
IUAV - MASTER IN PROGETTAZIONE ACUSTICA A.A. 2004/2005

Lezione del 23 Novembre 2004

Titolo: Gli ambienti per la musica, per il teatro e la prosa. Caratteristiche.

Docente: Arch. Antonio Carbonari

I requisiti acustici delle sale di ascolto

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 ed interne ad esso.

La qualità acustica di una sala è determinata dalle caratteristiche e dalle modalità di sovrapposizione dei due campi sonori: quello diretto e quello riverberato (o diffuso). In genere i due campi sono compresenti e si parla di campo semiriverberante. Nelle situazioni in cui domina l'energia sonora dovuta alle onde riflesse si parla di campo sonoro totalmente riverberante.

All'interno dell'energia sonora riflessa è poi importante distinguere:

- le prime riflessioni,
- riflessioni successive.

Entrambe vanno a costituire la cosiddetta 'coda sonora', ovvero il prolungamento, del segnale sonoro nell'ambiente. Ma le prime sono caratterizzate in genere da un'intensità paragonabile a quella del suono diretto, e vanno trattate con particolare attenzione, mentre le seconde sono percepite come un progressivo attenuarsi del segnale.

La combinazione ottimale dei due campi sonori ed il ruolo delle prime riflessioni variano con il tipo di segnale 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 nelle sale per conferenze o i teatri di prosa, dove, ai fini dell'intelligibilità della parola, i singoli fonemi devono essere chiaramente distinguibili l'uno dall'altro (non devono essere prolungati tanto da sovrapporsi troppo). L'entità di tale prolungamento, o coda sonora, varia anche con i generi musicali.

Importanti sono anche i ritardi delle riflessioni che giungono con intensità paragonabile a quella del suono diretto (non inferiore ad esso di 10 dB), in genere si tratta delle prime riflessioni, e la loro direzione di arrivo. A seconda del loro ritardo rispetto al suono diretto, queste riflessioni possono infatti rafforzarlo (grazie al meccanismo integratore del nostro sistema uditivo ... Haas) oppure essere percepite come eco. La loro direzione invece influisce sulla localizzazione della sorgente (*nel caso del parlato*) e sul senso di immersione nello spazio sonoro (*nel caso di musica sinfonica*).

In funzione del tipo di messaggio sonoro vanno dunque definite le caratteristiche del campo sonoro diretto, delle prime riflessioni e della coda sonora, e studiate di conseguenza:

- la geometria della sala, ovvero delle superfici di confine e non in essa presenti,
- le caratteristiche acustiche delle superfici stesse.

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 (qualora nella sala progettata fossero presenti distanze eccessive si può pensare di ridurle rendendo più compatta la planimetria della zona di ascolto o studiando la possibilità di) si può studiare la possibilità di inserire gallerie e balconate o di inclinare opportunamente la platea.

Il livello di pressione sonora del campo diretto che raggiunge l'ascoltatore (SPL) dipende da vari fattori:

- potenza della sorgente, per una voce umana forte si può assumere un livello di potenza sonora (L_w), mediato nel tempo e riferito alla totalità delle frequenze presenti, di 75 dB per la voce maschile, 73 per la voce femminile [1], un "fortissimo" orchestrale si può corrispondere ad un L_w di circa 100 dB,
- direttività della sorgente, né la voce umana né gli strumenti musicali sono omnidirezionali in particolare ...
- 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 [figure/disegni schematici/curva di visibilità].

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

1.2 Le prime riflessioni. Le prime riflessioni che si verificano sulle superfici presenti nella sala possono essere utili oppure dannose a seconda che servano o meno a rafforzare il livello del suono diretto.

