

## Capitolo 20

### Acustica architettonica: spazi per la musica

(Carmine Ianniello, Renato Spagnolo)

#### Criteri generali di progettazione acustica

(tratto in parte da: S. Cingolani, R. Spagnolo (a cura di), *Acustica musicale e architettonica*, CittàStudi Edizioni, Torino, 2008)

Negli ultimi decenni, la disponibilità di strumenti di cui servirsi per una progettazione acustica attenta e consapevole degli spazi per la musica ha compiuto passi in avanti davvero importanti. Innanzi tutto strumenti concettuali, derivanti dalla copiosa messe di conoscenze accumulate sulle correlazioni esistenti tra le qualità acustiche degli spazi, espresse sul piano della percezione soggettiva, e le grandezze fisiche del campo sonoro che quelle qualità rendono oggettivamente descrivibili e quantitativamente misurabili. Il Novecento è stato il secolo dei descrittori acustici; e in effetti, soprattutto dall'inizio degli anni Settanta ad oggi, si è assistito a uno straordinario sviluppo degli studi volti alla definizione di indici di valutazione delle prestazioni sonore sempre più articolati, e, va detto, anche dalla formulazione via via più complessa, come d'altra parte lo è la multiforme esperienza dell'ascolto. Poi, strumenti matematici, operativi, che offrono la possibilità di simulare numericamente spazi geometricamente anche molto complessi, restituendo modelli architettonici alquanto realistici, pur se forzatamente semplificativi della varietà di fenomeni acustici che effettivamente in quegli spazi avvengono.

In questo Approfondimento ci si intende collocare a quel punto del percorso progettuale in cui ci si deve interrogare sui principi più essenziali della progettazione acustica, su quali siano le principali variabili da considerare, e, infine su quale sia quel giusto equilibrio tra di esse da cui possono scaturire risultati soddisfacenti, o quanto meno, e non è poco, essere scongiurati gli errori progettuali più gravi.

#### Dimensioni, volume e forma

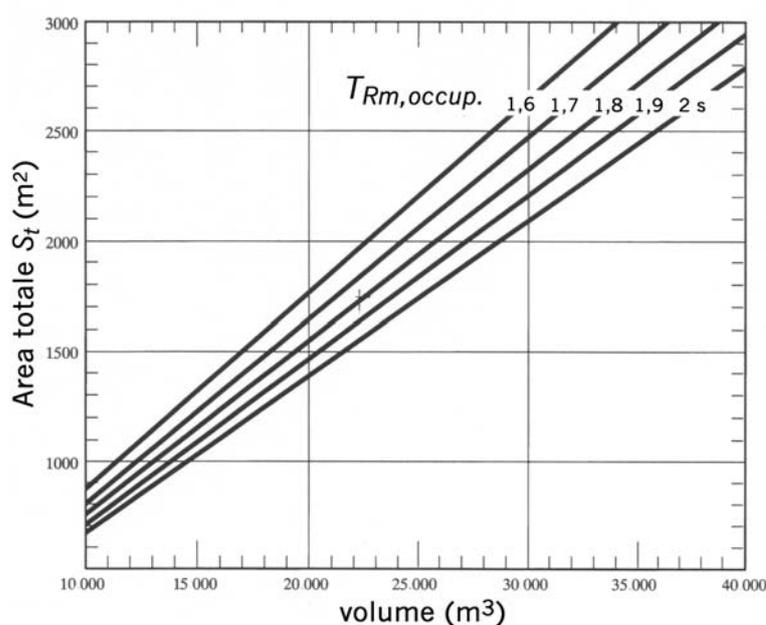
Il punto di partenza del processo progettuale di una nuova sala riguarda senza dubbio il numero totale di posti a sedere previsti, perché è questo dato, come si vedrà, che in definitiva ne fissa dimensioni, volume e anche complessità architettoniche. In questo senso, il numero di posti va dimensionato con molta cura e, soprattutto, devono essere evitate pericolose sopravvalutazioni, per almeno due ragioni importanti: la prima è che le difficoltà di una buona progettazione acustica in genere aumentano con il numero di posti e con l'inevitabile area di assorbimento acustico che ne consegue (solitamente già abbastanza elevata senza che se ne aggiunga altra); la seconda è che nessuna orchestra suona al meglio in una sala eventualmente mezza vuota. Per le sale da concerto si ritiene che 3.000 posti siano un limite massimo da non oltrepassare (Barron, 1993).

Dal numero di posti previsti  $N$ , si può stimare l'area della corrispondente superficie occupata, considerando un'area unitaria ottimale di  $0,69 \text{ m}^2/\text{posto}$ , con la precisazione che questo valore tiene conto anche della superficie del palcoscenico (ed è suggerito da Beranek, 1996, sulla base di un'indagine sulle caratteristiche delle migliori sale da concerto moderne). Più precisamente, è possibile calcolare l'area della superficie  $S_p$  occupata dal pubblico, sapendo che l'area totale  $S_t = S_p + S_o$  (dove  $S_o$  è appunto l'area del palcoscenico) vale

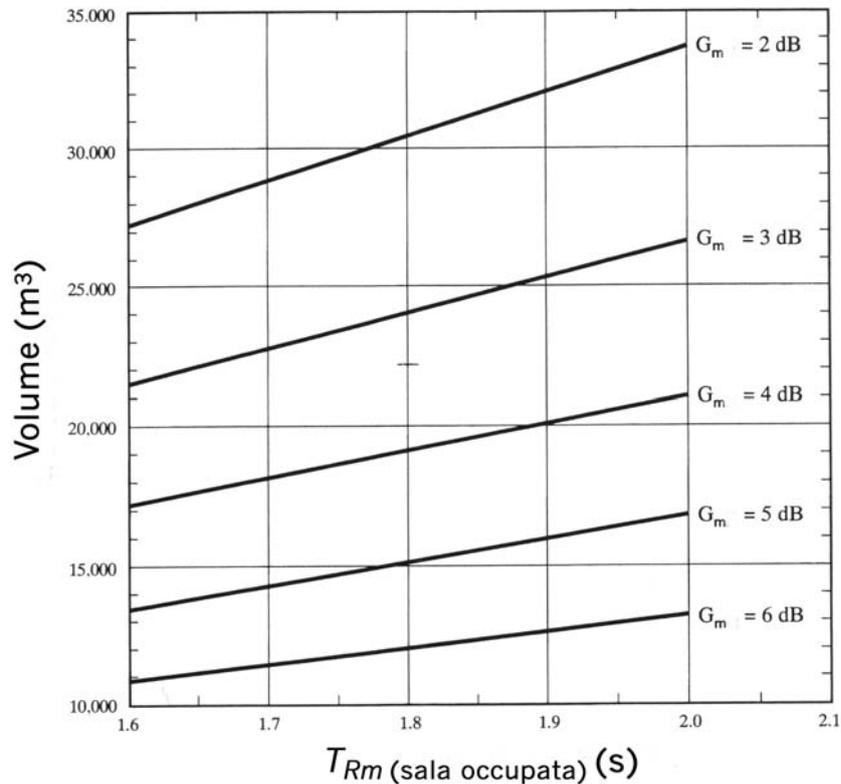
$$S_t = 0,69 N \text{ m}^2 .$$

Esemplificando, in una sala progettata per 2.500 posti l'area totale deve risultare  $S_t = 1.725 \text{ m}^2$ , e, ipotizzando un'area del palcoscenico  $S_o = 200 \text{ m}^2$ , l'area occupata dal pubblico dell'ordine di  $1.525 \text{ m}^2$  (cui corrisponde un'area unitaria di  $0,6 \text{ m}^2$  per posto effettivamente occupato dal pubblico; in ogni caso, è opinione generalizzata che l'area per posto non debba scendere sotto  $0,5 \text{ m}^2$ ).

