali.

**1.1 Il campo acustico diretto.** Lo si studia essenzialmente per valutare la distanza massima sorgente - ascoltatore che consenta una corretta percezione del segnale sonoro in assenza di dispositivi di elettroamplificazione. In conseguenza di tali valutazioni si può studiare la possibilità di inserire gallerie e balconate o di inclinare opportunamente la platea.

Il livello di pressione sonora dell'onda diretta che raggiunge l'ascoltatore (SPL) dipende da vari fattori:

- potenza della sorgente, per una voce umana forte si può assumere un livello di potenza (mediato nel tempo e relativo alla totalità delle frequenze presenti) di 75 dB per la voce maschile, 73 per la voce femminile [1], per un "fortissimo" orchestrale il livello è di circa 100 dB,
- direttività della sorgente,
- rumore di fondo, va massimizzata la differenza fra il livello del segnale ed il livello di tale rumore (rapporto S/R), il quale difficilmente sarà contenibile sotto i 30-35 dB,
- distanza sorgente-ricevitore, per una sorgente puntiforme l'attenuazione da divergenza sferica dell'onda sonora è di 6 dB per ogni raddoppio della distanza,
- assorbimento acustico lungo la linea di propagazione, l'assorbimento da parte del pubblico e delle poltrone per un'onda sonora radente è elevato soprattutto alle basse frequenze, ma diminuisce con l'inclinazione del piano di appoggio delle poltrone, di qui l'opportunità di aumentare tale inclinazione. Quest'ultimo accorgimento favorisce anche la visibilità del palcoscenico.

Tenendo conto di tutti questi fattori, normalmente la distanza massima accettabile tra sorgente e ricevitore si aggira sui 25-30 metri per la voce umana non amplificata e sui 45-50 metri per la musica.

**1.2 Il campo acustico riflesso.** Le prime riflessioni che si verificano sulle superfici presenti nell'ambiente possono essere utili a rafforzare il livello del suono diretto, migliorando l'intelligibilità della parola e la qualità della musica, oppure dannose. Il primo caso si verifica quando il tempo di ritardo dell'onda riflessa rispetto a quella diretta e la differenza tra i rispettivi livelli non superano certi valori; in caso contrario può verificarsi un eccessivo prolungamento della coda sonora o addirittura il fenomeno dell'eco: onda diretta ed onda riflessa vengono percepite separatamente come due suoni distinti. Questo avviene quando il

contenuto energetico del suono riflesso é almeno il 10 % di quello del suono diretto ed il tempo di ritardo supera i 50 millisecondi nel caso del parlato, ed i 75 millisecondi nel caso della musica. Assumendo una velocità del suono di 340 m/s, tali tempi di ritardo corrispondono a differenze di percorso tra le due onde rispettivamente di 17 e 25 metri. Per i valori anzidetti é più esatto parlare di eco ravvicinato, mentre l'eco vero e proprio si verifica per ritardi superiori al decimo di secondo [1,2].

Il tempo iniziale di ritardo, Initial Time Delay Gap (ITDG), che rappresenta il tempo di ritardo della prima riflessione, é uno degli indici di valutazione oggettivi della qualità acustica di una sala .

Si ricorda che, affinché una superficie dia luogo ad una riflessione speculare del suono, le sue asperità o rientranze devono essere inferiori ad un quarto della lunghezza d'onda del suono incidente, e la lunghezza dei suoi lati non deve essere inferiore al quadruplo della stessa lunghezza d'onda; in caso contrario, sempreché la superficie sia riflettente, si avrà una riflessione diffusa [1].

Conseguentemente, se si ricorda che le lunghezze d'onda relative alle frequenze udibili variano da un minimo di circa 2 centimetri per un tono di 16000 Hz ad un massimo di circa 17 metri a 20 Hz (una ventina di metri per una frequenza di 16 Hz), si comprende che una stessa struttura può comportarsi in modo speculare nei confronti di certe frequenze e diffondente nei confronti di altre.

Queste riflessioni selettive possono dar luogo alla cosiddetta distorsione in frequenza: il segnale sonoro che giunge all'ascoltatore non ha la stessa composizione tonale, ovvero lo stesso spettro, di quello emesso dalla sorgente.