Affinché si verifichi la prima situazione il tempo di ritardo dell'onda riflessa rispetto a quella diretta e la differenza tra i rispettivi livelli non devono superare certi limiti; in caso contrario può verificarsi un eccessivo prolungamento del segnale 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 è almeno il 10 % di quello del suono diretto ed il tempo di ritardo supera i 50 millisecondi (ms) nel caso del parlato, ed i 75 ms nel caso della musica. Assumendo una velocità del suono di circa 340 m/s, tali tempi di ritardo corrispondono a differenze di percorso tra le due onde rispettivamente di 17 e 25 metri. Per ritardi che superano di poco i valori anzidetti è più esatto parlare di eco ravvicinato, mentre l'eco vero e proprio si verifica per ritardi superiori al decimo di secondo [1,2].

Dato che il tempo di integrazione del sistema uditivo umano è di 35 ms: due segnali sonori che non distano temporalmente tra loro di più di tale periodo vengono percepiti come un unico segnale (effetto Haas), ma un ritardo leggermente maggiore, di entità variabile come si visto in funzione del tipo di messaggio sonoro, può essere tollerabile o anche gradevole.

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

Altri indici sono il **C80** ed il **C50**, relativi rispettivamente alla valutazione della qualità delle sale per l'ascolto della musica e del parlato.