Il volume totale della sala può essere stimato tenendo conto dei valori attesi di alcuni dei parametri più significativi introdotti nei capitoli precedenti. Un'indicazione molto qualitativa porta a stabilire un volume di  $8-9 \text{ m}^3$  a persona, ma un procedimento più rigoroso, anche questo suggerito da Beranek, è quello che viene prospettato qui di seguito. Nel grafico di Fig. 1 è riportata l'area totale  $S_t$  in funzione del volume  $V$  della sala, per alcuni valori del tempo di riverberazione  $T_{Rm}$  (inteso come media dei valori alle frequenze di 500 Hz e di 1 kHz). Con riferimento all'esempio precedente, per ottenere un tempo di riverberazione medio di 1,8 s è necessario un volume dell'ordine di  $22.000 \text{ m}^3$ . Guardando al grafico di Fig. 2, in cui è riportato il volume della sala in funzione del tempo di riverberazione per alcuni valori medi del parametro *Robustezza del suono* o *Strength*,  $G_m$ , risulta che ai valori di tempo di riverberazione e di volume appena citati corrisponde un valore di  $G_m$  intorno a 3,5 dB. Tuttavia, va rilevato che una *Strength* di quest'ordine è solitamente ritenuta troppo bassa, ed è invece considerato un buon compromesso un valore compreso tra 4 e 5,5 dB. Dal grafico si può constatare che se l'obiettivo è ottenere  $G_m = 4 \text{ dB}$ , a parità di tempo di riverberazione, occorre diminuire il volume a circa  $18.000 \text{ m}^3$ , il che, facendo a ritroso il ragionamento precedente, comporta un sacrificio in termini di numero di posti. Infatti, ritornando al grafico di Fig. 2, ad un volume di  $18.000 \text{ m}^3$  corrisponde, per  $T_{Rm} = 1,8 \text{ s}$ , un'area totale  $S_t$  ottimale di circa  $1.500 \text{ m}^2$ , inferiore a quella pianificata all'inizio, che porta a circa 2.170 posti. Se, viceversa, nel contesto dell'esempio progettuale proposto, il numero di 2.500 posti è considerata un'esigenza irrinunciabile, ci si dovrà accontentare di una *Robustezza*, una *Strength* un po' più bassa, cioè di una sala in cui l'intensità dei suoni prodotti su palcoscenico verrà percepita meno intensa dagli ascoltatori.



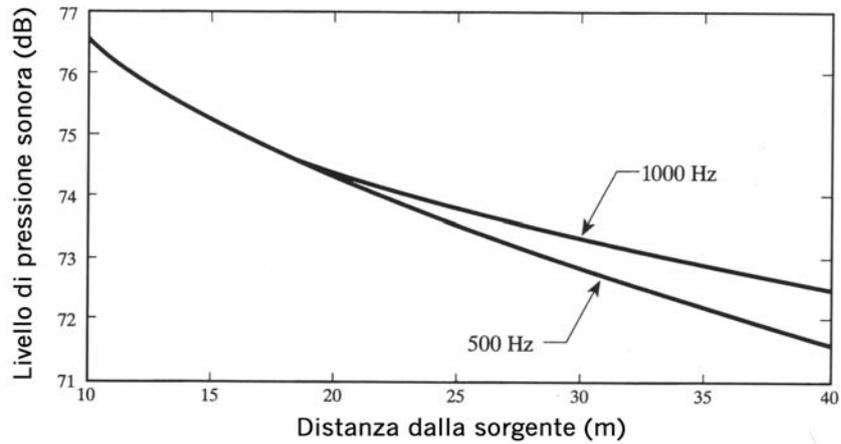
**Fig. 1** Grafico per calcolare l'area totale  $S_t$  occupata dal pubblico in funzione del volume  $V$ , in una sala da concerto, per alcuni valori medi (in frequenza) del tempo di riverberazione (Beranek, 1996).



**Fig. 2** Grafico per determinare il volume di una sala da concerto occupata dal pubblico, in funzione del tempo di riverberazione, per alcuni valori del parametro *Strength*  $G_m$  (Beranek, 1996).

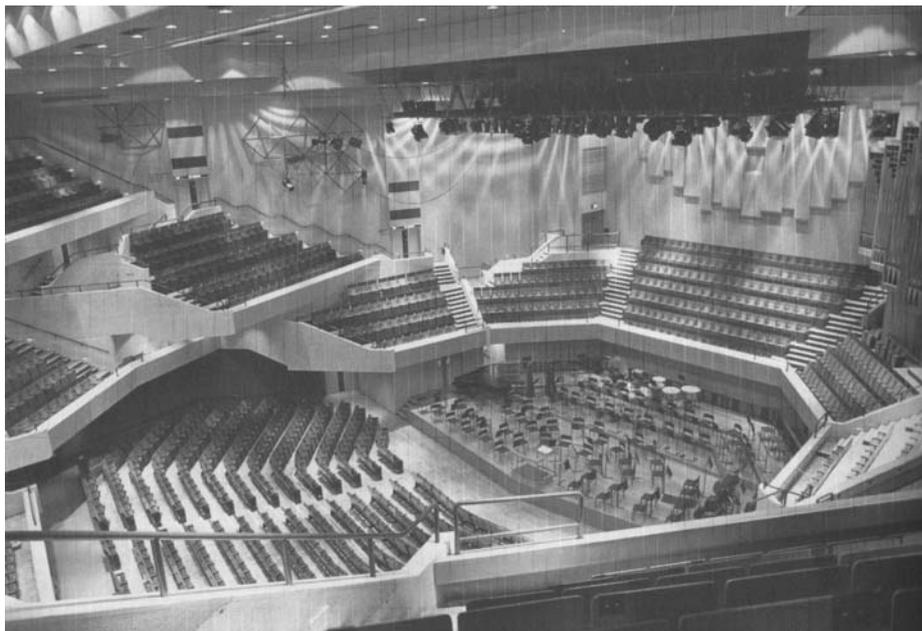
### Le forme tradizionali

Stabiliti numero di posti e volume, si può ottenere un'indicazione sulla forma di massima della sala da una parte guardando a forme di tipo tradizionale e al repertorio delle tante realizzazioni ad esse ispirate, dall'altra tenendo conto del criterio generale che la massima distanza del pubblico dal palcoscenico non dovrebbe superare i 33–35 m (Barron, 1993; Commins, 2002). Un limite, quest'ultimo, che concilia ovvie esigenze visuali con necessità acustiche, nel senso che a distanze maggiori, anche nelle sale meglio progettate (in termini di bilanciamento tra suono diretto e suono riflesso e riverberato), l'intensità sonora – a prescindere da altre valutazioni più complesse cui si accennerà – scende a livelli tali da impedire un ascolto di qualità accettabile. In Fig. 3 è riportato l'andamento del livello di pressione sonora in funzione della distanza del palcoscenico in una sala da 2.500 posti e tempo di riverberazione medio di 2 s; pur trattandosi di un'ottima sala, si può osservare che a 500 Hz il livello di pressione sonora a 40 m è sceso di circa 5 dB rispetto a quello a 10 m, il che significa che l'intensità sonora è diminuita di quasi quattro volte.