E' anche opportuno che le prime riflessioni arrivino all'ascoltatore da direzioni diverse da quella della sorgente, in tal modo la percezione contemporanea del suono diretto e del suono riflesso provoca stimoli diversi alle due orecchie dando luogo alla cosiddetta *sensazione spaziale* o *impressione spaziale* legata alle caratteristiche fisiche della sala considerata. Tale definizione comprende sia la possibilità di localizzare la sorgente, cosa importante soprattutto nelle rappresentazioni teatrali, sia la sensazione di trovarsi immersi in un campo sonoro tridimensionale in cui il suono arriva da più direzioni (sensazione di avvolgimento).

Sono stati definiti alcuni indici di valutazione oggettivi connessi a tale sensazione soggettiva, quali l'Efficienza Laterale (LE) e la funzione di correlazione mutua interaurale (inter aural cross correlation IACC). Il primo indice é dato dal rapporto fra l'energia che arriva lateralmente all'ascoltatore nel periodo che va dai 25 agli 80 ms successivi ad un segnale impulsivo (ad esempio un colpo di pistola), e l'energia totale che gli arriva nei primi 80 ms.

Il secondo indice tende a quantificare la sensazione dovuta alla differenza fra le pressioni sonore che giungono alle due orecchie; essa assume valore nullo quando non c'è differenza di stimolo, cosa che si verifica nel caso di solo suono diretto che giunge frontalmente od in caso di campo sonoro simmetrico rispetto all'ascoltatore.

Oltre alle prime riflessioni esistono anche le riflessioni successive che hanno la loro importanza nel determinare la qualità acustica della sala, esse danno luogo alla cosiddetta coda sonora, vale a dire al prolungamento del suono diretto, alla sua permanenza nell'ambiente dopo l'interruzione dell' emissione. L'entità di questo prolungamento é misurata da un descrittore fisico: il tempo di riverberazione (RT), definito dall'architetto statunitense Sabine già alla fine dell'800 come il tempo necessario affinché, dopo l'interruzione dell'emissione sonora da parte di una sorgente, il livello di pressione sonora nella sala diminuisce di 60 Decibel.

Il valore di questo parametro é funzione del volume della sala e dell'assorbimento totale delle sue superfici interne, dal momento che l'assorbimento dei materiali varia con la frequenza, anche il RT va calcolato alle varie frequenze. A parità di forma della sala il RT aumenta linearmente all'aumentare delle dimensioni.

Nel caso delle sale per concerti é desiderabile un prolungamento della coda sonora senz'altro maggiore che per altre tipologie di auditoria, il suono non dev'essere troppo "secco", ovvero la coda sonora non deve essere troppo corta. L'entità ottimale del tempo di riverberazione varia con i generi musicali e con le dimensioni della sala: é massima per la musica medioevale ed i concerti d'organo (2-4 s), minore per l'opera (1.6 - 2.0 s), la musica classica (circa 1.8 s) e barocca (minore di 1.5 s) [3], é bene sia inferiore al secondo per l'ascolto del parlato.

Un altro parametro di valutazione basato sullo stesso concetto é l'Early Decay Time (EDT), ovvero il tempo necessario affinché, dopo l'interruzione dell'emissione sonora da parte di una sorgente, il livello di pressione sonora nella sala diminuisca di 10 Decibel.

## 2. Parametri oggettivi e soggettivi nella valutazione del campo sonoro: recenti tendenze

Il tempo di riverberazione ha costituito fino agli anni cinquanta dello scorso secolo il principale, se non l'unico, descrittore fisico usato come parametro oggettivo di valutazione del comportamento acustico di una sala.

Un suo unico valore, per ogni banda di frequenza, può essere rappresentativo del campo sonoro di tutta la sala solo se questa é sufficientemente riverberante e se lo é in modo omogeneo, in caso contrario ne andrebbe calcolato un valore in ogni punto di ascolto.

Dagli anni cinquanta in poi sono stati sviluppati altri descrittori fisici (o fisico-acustici) del campo sonoro, o indici di valutazione oggettivi della qualità acustica di una sala, di cui alcuni sono stati già menzionati (SPL, ITDG, LE, IACC)

Oltre a questi i più utilizzati sono: lo STI ed il RASTI riguardanti l'intelligibilità del parlato, il  $T_{med}$  tempo di riverberazione alle medie frequenze, gli indici di chiarezza C80 e C50, la definizione D, e l'istante baricentrico  $T_{bar}$ . Questi ultimi quattro esprimono in vario modo il peso relativo delle prime riflessioni rispetto all'energia totale che arriva all'orecchio dell'ascoltatore, in conseguenza di un segnale impulsivo.