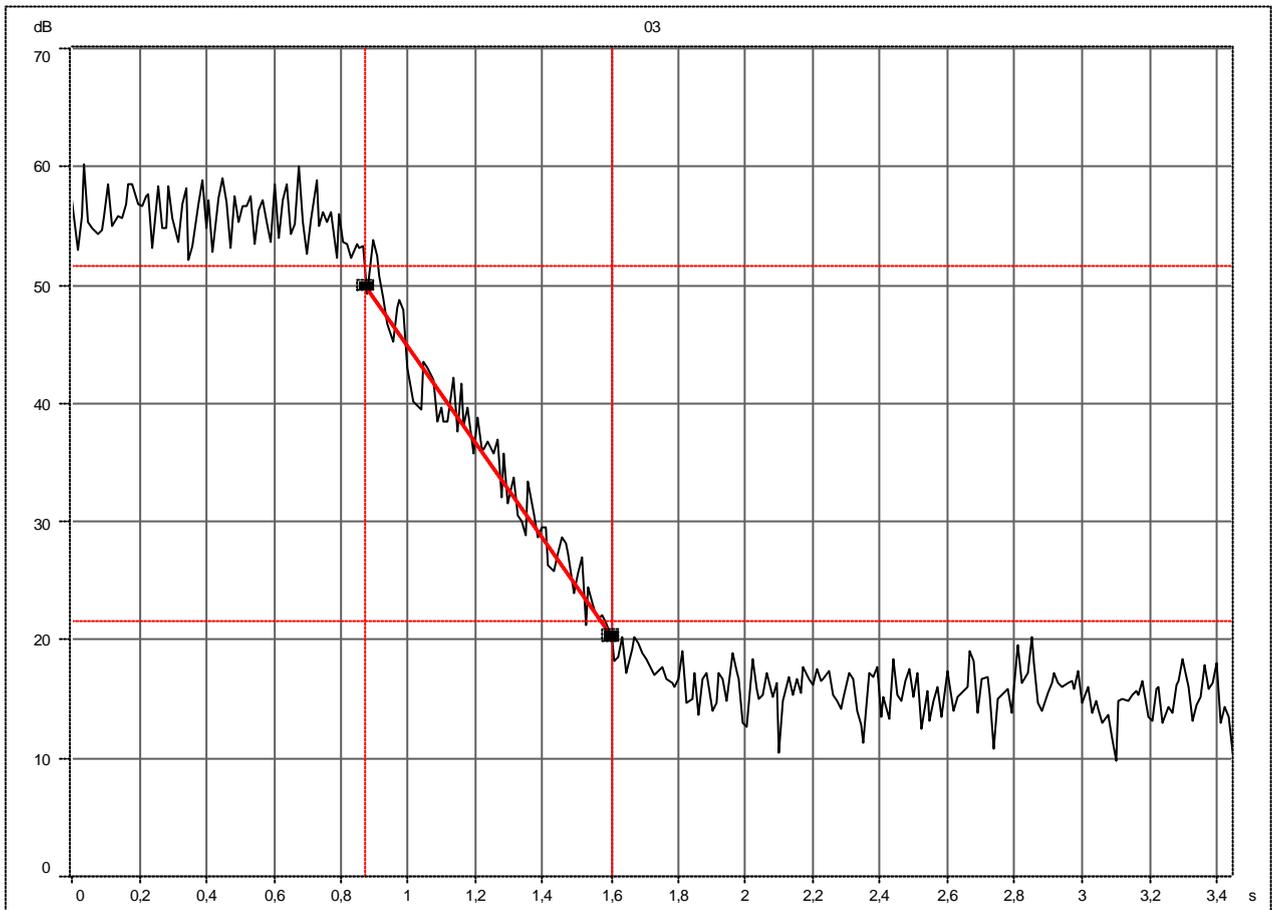


Figura 1 – Esempio di coda sonora: Teatro Malibrán (Venezia), curva di decadimento a 500 Hz, misurata in platea (terza fila di lato).

Considerando l'energia dovuta ad un singolo impulso sonoro, il **C50**, proposto da Thiele nel 1953 [], è definito in base al rapporto tra l'energia che giunge all'ascoltatore entro i primi 50 ms, dunque relativa al suono diretto ed alle prime riflessioni, e quella che giunge successivamente ai primi 50 ms:

$$C50 = 10 \log \frac{\int_0^{50ms} p^2(t) dt}{\int_{50ms}^{\infty} p^2(t) dt} \quad (\text{dB})$$

il suo valore è espresso in Decibel. tanto esso è maggiore tanto maggiore è il contributo delle prime riflessioni al rafforzamento del segnale. Inoltre tale valore aumenterà con il ridursi della coda sonora. I valori di riferimento del C50 sono i seguenti:

- 12 ÷ -6 = pessima acustica
- 6 ÷ +4 = accettabile
- +4 ÷ +10 = buona
- +10 ÷ +18 = ottima

Analogamente il **C80**, proposto da Reichart e dal gruppo di Dresda [], è definito in base al rapporto tra l'energia sonora che giunge all'ascoltatore entro i primi 80 ms e quella che giunge successivamente:

$$C80 = 10 \log \frac{\int_0^{80ms} p^2(t) dt}{\int_{80ms}^{\infty} p^2(t) dt} \quad (\text{dB})$$

i suoi valori ottimali in funzione del genere musicale sono i seguenti:

-12 ÷ -2 = musica per organo,
 -2 ÷ +6 = musica sinfonica,
 +6 ÷ +10 = musica pop,
 +10 ÷ +18 = musica elettronica.

Il parametro "definizione" **D**, introdotto da Thiele nel 1953 [] è definito come il rapporto, espresso in percentuale, tra l'energia (relativa sempre ad un impulso sonoro emesso da una sorgente non direzionale) che arriva ad un ricevitore nei primi 50 ms e l'energia totale che gli arriva, il periodo tempo è misurato a decorrere dall'arrivo del suono diretto:

$$D = \frac{\int_0^{50ms} p^2(t) dt}{\int_0^{\infty} p^2(t) dt} \quad [\%]$$

valori ottimali: dal 50 al 100% per il parlato, meno del 50% per la musica. In particolare per le sale da concerto secondo il gruppo di Berlino [] il valore ottimale sarebbe del 34%.

L'istante o tempo baricentrico (**Tbar**), introdotto da Cremer e Kurer, 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 valore di questo indice aumenta con l'entità delle prim e riflessioni.

$$Tbar = \frac{\int_0^{\infty} t \cdot p^2(t) dt}{\int_0^{\infty} p^2(t) dt} \quad [\text{s}]$$

Valori ottimali sono: da 0 a 50 ms per il parlato e da 50 a 250 ms per la musica, a seconda dei generi. Per le sale da musica sinfonica [gruppo di Berlino] non dovrebbe superare i 140 ms,.

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.

La definizione di sensazione spaziale 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), cosa importante nell'ascolto di musica.