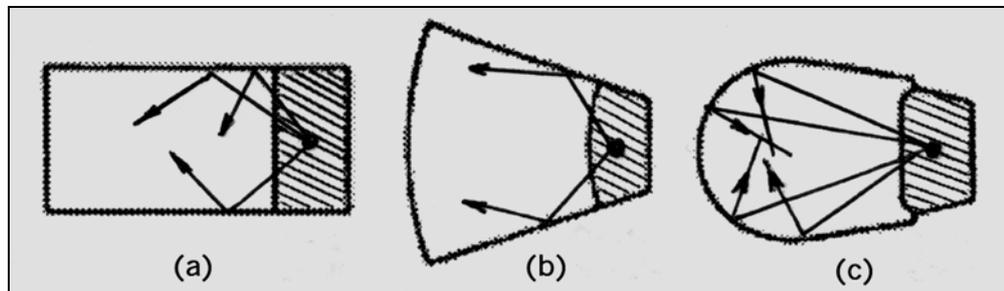
**Fig. 3** Andamento tipico in una grande sala del livello di pressione sonora in funzione della distanza dal palcoscenico, a 500 Hz e a 1 kHz (Beranek, 1996).

Definito questo limite di distanza invalicabile, va anche detto che la condizione ideale sarebbe quella per cui i posti a sedere fossero tutti il più vicino possibile al palcoscenico, per garantire un pieno coinvolgimento (si è detto, visivo e acustico) nell'evento musicale. Condizione questa difficilmente attuabile nella pratica generale, e tanto più in sale con grandi numeri di posti; ed è questa la ragione del frequente ricorso a soluzioni architettoniche specifiche, nelle sale più moderne, come la disposizione di larghi settori di pubblico in balconate che sovrastano intere aree della platea o che si affacciano direttamente sul palcoscenico. Un esempio emblematico, sotto questo punto di vista, è la famosa Berlin Philharmonie, progettata da Lothar Cremer (Cremer, Müller, 1982), con i cosiddetti «terrazzi a vigneto». Un'altra grande sala ideata in base a principi quasi del tutto analoghi è quella rappresentata in Fig. 4.



**Fig. 4** Vista di una sala con grandi balconate terrazzate (St David's Hall, Cardiff, Gran Bretagna: aperta nel 1977, 17.750 m<sup>3</sup>, 2.000 posti,  $T_{Rm} = 1,65$  s) (Barron, 1993).

Tuttavia la forma che storicamente sembra aver garantito i migliori successi, in senso acustico, è quella più semplice, a pianta rettangolare, la cosiddetta forma «a scatola da scarpe» (Fig. 5 (a)). In genere si tratta di sale di larghezza intorno a 20–25 m, la cui buona reputazione è soprattutto legata a caratteristiche di consistente lateralità del suono, dovuta, questa, alle numerose riflessioni prodotte dalle pareti laterali che giungono all'ascoltatore sotto un angolo sufficientemente ampio. Va tuttavia anche sottolineato che la reputazione della pianta rettangolare è prevalentemente associata a sale d'epoca, caratterizzate da soluzioni architettoniche ricche di finiture interne, come stucchi, fregi, statue e altri elementi decorativi, atte di per sé a creare buone condizioni acustiche soprattutto in termini di diffusione del suono (particolarmente significativi, a questo proposito, sono gli esempi della Musikvereinssaal di Vienna e della Boston Symphony Hall).



**Fig. 5** Schematizzazione di piante di forma classica, con indicati i percorsi di alcune riflessioni: (a) «a scatola da scarpe», (b) «a ventaglio», (c) «a ferro di cavallo» (le parti in tratteggio denotano l'area del palcoscenico).

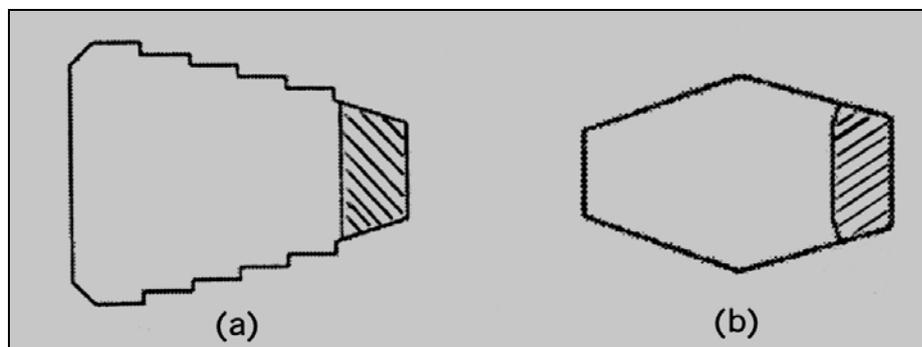


**Fig. 6** Vista di una sala moderna a pianta rigorosamente rettangolare; in questo caso, è soprattutto la complessa struttura del soffitto a favorire di per sé le condizioni di suono diffuso (Maltings Concert Hall, Snape, Gran Bretagna: aperta nel 1970, dopo riadattamenti, 800 posti,  $T_{Rm} = 1,9$  s) (Barron, 1993).

D'altra parte, anche le poche sale moderne a pianta rigorosamente rettangolare che si conoscono devono la buona qualità delle prestazioni acustiche non tanto alla forma stessa quanto ad architetture interne sufficientemente elaborate, tali da favorire le citate condizioni di campo diffuso (vedi per esempio la sala di Fig. 6)

Meno successo sembra invece aver riscontrato la forma cosiddetta «a ventaglio» (Fig. 5(b)) e il motivo è principalmente riconducibile alla scarsa lateralità del suono che in questo caso la forma stessa determina: le riflessioni dalle pareti laterali giungono all'ascoltatore sotto un angolo molto stretto, quasi frontalmente, con direzionalità non molto dissimile a quella del suono diretto. L'implicazione è che nelle sale con pianta a ventaglio viene in genere fortemente penalizzato il senso di spazialità avvertito dall'ascoltatore e di conseguenza il suo coinvolgimento nel campo sonoro. Un ulteriore problema che può derivare da questa forma è che la parete di fondo della sala tende frequentemente, per ovvie ragioni, ad essere realizzata con profilo curvo e concavità verso l'interno della sala, determinando possibili pericolose focalizzazioni di energia sonora. Ciononostante moltissime sale con pianta di questo tipo sono state e vengono effettivamente realizzate, soprattutto in ragione del fatto che a parità di lunghezza consentono di ospitare una più grande quantità di pubblico; in molti casi agli effetti acustici negativi appena citati viene fatto fronte con accorgimenti architettonici diversi, per esempio realizzando balconate laterali in grado di sostenere riflessioni con angoli più ampi, oppure movimentando il profilo delle pareti in una sequenza di sottopareti parallele, come schematizzato in Fig. 7(a).

Un'ulteriore variante della geometria a ventaglio è quella che fa assumere alla pianta della sala la forma di un esagono allungato (Fig. 7(b)); anche qui lo scopo è di godere di un'ampia disponibilità di posti, recuperando una più utile distribuzione spaziale delle riflessioni.