In particolare il C80 ed il C50 sono funzioni del rapporto tra l'energia sonora che arriva rispettivamente nei primi 80 e 50 ms e l'energia che arriva successivamente: tanto maggiore é il loro valore tanto maggiore é il contributo delle riflessioni utili al rafforzamento del segnale; sono usati rispettivamente per la musica ed il parlato, i loro valori sono espressi in Decibel.

Il parametro "definizione" D, introdotto da Thiele nel 1953, é dato dal rapporto, espresso in percentuale, tra l'energia in arrivo nei primi 50 ms e l'energia totale immessa nell'ambiente dal segnale impulsivo.

L'istante baricentrico é ottenuto pesando i tempi di ritardo dell'energia in arrivo in ogni istante in funzione dell'entità di quest'energia rispetto all'energia totale che arriva, dunque il suo valore aumenta con l'entità delle prime riflessioni.

Le più recenti ricerche sono volte a correlare, mediante indagini statistiche basate su test di audizione in sale reali e questionari, alcuni dei descrittori fisici sopra elencati con il giudizio soggettivo degli ascoltatori, in modo da rendere prevedibile quest'ultimo in fase di progetto [4]. I questionari sono basati su tecniche di punteggio numerico tra due descrittori soggettivi contrapposti (quali: *gradevole-sgradevole*).

Secondo una ricerca basata su questionari riferiti a test di ascolto in una serie di teatri italiani [4] e sottoposti a professionisti del settore, é risultato ad esempio che:

- EDT così come RT sono legati alla coppia *secco-ribombante*: aumentano com'è ovvio con la sensazione di diffusione,
- ITDG é legato alla coppia *morbido-duro*, ed aumenta con la durezza del suono,

- C80 é correlata con la coppia *piacevole-spiacevole*, dall'indagine emerge una domanda di maggior chiarezza nelle sale italiane giudicate spiacevoli in quanto caratterizzate da bassi livelli sonori,
- SPL é correlato con la coppia *piacevole-spiacevole* la piacevolezza aumenta col SPL così come la componente riverberata (il rapporto R/D).

Il ricercatore giapponese Yoichi Ando [5], in base a test svolti in un campo sonoro simulato, ha sviluppato un metodo per correlare quattro dei parametri oggettivi, fra loro indipendenti, con un giudizio globale di preferenza soggettiva esprimibile da un ascoltatore situato in un punto della sala. I quattro parametri utilizzati sono: SPL, ITDG, IACC, e  $T_{sub}$ , o tempo di riverberazione subseguente, é una grandezza che riguarda il funzionamento dei riverberatori elettronici usati per simulare il campo sonoro.

Il metodo prevede la ricerca del valore ottimale per ognuno dei quattro parametri, dal momento che esso influenzerà il giudizio globale indipendentemente dagli altri, questo in una scala lineare di valori di preferenza derivata dalla legge dei giudizi comparativi, quindi viene ricavato un valore del giudizio globale applicando il principio della sovrapposizione degli effetti. [5]. Sulla base di tale metodo é stato realizzato un sistema di selezione dei posti a sedere in funzione della preferenza individuale di ogni ascoltatore. Questa viene individuata da un test condotto in un apposita sala dove l'ascoltatore viene sottoposto ad un campo sonoro simulato [6].

### 3. Criteri progettuali

Alla luce di quanto finora detto si possono enunciare alcuni criteri basilari da seguire nella progettazione della sala, in particolare nella definizione della sua volumetria.

a) - Non superare le distanze massime che consentono all'onda diretta di raggiungere l'ascoltatore con sufficiente livello sonoro.

La presenza di questo vincolo impone spesso l'uso di balconate qualora le esigenze di capienza della sala lo richiedano; in tal caso vanno però fatte delle opportune verifiche. Le balconate infatti comportano un aumento del volume della sala, con conseguente allungamento del tempo di riverberazione, e possono creare difetti acustici locali quali echi e zone d'ombra.

b) - Rispettare i limiti nella differenza di percorsi tra onda diretta e onda riflessa per evitare ritardi eccessivi, vanno rese assorbenti tutte quelle superfici che darebbero luogo a onde riflesse con ritardo eccessivo.

In relazione a quanto detto sugli indici di chiarezza, la definizione e l'efficienza laterale, vanno garantite delle prime riflessioni sufficientemente intense e provenienti da direzioni prevalentemente diverse da quella del suono diretto. Valori orientativi per le sale da concerto sono 0.34 per la definizione, meno di 140 ms per l'istante baricentrico, ed un'efficienza laterale compresa tra 0.2 e 0.3.