In questo secondo caso, anche se l'ascoltatore non identifica la direzione di ogni riflessione il suo sistema uditivo elabora una sensazione globale detta *sensazione spaziale* o *impressione spaziale*.

Dal momento che queste sensazioni dipendono dalla differenza tra gli stimoli sonori che giungono alle due orecchie si comprende come solitamente nei teatri risultano sgradite le poltrone centrali della sala.

Sono stati definiti alcuni indici di valutazione oggettivi connessi a questa sensazione soggettiva, quali l'*Efficienza Laterale (LE)* e la funzione di correlazione mutua interaurale (*inter aural cross correlation IACC*).

Il primo indice è dato dal rapporto fra l'energia che arriva lateralmente all'ascoltatore (p_{∞}^2) nel periodo che va dai 25 agli 80 ms successivi all'immissione nel locale di un segnale impulsivo (ad esempio un colpo di pistola), e l'energia totale che gli arriva nei primi 80 ms (p_0^2).

Nella formula di Jordan qui riportata [Morandi] p_{∞}^2 deve essere misurato con un microfono direzionale orientato in senso ortogonale alla direzione sorgente-ascoltatore:

$$LE = \frac{\text{energia_laterale}_{(25\div 80ms)}}{\text{energia_totale}_{(0\div 80ms)}} = \frac{\int_{25ms}^{80ms} p_{\infty}^2(t) dt}{\int_0^{80ms} p_0^2(t) dt} \quad (\text{dB})$$

Ad un valore della LE > 0.1 corrisponde una buona localizzazione acustica, mentre una sensazione di immersione nel campo sonoro si ha per LE > 0.2 [Morandi]. Per le sale da concerto [gruppo di Berlino] dovrebbe essere compresa tra 0,2 e 0,3.

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.

Un criterio progettuale che emerge dalle considerazioni finora svolte è dunque quello di aumentare il coefficiente di riflessione in quelle superfici che possono dar luogo a riflessioni utili (a rafforzare il suono diretto ed a fornire la sensazione spaziale) e rendere invece fonoassorbenti quelle che potrebbero dar luogo a riflessioni con tempi di ritardo eccessivi. Le superfici riflettenti vanno orientate in modo opportuno, sfruttando i principi della riflessione geometrica, in modo da dirigere le riflessioni utili nelle zone di ascolto.

Si ricorda che, affinché una superficie dia luogo ad una riflessione speculare del suono, le sue asperità (o rientranze) devono avere dimensioni 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].

Ricordando 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, si comprende che una stessa superficie può comportarsi in modo speculare nei confronti di certe frequenze e diffondente nei confronti di altre.

Questo comportamento selettivo, unitamente al variare del coefficiente di assorbimento delle superfici con la frequenza, può 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.

1.3 La coda sonora. Le prime riflessioni e le riflessioni successive costituiscono insieme la cosiddetta *coda sonora*, vale a dire il prolungamento del suono diretto, la sua permanenza nell'ambiente per un certo tempo dopo l'interruzione dell'emissione.

L'entità di questo prolungamento è misurata da un descrittore fisico: il *tempo di riverberazione* (reverberation time **RT**), definito dall'architetto statunitense Sabine già alla fine dell'800 come il tempo necessario affinché, dopo l'interruzione dell'emissione da parte di una sorgente, il livello di pressione sonora nella sala diminuisse di 60 decibel.

Il valore di questo parametro è 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.

Le formule più utilizzate per il calcolo dell'RT sono quella di Sabine e quella di Eyring:

Formula di Sabine,

formula di Eyring

$$RT_{60} = 0,161 \frac{V}{S \cdot a_m} \text{ [s]}$$

$$RT_{60} = 0,161 \frac{V}{-S \cdot \ln(1 - a_m)} \text{ [s]}$$

In entrambe le formule a_m è il coefficiente medio di assorbimento delle superfici interne, V è il volume della sala ed S l'area totale delle superfici interne.