**Fig. 7** Varianti della forma «a ventaglio»: (a) pareti *frammentate* per favorire una maggior ricchezza di riflessioni laterali, (b) forma «a esagono allungato», per recuperare utilmente le riflessioni sulla seconda parte delle pareti laterali.

La forma a «ferro di cavallo» (Fig. 5(c)), storicamente molto seguita nella realizzazione di teatri d'opera, in linea di principio non risulta particolarmente adatta ad indirizzare la progettazione di grandi sale da concerto. Quando la pianta viene ampliata abbastanza per ottenere tempi di riverberazione soddisfacenti e per consentire la disposizione di una consistente quantità di posti, la struttura spazio-temporale delle riflessioni tende a impoverirsi, da una parte rendendo più deterministica che casuale la distribuzione del campo acustico, e di conseguenza più difficile da conseguire l'auspicata condizione di buona diffusione del suono, dall'altra non favorendo un'equa distribuzione di prime riflessioni laterali. Inoltre, anche in questo caso, temutissimi sono i problemi di focalizzazione che possono derivare dalla forma concava delle pareti.

Valgono anche per questa forma classica le considerazioni fatte in precedenza a proposito delle sale a pianta rettangolare: le numerosissime realizzazioni a forma di ferro di cavallo di cui si dispone riguardano in larga parte sale d'epoca, frequentemente di notevole interesse storico-artistico, ma in gran parte concepite come teatri d'opera. Una certa carenza di diffusività associata

alla forma è quasi sempre compensata da una complessa struttura architettonica interna – con una quasi costante presenza di palchi e mezzanini – che tuttavia nulla può in termini di tempo di riverberazione: prestazioni acustiche eccellenti per l'opera, ma in genere non altrettanto soddisfacenti per la musica sinfonica o cameristica.

### **«Gestione» delle riflessioni**

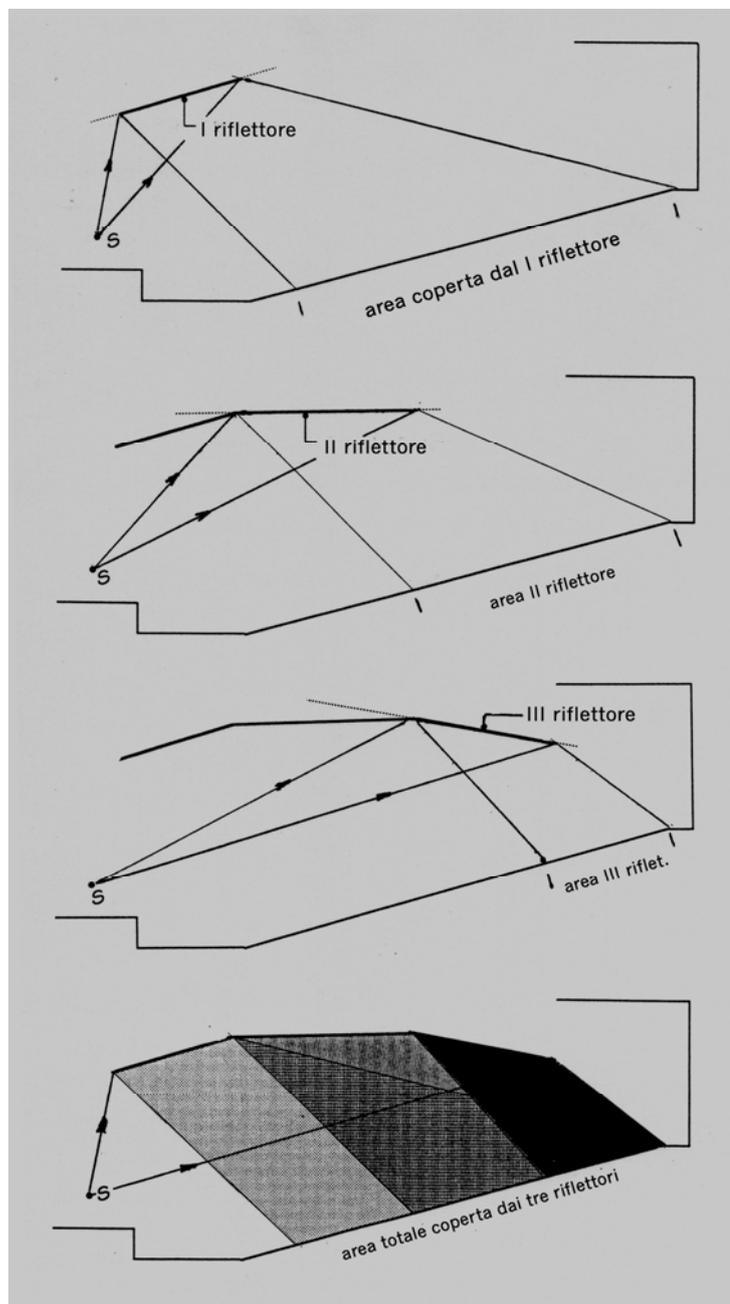
Come è noto, l'intensità dei suoni generati sul palcoscenico tende ad attenuarsi con la distanza per semplice divergenza geometrica. Oltre a ciò, durante il percorso di propagazione per via diretta essi subiscono un assorbimento progressivo (*radente*), dovuto alla presenza del pubblico (o delle poltrone vuote), più o meno rilevante a seconda della disposizione dei posti (in piano, in pendenza costante o variabile da settore a settore). Questa perdita di energia sonora, che ovviamente interessa soprattutto le aree di ascolto più lontane dal palcoscenico, può essere compensata solamente con una scrupolosa «gestione» dell'energia riflessa dalle superfici che delimitano la sala.

#### **Riflessioni dal soffitto**

Il soffitto di una sala, considerando che in genere si tratta della più grande superficie disponibile e solitamente in larga parte libera, è principalmente deputato a svolgere la funzione cui si è appena accennato, oltre a quella, come si vedrà nel prossimo paragrafo, di garantire le opportune riflessioni sul palcoscenico e un fruttuoso accoppiamento tra questo e le aree di ascolto. I principi in base ai quali questa forma di compensazione dell'energia può essere attuata sono resi chiari in Fig. 8, dove è schematizzata la disposizione di tre superfici riflettenti disposte con un'angolazione, rispetto a un'ipotetica posizione della sorgente, tale da favorire una progressiva distribuzione di energia riflessa verso il fondo della sala. Allo stesso risultato si può pervenire sia profilando opportunamente la superficie continua del soffitto, sia disponendo al di sotto di esso un'adeguata schiera di pannelli discreti (vedi l'esempio di Fig. 9). In base agli insegnamenti dell'acustica geometrica, si sa che pannelli singoli si comportano da efficaci riflettori per tutte quelle frequenze le cui lunghezze d'onda sono più piccole delle loro dimensioni lineari; il che significa che per riflettere suoni a bassa frequenza occorre ricorrere a superfici importanti, almeno dell'ordine di 2,5–3 m in ciascuna delle due dimensioni. Tuttavia se i pannelli sono numerosi e abbastanza ravvicinati (vedi più avanti) è possibile scendere a dimensioni più contenute, ragionevolmente intorno a 1,5 m × 1,5 m. In Fig. 10 è riportato un esempio in cui i riflettori a soffitto sono invece disposti in forma di grandi vele in successione continua. Una carente progettazione del soffitto dal punto di vista acustico, per esempio a causa del fatto che vengono privilegiati altri aspetti tecnologici, come i sistemi d'illuminazione di sala e palcoscenico, può comportare conseguenze molto negative, principalmente una distribuzione irregolare dell'energia sonora, quando non proprio la formazione di aree acusticamente discontinue (come rappresentato nello schema di Fig. 11).