A tale scopo il soffitto della sala é in genere usato come riflettore nelle parti che possono dar luogo a riflessioni utili e viene inclinato verso il basso procedendo verso il fondo della sala per evitare eccessivi percorsi dell'onda riflessa, oppure può essere inclinato in senso contrario per indirizzare le riflessioni nocive fuori dell'area occupata dal pubblico.

Anche le pareti laterali vengono sfruttate come riflettori ma solo se le dimensioni della sala sono limitate in larghezza (inferiori ai 20-25 metri). Una pianta rettangolare consente in genere una buona distribuzione del suono riflesso, mentre una pianta a ventaglio tende a privilegiare le posizioni più lontane. Inoltre le sale piatte e larghe, soprattutto quelle a ventaglio, tendono a ridurre l'impressione spaziale, data la scarsa rilevanza delle prime riflessioni laterali [7].

Le pareti di fondo vengono in genere rese fonoassorbenti in quanto darebbero luogo a percorsi eccessivamente lunghi dell'onda riflessa.

Qualora pareti laterali e soffitto non possano dar luogo alle necessarie riflessioni utili, si può ricorrere, per ottenerle, a riflettori acustici (in genere sospesi) opportunamente posizionati e conformati, indicativamente il loro peso non dovrà essere inferiore a  $15-20 \text{ kg} / \text{m}^2$ . L'uso di elementi riflettenti discontinui sospesi al di sotto di un soffitto anch'esso riflettente consente di ottenere il valore desiderato dell'ITDG senza penalizzare eccessivamente il tempo di riverberazione a causa di una riduzione del volume della sala [3].

c) - Affinché il campo sonoro sia uniforme bisogna perseguire una forma compatta (una dimensione non deve eccedere troppo rispetto alle altre), ma qualcuno suggerisce [8] di accentuare l'altezza rispetto alla larghezza per evitare delle riflessioni dal soffitto che possano precedere le riflessioni laterali (riducendo l'EL) e mascherare il suono diretto.

d) - Nel caso delle Sale Polifoniche le riflessioni utili vanno indirizzate non solo verso la platea ma anche verso l'orchestra per consentire agli esecutori di ascoltare la propria esecuzione ed accordarsi tra loro, In genere é difficile soddisfare contemporaneamente le esigenze di pubblico ed esecutori [3].

e) - Rendere leggermente divergenti le pareti opposte (se riflettenti) per evitare l'effetto flutter ovvero le riflessioni multiple reciproche.

f) - Le riflessioni dannose sono non solo quelle che arrivano all'ascoltatore con tempi di ritardo e contenuto energetico eccessivi, ma anche quelle che a causa della forma della superficie riflettente, tendono a focalizzare l'energia sonora in alcuni punti o a creare zone d'ombra provocando disuniformità del campo acustico. In questi casi si rendono fonoassorbenti le superfici che darebbero luogo a tali fenomeni oppure si introducono strutture diffondenti.

In fase di progettazione del rivestimento interno della sala, bisogna innanzitutto scegliere materiali con caratteristiche adeguate per le superfici individuate come riflettenti o assorbenti, si può quindi aggiustare il valore del tempo di riverberazione scegliendo opportunamente i materiali e le relative estensioni per le altre superfici.

Va tenuto presente che nelle sale polivalenti, che debbono adattarsi all'esecuzione di musica di vario genere o addirittura anche all'ascolto del parlato, possono essere richiesti accorgimenti che consentano di variarne le caratteristiche acustiche; quali ad esempio l'uso di riflettori mobili o di pannelli di rivestimento interno in grado di cambiare le proprie caratteristiche di assorbimento ruotando su sé stessi.

In tutti i casi va minimizzato con opportuni provvedimenti fonoisolanti il rumore di fondo (dunque aumentato il rapporto segnale-rumore S/R), sia quello proveniente dall'esterno attraverso pareti ed aperture, sia quello generato all'interno dell'edificio dagli impianti e dalle eventuali macchine sceniche.

#### **4. Metodi e strumenti di previsione acustica**

Alcune verifiche immediate relative alla presenza di difetti acustici gravi, quali eco e zone d'ombra acustica, possono essere fatte rapidamente con riga e squadra sugli elaborati di progetto. Basta tracciare su piante e sezioni della sala i percorsi dell'onda sonora (raggi sonori) che vanno dalla sorgente a punti di ascolto significativi, ricavare magari delle sezioni contenenti i percorsi più problematici; ottenuta la lunghezza reale dei percorsi, con costruzioni geometriche o col teorema di Pitagora, é possibile verificare l'esistenza di distanze o differenze di percorso eccedenti i valori anzidetti dell'ITDG, nonché di zone non raggiunte dai raggi sonori diretti. Anche il calcolo del tempo di riverberazione medio della sala può essere fatto rapidamente con le formule di Sabine o di Eyring [1,2], sulla base dei dati geometrici e delle ipotesi sui materiali, purché la differenza tra le tre dimensioni della sala non sia eccessiva.