Nella formula di Eyring l'assorbimento degli oggetti per i quali si utilizza un coefficiente individuale (es. poltrone) va necessariamente tradotto in assorbimento medio di una superficie equivalente (es. area occupata dalle poltrone); mentre nella formula di Sabine l'assorbimento di n oggetti di cui è conosciuto l'assorbimento individuale A può essere aggiunto all'assorbimento delle superfici che si trova al denominatore, *per cui la formula diventa:*

Inoltre se il volume della sala supera certe dimensioni bisogna tener conto anche dell'assorbimento dell'aria:

$$A_{aria} = 4 \cdot b \cdot V$$

dove b è un coefficiente di assorbimento dell'aria connesso all'umidità relativa ed alla frequenza (espresso in %/m, diventa unità assorbenti se lo moltiplico per $4V$ diventa % (adimensionale come a) se lo moltiplico per libero cammino medio = $4V/S$).

Si può tener conto dell'assorbimento individuale degli oggetti e dell'assorbimento dell'aria nel definire il coefficiente di assorbimento medio superficiale da introdurre nella formula di Eyring:

$$a_m = \frac{\sum_{i=1}^n S_i \cdot a_i + \sum_{i=1}^n A_i + 4 \cdot b \cdot V}{S}$$

Mentre la formula di Sabine può essere scritta nella forma:

$$RT_{60} = 0,161 \frac{V}{S \cdot a_m + \sum_{i=1}^n A_i + 4 \cdot b \cdot V} \quad [\text{s}]$$

Di norma l'effetto dell'assorbimento dell'aria può essere trascurato per frequenze inferiori ai 2 kHz.

Si noti che mentre la formula di Eyring fornisce valori tendenti a zero per a_m tendente a uno (campo libero), la formula di Sabine nella stessa situazione continua a fornire valori diversi da zero.

Sabine basò la sua formula sulle misure sperimentali del RT, la formula fu in seguito dimostrata matematicamente. La dimostrazione è basata sul concetto di 'libero cammino medio' dell'onda sonora all'interno del locale (definito come $4V/S$). Si può parlare di 'libero cammino medio' quando la sala ha forma compatta, non troppo dissimile da un parallelepipedo con dimensioni non molto diverse tra loro. Inoltre le altre ipotesi (sabiniane) erano che il coefficiente di assorbimento a delle varie superfici fosse uniforme ed abbastanza ridotto (in genere minore di 0,2).

Quando questi presupposti non sono soddisfatti la formula cade in difetto, e non si può parlare di un unico valore di RT che caratterizzi l'ambiente.

Il valore ottimale del tempo di riverberazione varia con il tipo di messaggio sonoro da trasmettere nella sala (parlato o musica di vario genere) / con la destinazione d'uso / e con le sue dimensioni. Esso è massimo 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], è bene sia inferiore al secondo per l'ascolto del parlato.

Per il calcolo del valore ottimale del RT in funzione del volume e della destinazione d'uso della sala è utilizzabile la seguente relazione [Moranti ...], che fornisce il valore relativo ai 1000 Hz

$$RT_{60,ott(1000\text{Hz})} = j_1 \sqrt[3]{V} \quad [\text{s}]$$

dove V è il volume della sala, J_1 e J_2 sono coefficienti legati alla destinazione d'uso del locale:

	J_1	J_2
Parola	0,3 - 0,4	6 - 9
Musica leggera	0,5 - 0,6	6 - 9
Musica per organo	0,7 - 0,8	6 - 9

Trovato il valore ottimale per la frequenza di 1000 Hz, i valori relativi alle altre frequenze possono essere ricavati dal seguente diagramma, che fornisce in ordinata il rapporto tra l'RT relativo ad ogni frequenza riportata in ascissa e quello relativo ai 1000 Hz.

Un altro parametro di valutazione basato sullo stesso concetto del RT è 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. (è normalizzato anche lui a 60 dB ma estrapolato dai primi 10, e senza aspettare il decadimento dei primi 5 dB come nel calcolo del RT).