D'altra parte, va anche chiaramente sottolineato che l'uso delle riflessioni dal soffitto al fine di coprire omogeneamente l'area occupata dal pubblico non è del tutto privo di rischi. Se è vero che tali riflessioni comportano un positivo rafforzamento del suono diretto – sotto la stringente condizione che rispetto a quest'ultimo esse giungano all'ascoltatore entro ritardi temporali definiti – è anche da non sottovalutare la possibilità di inopportuni effetti di «colorazione dei toni» o addirittura di strani effetti di «falsa localizzazione» della sorgente. I primi dovuti al fatto che in certe aree della sala sono privilegiate le riflessioni di alcune frequenze e in altre aree quelle di frequenze differenti, i secondi conseguenti a riflessioni così energetiche da far percepire le sorgenti come collocate sulla stessa superficie riflettente anziché sul palcoscenico dove i suoni vengono generati. In genere questi problemi vengono risolti da un accurato bilanciamento tra le riflessioni dal soffitto

e quelle provenienti per via laterale (vedi oltre), e in ogni caso prevedendo superfici che anziché riflettere in modo puramente speculare favoriscano una riflessione parzialmente diffusa, e quindi una minore direzionalità angolare dell'energia riflessa, per esempio introducendo irregolarità superficiali di scala medio-piccola.



**Fig. 8** Principio di disposizione di tre riflettori acustici a soffitto; l'energia sonora riflessa si somma progressivamente, in modo che siano maggiormente interessate le parti della sala via via più lontane dal palcoscenico.

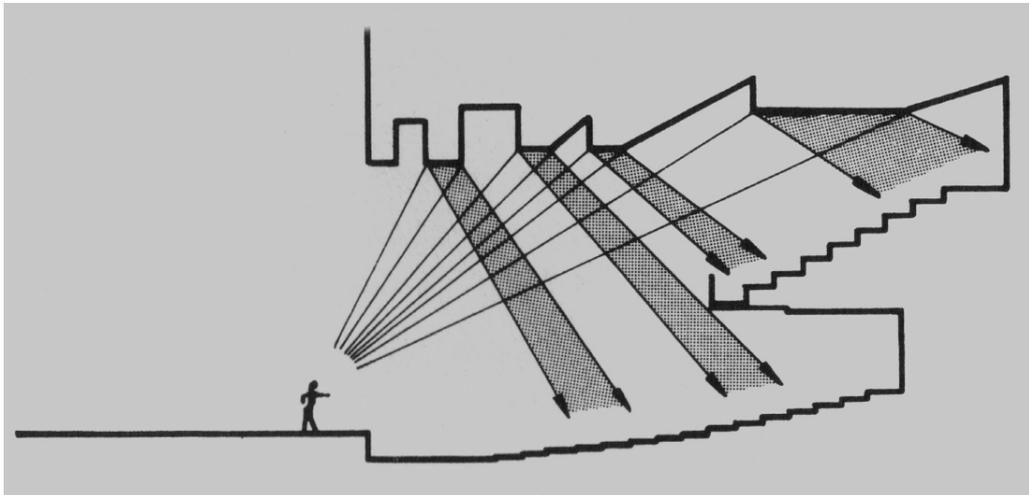


**Fig. 9** Esempio di utilizzo di schiere di pannelli riflettenti discreti a soffitto; si può osservare che la prima fila di pannelli copre acusticamente soprattutto il palcoscenico, mentre le file successive interessano la sala (Mehta et al., 1999).

Un altro aspetto che va attentamente considerato, nella gestione delle riflessioni dal soffitto, riguarda le possibili conseguenze in termini di riverberazione. Indirizzare molte riflessioni direttamente su un'area acusticamente molto assorbente, quale è quella occupata dal pubblico, evidentemente sottrae quote significative di energia disponibili alla riverberazione, in particolare quella associata alla parte iniziale del decadimento, quella, come si è visto nel testo del Capitolo 20, quantitativamente descritta dall'*EDT* (*Early Decay Time*, *Tempo di decadimento iniziale*). Poiché sul piano soggettivo è soprattutto questo tempo di primo decadimento a rendere conto del senso di riverberazione, ciò che ne può conseguire in una sala in cui venga fatto un robusto ricorso alle riflessioni dal soffitto è la percezione di una minore riverberazione, rispetto a quella che ci si aspetterebbe in base al solo volume.



**Fig. 10** Esempio di struttura riflettente a soffitto continua, realizzata in forma di grandi *vele* appese al vero soffitto (NHK Hall di Tokyo: aperta nel 1973, 25.200 m<sup>3</sup>, 3.677 posti,  $T_{Rm} = 1,7$  s) (Beranek, 1996).



**Fig. 11** Un soffitto non ottimizzato acusticamente può essere causa di evidenti discontinuità nella distribuzione dell'energia sonora nella sala (Barron, 1993).

Infine, quando si ricorre all'installazione di pannelli riflettenti sospesi, un dato non insignificante, e rispetto al quale è necessario un giusto compromesso, è la densità con cui essi vengono disposti. Se non sono abbastanza fitti la loro efficacia è limitata; se, al contrario lo sono troppo, lo

spazio ad essi sovrastante, delimitato dal soffitto, rischia di comportarsi come un secondo volume accoppiato acusticamente con il volume principale della sala. Orientativamente, una densità del 50% risulta ancora offrire una discreta efficienza di riflessione anche alle basse frequenze (Rindel, 1991), oltre che scoraggiare i possibili effetti negativi summenzionati.

### **Riflessioni laterali e spazialità**

Se le riflessioni frontali dal soffitto possono essere proficuamente utilizzate, pur se con discernimento, per il rafforzamento del suono diretto, quelle sulle superfici laterali sono assolutamente indispensabili per ottenere un giusto senso di coinvolgimento, di avviluppamento nel campo sonoro. Una riflessione laterale è tale se vi è ritardo temporale tra la percezione dei due orecchi; più è grande l'angolo di arrivo rispetto alla testa dell'ascoltatore, più accentuata è la sensazione di spazialità. Inoltre, perché sia efficace, essa deve possedere un sufficiente contenuto energetico, la qual cosa si verifica essenzialmente con le riflessioni del prim'ordine o al più del second'ordine. Purché queste condizioni siano soddisfatte, sono da considerare laterali non solo le riflessioni sul percorso sorgente-parete-ascoltatore, ma anche quelle che interessano sorgente-parete-soffitto-ascoltatore, o, ancora, i suoni che giungono all'ascoltatore dopo aver subito una riflessione per esempio sul parapetto di una balconata.