Per previsioni più accurate del comportamento sonoro di una sala sono disponibili dei software commerciali, basati sul tracciamento automatico dei raggi sonori, ovvero delle entità geometriche in cui

viene discretizzata l'energia sonora emessa dalla sorgente. Questa tecnica consente di prevedere il valore che in ogni punto della sala progettata assumeranno i vari descrittori fisici.

Ne citiamo due fra i più diffusi in Italia, dello stesso livello di accuratezza, rappresentativi di diverse concezioni del raggio sonoro:

- il programma Odeon [9], sviluppato presso il Department of Acoustic Technology of Technical University of Denmark (DTU), é basato su un algoritmo ibrido *cone tracing* e *sorgenti-immagine*; l'effetto delle prime riflessioni è calcolato deterministicamente dalla parte *cone tracing*, che traccia cioè dei raggi sonori di forma conica, la parte basata sul metodo delle sorgenti-immagine serve da pre-processore in quanto seleziona le sorgenti-immagine da considerare per il tracciamento dei raggi sonori. Agli effetti delle prime riflessioni vengono quindi aggiunti quelli di una coda sonora "tardiva" calcolata con metodi statistici in base all'andamento delle prime riflessioni;
- il programma Ramsete [10] sviluppato in Italia presso l'Università di Parma é invece basato su un algoritmo *pyramid tracing* puro: i raggi sonori hanno forma piramidale, vengono seguite le riflessioni di ogni piramide finché il contenuto energetico di questa é ritenuto significativo, non viene aggiunta una coda sonora tardiva calcolata in altro modo.

Tali strumenti di calcolo sono corredati da ulteriori programmi che consentono l'auralizzazione, ovvero la simulazione acustica, percepibile attraverso cuffie o in appositi locali strumentati, del campo sonoro della sala progettata. In pratica un brano musicale registrato in sala anecoica viene processato da un programma che, simulando il percorso dei raggi sonori nella sala virtuale, nonché l'effetto di ogni riflessione (assorbimento selettivo o meno), arriva a costruire lo spettro del segnale percepibile in un dato punto della sala (processo di convoluzione) e lo riproduce elettronicamente.

## Riferimenti Bibliografici

- [1] R.Pompoli, *Progetto Acustico delle Sale da Spettacolo*. Dispensa del Dipartimento di Ingegneria, Università di Ferrara, A.A 1997/98.
- [2] R.Lazzarin, M. Strada, *Elementi di Acustica Tecnica*, CLEUP, Padova, 1983.
- [3] L.L. Beranek, *Music Acoustic & Architecture*, John Wiley & Sons inc., New York - London, 1962.
- [4] L.Tronchin, "Qualità Acustica dei Teatri: Analisi Sperimentale e Confronto con Valutazioni Soggettive in Alcuni Esempi Italiani", *Rivista Italiana di Acustica*, Luglio-Settembre 1994, pag. 51 - 64.
- [5] Y. Ando, "Calculation of subjective preference at each seat of a concert hall", *Journal of the Acoustical Society of America*, vol. 74 (3), Settembre 1983, pag. 873-887.
- [6] M. Sakurai, Y.Korenaga, Y. Ando, "A sound simulation system for seat selection", Atti del congresso *Music & Concert Hall Acoustics*, Tokio (Japan), Maggio 1995, pp. 51-59.
- [7] - M. Barron, "Spatial impression as measured in concert and opera auditoria", Atti del *16° Congresso Internazionale di Acustica (ICA)*, Seattle (USA), 20-26 Giugno 1998, pp. 5-6.
- [8] - H.A. Marshall, "A note on the importance of room cross section in concert halls", *Journal of Sound and Vibration*, vol. 5 - 1 1967, p.100 - 112.
- [9] - G.M. Naylor, "Odeon - Another Hybrid Room Acoustical Model", *Applied Acoustic* Vol. 38 no.s 2-4 1993, p.131-143.
- [10] - A.Farina, "Ramsete - a new Pyramid Tracer for medium and large scale acoustic problems", Atti del congresso *Euro - Noise 95*, Lyon (France), 21-23 Marzo 95.