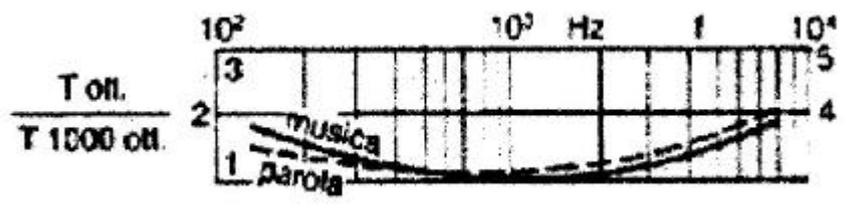


Figura 2.

Se da questo valore si estrapola il tempo necessario ad un decadimento di 60 dB l'EDT sembra non differire dal T10, in realtà differisce per le modalità di misura [citare la norma] questo decadimento di 10 dB è misurato a partire dall'istante di interruzione dell'impulso e del rumore stazionario e non a partire da un livello inferiore di 5 dB al L del rumore stazionario [ISO 3382 prevede sia tecnica dell'interruzione del rumore stazionario, sia risposta all'impulso integrata, ISO 354 prevede solo la prima].

Nella seguente tabella sono riassunti i valori orientativi per i principali indici di valutazione in funzione del tipo di messaggio sonora da trasmettere nella sala.

I valori dei Tempi di Riverbero riportati sono riferiti al range di frequenze comprese tra 500 e 1000 Hz.

Tabella I

	RT (s)	C ₈₀ (dB)	C ₅₀ (dB)	D (%)	T _{bar} (ms)	ITDG (ms)	LE	EDT	RASTI
Musica									
d'organo	2,0÷4,0	-12 ÷ -2		< 50	50÷250	≤ 70	> 0,2		
Corale	3,0÷3,5			„	„	„	„		
barocca	1,4÷1,6			„	„	„	„		
sinfonica	1,6÷1,8	-2 ÷ 6		„	„	„	„		
da camera	1,4÷2,0			„	„	„	„		
pop		+6 ÷ 10		„	„	„	„		
elettronica		+10 ÷ 18		„	„	„			
Opera									
tedesca	1,8÷2,2						> 0,1		
italiana	1,4.÷1,8						„		
Prosa	1,0÷1,2		≥ -6	50 ÷ 100	0 ÷ 50	≤ 50	> 0,1		≥ 45
Confer.	≤ 1,0		≥ -6	„	0 ÷ 50	≤ 50	> 0,1		≥ 45

Esistono anche dei parametri per la valutazione delle condizioni in cui si trovano ad operare gli artisti sul palco (stage parameters) [manuale di Odeon] nel calcolo di questi la distanza sorgente-ricevitore è assunta pari approssimativamente ad un metro (0.9-1.1 m). Tali parametri sono detti "sostegno" (support) rispettivamente per la prima (ST_{early}), la tardiva (ST_{late}), e la totale (ST_{total}) energia sonora, e sono calcolati come segue:

$$ST_{\text{early}} = \frac{E_{20-100}}{E_{0-10}} \quad (\text{dB})$$

$$ST_{\text{late}} = \frac{E_{100-1000}}{E_{0-10}} \quad (\text{dB})$$

$$ST_{\text{total}} = \frac{E_{20-1000}}{E_{0-10}} \quad (\text{dB})$$

ST_{early} o ST_1 è usato come descrittore delle condizioni dell'orchestra (ensemble), ad esempio la facilità di udire gli altri membri dell'orchestra.. ST_{late} descrive l'impressione di riverberazione, ST_{total} descrive il supporto della sala allo strumento del singolo musicista.

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

Il tempo di riverberazione ha costituito fino agli anni cinquanta del '900 il principale se non l'unico descrittore fisico del comportamento acustico di una sala, usato come parametro di valutazione oggettivo.