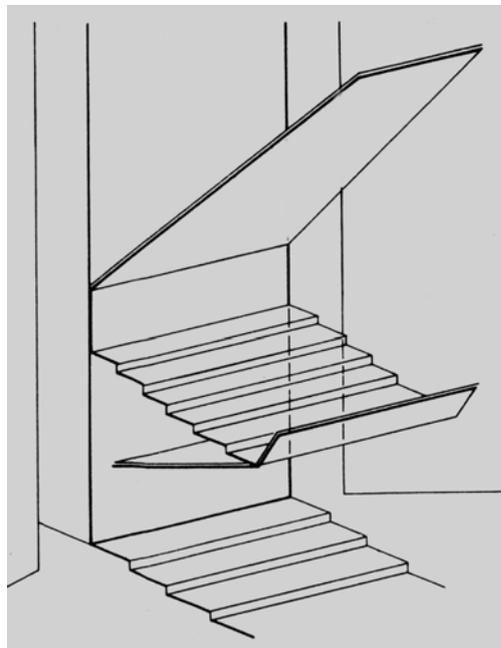
Poco aggiungendo a quanto è già stato detto nel testo del Capitolo 20, va sottolineato che le aree delle pareti che più concorrono alla formazione di prime riflessioni laterali sono quelle prospicienti al palco ed è quindi su queste che occorre puntare l'attenzione, in termini di inclinazione, forma e finitura superficiale. Nelle grandi sale, a pianta molto larga, alla carenza geometrica di riflessioni laterali si supplisce, come si è visto, prevedendo balconate sospese o terrazze molto vicine al palco, oppure ricorrendo ad ampi pannelli riflettenti sospesi con la giusta inclinazione.

In molte sale moderne, edificate in particolare negli anni Sessanta e nei primi anni Settanta, la percezione di spazialità è stata ricercata attraverso la progettazione e la realizzazione di pareti laterali con proprietà fortemente diffondenti, in base alla convinzione che solo un campo acustico altamente diffuso, in cui il suono giunge all'orecchio da tutte le direzioni, possa rendere pienamente il senso della risposta acustica della sala ai suoni prodotti sul palco. In Fig. 12 è riportato l'esempio di una sala in cui addirittura tutte le pareti sono coperte da strutture concepite in modo da massimizzare la riflessione diffusa.

Solo più tardi, soprattutto per merito dei lavori di Michael Barron, si è compreso a fondo che – sebbene vi sia certamente correlazione tra diffusione e spazialità – il ruolo determinante è giocato dalle prime riflessioni laterali e che queste sono più efficacemente perseguite con un ragionato e appropriato orientamento delle superfici, piuttosto che con un loro esasperato e indiscriminato trattamento diffondente (Barron, 1971; Barron, Marshall, 1981). In Fig. 13 sono schematizzati i riflettori laterali utilizzati sopra e sotto le balconate della Christchurch Town Hall, per determinare un controllato effetto di spazialità.



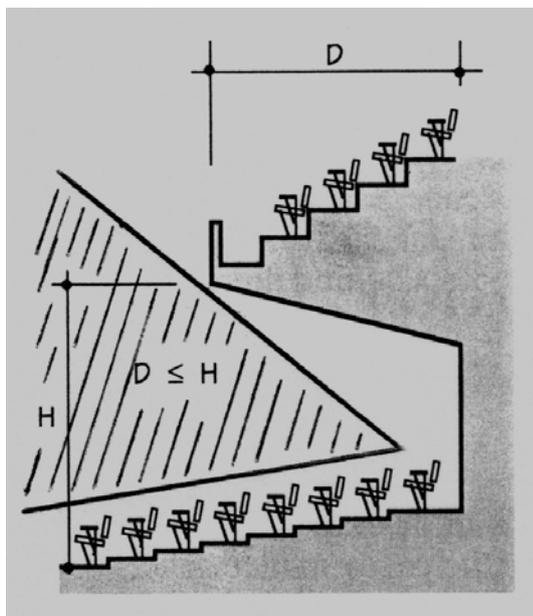
**Fig. 12** Esempio di impiego spinto di strutture acusticamente diffondenti sulle pareti, nell'intento di creare un accentuato senso di impressione spaziale (Concert hall De Oosterpoort, Groningen, Olanda: aperta nel 1974, 14.010 m<sup>3</sup>, 1.200 posti,  $T_{Rm} = 2,1$  s) (Talaske et al., 1982).



**Fig. 13** Schema dei riflettori disposti in ogni settore di posti sulle balconate della Christchurch Town Hall, Nuova Zelanda, per determinare un adeguato effetto di spazialità (Barron, 1993).

## Balconate e pareti di fondo

Con riferimento alle balconate sospese, cui è capitato più volte di accennare, va sottolineato il fatto che esse sono quasi sempre fonte di problemi acustici, spesso non del tutto risolvibili. Il motivo è che i posti sottostanti le balconate, e, a maggior ragione quelli situati più in profondità, essendo parzialmente mascherati, ricevono solo una parte dei suoni nel complesso riflessi dalle parti più alte della sala (Fig. 14). Il risultato è che l'intensità sonora è ridotta, e in genere risulta sminuita anche la riverberazione percepita. Se la balconata è molto profonda e la *bocca* di apertura relativamente piccola, addirittura il suono proveniente per via diretta dal palcoscenico può subire un'attenuazione in eccesso. Ciò che tipicamente si avverte è una carenza di «intimità» e un senso sgradevole di distacco dal campo acustico principale della sala. Per mitigarne gli effetti negativi, è necessario che la profondità della balconata ( $D$ , nella figura) sia ragionevolmente contenuta, non più grande dell'altezza ( $H$ ) dell'apertura (Beranek, 1962). Inoltre può essere utile un profilo del soffitto della balconata opportunamente disegnato, al fine di favorire riflessioni aggiuntive in grado di incrementare l'intensità sonora nei posti sottostanti.



**Fig. 14** I posti sotto le balconate sospese ricevono l'energia sonora sotto angoli più ristretti rispetto agli altri posti; per mitigare gli effetti negativi è necessario che la profondità della balconata  $D$  sia minore dell'apertura sottostante  $H$ .

La parete di fondo (della platea e delle balconate, se ve ne sono) è una potenziale fonte di eco, anche in sale di medie dimensioni, tenendo conto che sono sufficienti differenze di cammino acustico tra suono diretto e suono riflesso dell'ordine di 17–18 m (cui corrispondono ritardi temporali dell'ordine di 50 ms) perché il fenomeno si manifesti. Per *scongiurare* questo pericolo, anziché ricorrere al rimedio più drastico, che consisterebbe nel rendere acusticamente assorbente la superficie della parete, è opportuno intervenire direttamente sulla forma, come già accennato,

rendendola ad esempio leggermente convessa, o frammentandone coscientemente il profilo, o, ancora, introducendo veri e propri elementi diffondenti appositamente progettati.

### **Progettare per gli esecutori**

Potrà apparire sorprendente, ma nel contesto generale della progettazione acustica delle grandi sale da concerto le esigenze degli esecutori non sono sempre considerate con il rilievo necessario, e, d'altra parte, su quest'aspetto non sono numerosi gli studi specifici di una qualche sistematicità.

La concezione, abbastanza diffusa, secondo cui una sala che presenta una «buona acustica» per gli ascoltatori automaticamente ciò vale anche per gli esecutori, non è sempre del tutto vera, specie se la sala è stata progettata con in mente l'unica priorità di distribuire al meglio tra le aree coperte dal pubblico l'energia sonora prodotta sul palcoscenico, senza troppo preoccuparsi di cosa sul palcoscenico stesso succede. Le poche indagini condotte su questo aspetto, ponendosi gli interrogativi «le condizioni acustiche sul palcoscenico sono sempre uguali a quelle nelle aree di pubblico?» e «i musicisti manifestano esattamente le stesse necessità e aspettative acustiche degli ascoltatori?», hanno tratto la chiara conclusione che entrambe le affermazioni sono false (Gade, 1981).

In effetti quello che avviene sul palcoscenico è un fenomeno acustico molto complesso, che coinvolge diversi fattori interdipendenti tra di essi, che vanno dalla disposizione dell'orchestra e delle sue varie sezioni, alla potenza sonora emessa dai singoli strumenti musicali e alle caratteristiche di direzionalità del suono che essi irradiano. Analogamente, sono molto articolate le richieste che i musicisti pongono all'acustica della sala, e in particolare: riverberazione; sentirsi l'uno con gli altri; *supporto* (facilità di suonare e di sentire il proprio strumento, di «portare il suono»); timbro; *ambito* dinamico (facilità di suonare il *fortissimo*, possibilità di saturare la sala con il suono); intimità (facilità di «entrare in contatto» con gli ascoltatori) (Gade, 1981, 1982). Alcune di queste aspettative, come riverberazione e timbro, sono probabilmente legate alle prestazioni acustiche della sala nel suo complesso (Barron, 1993); altre, più specifiche e solitamente anche indicate dagli esecutori proprio tra le più importanti, come il *supporto* e le condizioni d'insieme, sono più direttamente determinate dalle caratteristiche acustiche del palcoscenico, e quindi da una accurata progettazione sua e delle superfici che lo delimitano o comunque più prossime ad esso.

**AREA E FORMA DEL PALCOSCENICO.** Il principale criterio acustico di cui tener conto consiste nel fatto che distribuire gli esecutori su aree troppo ampie compromette la comunicazione tra i singoli musicisti e tra le diverse sezioni orchestrali. È stato provato (Gade, 1989) che per distanze superiori a 8 m il ritardo del suono diretto diventa abbastanza grande da impedire buone condizioni d'insieme. Naturalmente occorre aver ben presente il problema opposto, cioè che distanze troppo ravvicinate, specie rispetto agli strumenti di maggior potenza sonora come gli ottoni, possono produrre effetti di mascheramento tra diverse sezioni (vedi più avanti: pedane rialzate), oltre che di vero e proprio rischio di danno uditivo agli stessi musicisti. Beranek (1962) suggerisce un'area media per musicista di 1,9 m<sup>2</sup>. Considerazioni più recenti (Barron, 1993) portano ad identificare aree distinte per gruppi di strumenti: 1,25 m<sup>2</sup> per violini, viole, strumenti a fiato; 1,5 m<sup>2</sup>, per violoncelli e strumenti a fiato più grandi; 1,8 m<sup>2</sup> per i contrabbassi; 10 m<sup>2</sup> per i timpani e 20 m<sup>2</sup> per gli altri strumenti a percussione. Per una piena orchestra di 100 elementi, questi valori comportano un'area netta coperta di circa 150 m<sup>2</sup>. Uno spazio in più per i solisti, per eventuali percussioni aggiuntive, e una fascia libera di 1–1,5 m sulla parte anteriore del palcoscenico, portano ad un'area totale di 180–190 m<sup>2</sup>. Per un coro di 100 persone deve essere inoltre prevista un'area di circa 50 m<sup>2</sup> su gradinate poste sulla parte di fondo del palcoscenico.

Il palcoscenico non dev'essere né troppo largo né troppo profondo. Se troppo largo, gli ascoltatori seduti su un lato della sala sentono il suono degli strumenti più vicini prima di quelli degli strumenti posti all'estremità opposta del palcoscenico; se è troppo profondo, qualcosa di analogo avviene nei confronti del suono prodotto dagli strumenti posti anteriormente rispetto a quelli verso il fondo palcoscenico. A queste controindicazioni va aggiunto il fatto che se il palcoscenico è troppo largo aumentano le difficoltà del direttore d'orchestra nel seguire le diverse sezioni. In definitiva, se l'area totale, ad esempio, è di  $190 \text{ m}^2$ , la larghezza non dovrebbe superare i 17 m, cui corrisponde una profondità di circa 11 m. Inoltre, dovrebbe essere prevista la possibilità di ridurre l'area effettiva del palcoscenico nel caso in cui debba ospitare piccoli gruppi orchestrali, per esempio utilizzando pareti mobili idonee.

Infine, specie per le grandi orchestre, sul palcoscenico è essenziale la presenza di pedane rialzate per uno o più gruppi di musicisti, per favorire una libera propagazione del suono irradiato dagli strumenti, sul palcoscenico stesso e verso il pubblico. L'altezza delle pedane può essere contenuta in circa 10 cm per gradino.

**SUPERFICI LATERALI E SOFFITTO: RIFLESSIONI E DIFFUSIONE.** Le superfici laterali che delimitano il palcoscenico, o comunque le superfici più prossime (per esempio i parapetti di balconate sospese che si affacciano direttamente sul palco) devono essere orientate in modo che l'energia sonora riflessa interessi in modo significativo l'area occupata dall'orchestra, e perché ciò avvenga con maggior efficacia, anche eventualmente inclinandone verso il basso le parti più elevate (come nell'esempio di Fig. 15). Se il palcoscenico è totalmente aperto (*open stage*), o anche solo privo di pareti laterali (è il caso dei palchi circondati dal pubblico su tre lati, *thrust-stage*), alle funzioni cui si è appena accennato occorre provvedere con pannelli o strutture riflettenti di forma, dimensioni, collocazione adatte, e sufficientemente massicci per evitare fenomeni di assorbimento acustico a bassa frequenza per *risonanza di membrana* (è necessaria una massa per unità di superficie intorno a  $20 \text{ kg/m}^2$ ).



**Fig. 15** Ampi riflettori laterali sul palcoscenico; la parte superiore dei riflettori è inclinata verso il basso per accrescerne l'efficacia (Radiohuset di Copenhagen: aperta nel 1945,  $11.900 \text{ m}^3$ , 1.081 posti,  $T_{Rm} = 1,5 \text{ s}$ ) (Beranek, 1996).

Altrettanto efficacemente devono essere utilizzate le riflessioni dal soffitto. In particolare, se il palcoscenico non è sovrastato da un soffitto vero e proprio, oppure se questo è troppo alto, occorre, anche in tal caso, ricorrere a riflettori acustici sospesi (si osservino quelli ben evidenti nelle Figg. 16 e 17). I riflettori devono essere collocati ad un'altezza dal piano del palcoscenico entro 6–8 m, e, come accennato nel paragrafo precedente, con una densità di copertura adeguata. Il ritardo dell'energia sonora riflessa sul palcoscenico stesso dev'essere dell'ordine di 20–30 ms (Barron, 1993).

Al campo acustico creato sul palcoscenico è opportuno inoltre conferire un certo grado di diffusività per evitare concentrazioni di energia o effetti di colorazione, e viceversa favorire condizioni di equilibrio sonoro tra le diverse sezioni dell'orchestra: a ciò si può provvedere conferendo una qualche irregolarità alle superfici riflettenti e agli eventuali pannelli sospesi anche solo una leggera convessità (in Fig. 17, i riflettori sul soffitto del palcoscenico assumono la forma di dischi convessi).