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, C50, C80, D, Tbar, LE, IACC, EDT)

Nel 1962 L.L. Beranek classificò formalmente **una serie di attributi soggettivi** del campo sonoro nelle sale [], le principali, legate in particolare al rapporto tra campo diretto e campo diffuso, sono:

- la **pienezza del tono**, legata al rafforzamento del tono percepito dovuto alle riflessioni, alla permanenza del suono (lunghezza della coda sonora), dunque alla rilevanza (dominanza) del campo riflesso rispetto a quello diretto, nonché alla dominanza del segnale sonoro sul rumore di fondo (elevato rapporto S/R),
- la **definizione o chiarezza**, che rappresenta la capacità di distinguere suoni che si susseguono nel tempo, suoni emessi da strumenti diversi, essa è inversamente proporzionale al tempo di riverberazione della sala ed alla distanza sorgente-ricevitore.

Come è facilmente intuibile queste due caratteristiche sono tra loro contrastanti, le loro rispettive entità devono necessariamente variare in funzione della destinazione d'uso della sala.

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, è risultato ad esempio che:

- **EDT** così come **RT** sono legati alla coppia *secco-rimbombante*: aumentano com'è ovvio con la sensazione di diffusione,
- **ITDG** è legato alla coppia *morbido-duro*, ed aumenta con la durezza del suono,
- **C80** è 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** è 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], sulla base di 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 successivo (subsequent reverberation time). Quest'ultima grandezza è il tempo di riverberazione ottenuto mediante dei riverberatori elettronici nel campo sonoro simulato utilizzato nei test.

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 è stato realizzato un sistema di selezione dei posti a sedere negli auditoria in funzione della preferenza individuale di ogni ascoltatore. Quest'ultima 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 fase iniziale: quella della configurazione della sua volumetria.

Allo scopo di garantire delle riflessioni utili è necessario rispettare i seguenti criteri.

a) - Non superare le distanze massime che consentono all'onda diretta di raggiungere l'ascoltatore con sufficiente livello di pressione. La presenza di questo vincolo impone 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. Non vanno inoltre dimenticate le esigenze di visibilità.

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.*

A tale scopo il soffitto della sala è in genere usato come riflettore nelle parti che possono dar luogo a riflessioni utili, le più vicine alla sorgente sonora, 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.

Queste riflessioni devono essere speculari nel caso del parlato, diffuse nel caso della musica sinfonica. Quest'ultimo effetto può essere ottenuto dando al soffitto una forma ondulata.

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 che vengono indirizzate verso il fondo [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, la loro

massa frontale non dovrà essere inferiore a 15-20 kg per m². 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 ridurre il volume della sala dunque senza penalizzare eccessivamente il tempo di riverberazione [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. Si veda ad esempio la filarmonica di Sidney .

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, ed anche la creazione di onde stazionarie.

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 sonoro. In questi casi si rendono fonoassorbenti le superfici che darebbero luogo a tali fenomeni oppure si introducono strutture diffondenti.

Successivamente alla definizione della volumetria, in fase di progettazione del rivestimento interno della sala, bisogna 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, ed esempio l'uso di riflettori mobili di estensione variabile, di pannelli di rivestimento interno in grado di cambiare le proprie caratteristiche di assorbimento ruotando su sé stessi., oppure di tendine assorbenti avvolgibili che possono coprire pannelli riflettenti.

Elementi mobili ad assorbimento variabile possono essere utilizzati anche per aggiustare l'assorbimento della sala in funzione del suo grado di riempimento (es saletta della città della musica di Roma)

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.

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] S.Morandi, Indici di valutazione delle caratteristiche acustiche degli ambienti chiusi, Proc. SIB, Rimini 31.03.98
- [5] 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.
- [6] 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.
- [7] M. Sakurai, Y.Korenaga, Y. Ando, "A sound simulation system for seat selection", Proceedings from the conference *Music & Concert Hall Acoustics*, Tokio (Japan), Academic Press, May 1995, pp. 51-59.
- [8] - M.Barron, "Spatial impression as measured in concert and opera auditoria", *Proceeding from the conference 16th ICA*, Seattle (USA), 20-26 June 1998 , pp. 5-6.
- [9] - H.A.Marshall, "A note on the importance of room cross section in concert halls", In *Journal of Sound and Vibration*, Vol. 5 - 1 (1967), pp.100 - 112.