**Fig. 16** Elementi di forma irregolare inseriti nelle pareti del palcoscenico, per favorire la diffusione del suono (Festspielhaus di Salisburgo: aperta nel 1960, 15.500 m<sup>3</sup>, 2.158 posti,  $T_{Rm} = 1,5$  s) (Beranek, 1996).



**Fig. 17** Riflettori sul palcoscenico realizzati in forma di dischi leggermente convessi (Teatro Dal Verme, Milano: 10.500 m<sup>3</sup>, 1.463 posti) (Foto INRiM).

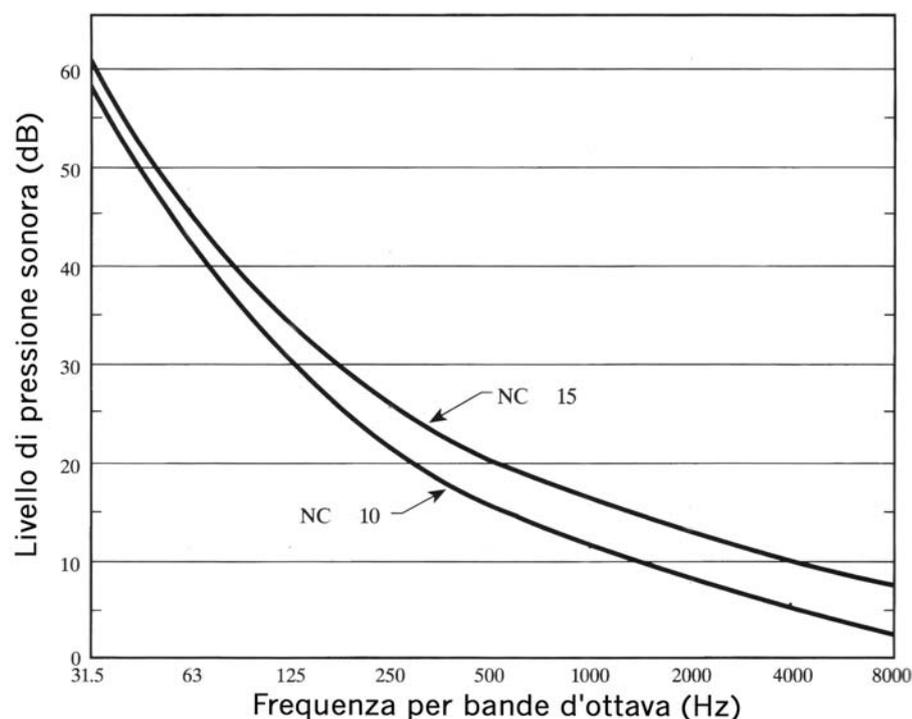
### **Un basso rumore di fondo**

Il rumore può ovviamente costituire un problema molto serio per la qualità dell'ascolto in una sala. Le fonti di rumore possono essere del tutto esterne (in primo luogo il traffico stradale, ma anche il sorvolo di aerei o il passaggio di treni); esterne alla sala, ma all'interno del complesso edilizio che la contiene (soprattutto impianti di condizionamento dell'aria, ma anche attività in ambienti contigui alla sala); infine, ma di solito prevalenti, fonti interne alla sala stessa (bocchette di aerazione che immettono il rumore che si propaga molto facilmente attraverso i condotti). Analoghi problemi costituiscono le vibrazioni meccaniche che si propagano per via strutturale, e che possono essere per esempio indotte da mezzi di trasporto pesanti, da linee della metropolitana o da grandi impianti di ventilazione.

Sono disponibili diversi criteri per valutare la tollerabilità del rumore di fondo, a seconda della destinazione d'uso dell'ambiente, espressi sotto forma di curve limite, in funzione della frequenza, che non devono essere superate. Per esempio, applicando il *Noise Criterion* americano, nelle grandi sale da concerto non dovrebbe essere superata la curva limite *NC15* (Fig. 18), il che significa che il livello di pressione sonora del rumore di fondo dev'essere, in particolare, inferiore a circa 26 dB nella banda d'ottava a 250 Hz, a circa 20 dB in quella a 500 Hz, a 17 dB a 1 kHz e a 14 dB a 2 kHz.

Per ottemperare a limiti così stringenti occorre un'attenta progettazione integrata che tenga conto del complesso dei problemi elencati sopra, prevedendo strutture edilizie e componenti (per

esempio i serramenti e, aspetto molto critico, le porte di accesso alla sala) di per se stessi caratterizzati da elevate prestazioni in termini di potere fonoisolante, disponendo il trattamento con materiali fonoassorbenti dei locali annessi alla sala, come *foyer*, atri e corridoi, e dimensionando con cura, fin dall'origine, in particolar modo gli impianti di trattamento dell'aria (ivi compresi posizionamento, dimensioni e forma delle bocchette di mandata e ripresa), e contemplando l'installazione di proporzionati sistemi di insonorizzazione (silenziatori) lungo i condotti (per questi aspetti si rimanda a Spagnolo, 2007).



**Fig. 18** Curve Noise Criterion NC (rappresentate per bande di frequenza d'ottava) suggerite per valutare l'accettabilità del rumore di fondo. La curva NC15 è indicata per le sale da concerto, la NC10 per i teatri d'opera. In nessuna banda di frequenza lo spettro del rumore di fondo deve superare la curva prescritta.

## Bibliografia

- BARRON M., 1971, *The subjective effects of first reflections in concert halls. The need of lateral reflection*, J. Sound Vib., 15, pp. 475-94.
- , 1993, *Auditorium acoustics and architectural design*, E&FN SPON, London-New York.
- BARRON M., MARSHALL A.H., 1981, *Spatial impression due to early lateral reflections in concert halls: the derivation of a physical measure*, J. Acoust. Soc. Am., 77, pp 211-33.
- BERANEK L.L., 1962, *Music, acoustics and architecture*, Wiley, New York.
- , 1996, *Concert and opera halls. How they sounds*, AIP for Acoust. Soc. Am., New York.
- COMMINS D.E., 2002, *L'acustica dei teatri e delle sale da concerto*, in J.J. Nattiez (a cura di), *Enciclopedia della musica*, vol. II, Einaudi, Torino.
- COX T.J., D'ANTONIO P., 2004, *Acoustics absorbers and diffusers*, SPON Press, London-New York.

- CREMER L., MULLER H.A., 1982, *Principles and applications of room acoustics*, vol. 1, Applied Science Publ., London-New York.
- GADE A.C., 1981, *Musicians' ideas about room acoustic qualities*, Report 31, Technical University of Denmark.
- , 1982, *Subjective room acoustics experiments with musicians*, Report 32, Technical University of Denmark.
- RINDEL J.H., 1991, *Design of new ceiling reflectors for improved ensemble in a concert hall*, Appl. Acoust., 34, pp. 7-17.
- MEHTA M., JOHNSON J., ROCAFORT J., 1999, *Architectural acoustics. Principles and design*, Prentice Hall, Englewoods Cliffs.
- SPAGNOLO R. (a cura di), 2007, *Manuale di acustica applicata*, CittàStudi Edizioni, Torino.
- TALASKE R.H., WETHEWRILL E.A., CAVANAUGH W.J. ( a cura di), *Halls for music performance. Two decades of experience: 1962-1982*, AIP for Acoust. Soc. Am., New York.