

UNIVERSITÀ DI BOLOGNA

FACOLTA' DI INGEGNERIA

DOTTORATO DI RICERCA  
IN FISICA TECNICA

CONSORZIO FRA LE SEDI DI:

BOLOGNA, PADOVA, MILANO, TORINO, GENOVA, TRIESTE e PISA

COORDINATORE: PROF. ALESSANDRO COCCHI

LA CARATTERIZZAZIONE ACUSTICA  
DELLE SALE DA SPETTACOLO  
CON PARTICOLARE ATTENZIONE ALLE ESIGENZE  
DI ASCOLTO DELLA MUSICA SINFONICA

TESI DI DOTTORATO DI: ANGELO FARINA

ANNO ACCADEMICO 1985-86

## INDICE ANALITICO

<b>CAP. 1 - PREMESSA E CENNI STORICI</b>	p. 1
1.1 Introduzione	p. 2
1.2 Storia del Teatro	p. 5
1.3 L' opera di Sabine	p. 14
1.4 Critiche all' opera di Sabine	p. 19
1.5 L' opera di Beranek	p. 26
1.6 Ulteriori sviluppi	p. 32
1.7 Le teorie odierne	p. 36
1.8 La proposta di Ando	p. 44
<b>CAP. 2 - TECNICHE DI MISURA</b>	p. 56
2.1 Le misure acustiche	p. 57
2.2 Misure di livello	p. 59
2.3 Misure di riverberazione	p. 71
2.4 Misure di distribuzione temporale	p. 81
2.4.1 Risposta all'Impulso e Tempo di Riverb.	p. 100
2.5 Misure di distribuzione spaziale	p. 105
2.6 Misure di intensità acustica	p. 113

<b>CAP. 3 - TECNICHE DI PREVISIONE</b>	p. 119
3.1 Modelli e criteri di similitudine	p. 120
3.2 Modelli fisici in scala	p. 123
3.3 Modelli numerici	p. 132
3.3.1 Sorgenti virtuali	p. 136
3.3.2 "Ray Tracing"	p. 142
3.3.3 Elementi acustici di superficie	p. 146
3.4 Modelli misti fisico-numerici	p. 152
<b>CAP. 4 - VALUTAZIONI SOGGETTIVE</b>	p. 156
4.1 Indagini statistiche	p. 157
4.2 Analisi dei dati	p. 162
4.3 Giudizi comparativi	p. 170
4.4 Scale di valutazione della preferenza	p. 179
<b>CAP. 5 - PROCEDURA DI MISURA E VALUTAZIONE</b>	p. 192
5.1 Schema concettuale	p. 193
5.2 Hardware	p. 198
5.2.1 La sorgente sonora	p. 199
5.2.2 La testa artificiale	p. 203
5.2.3 L' analizzatore di Fourier	p. 207
5.2.4 Il microcomputer	p. 212
5.2.5 Apparecchi ausiliari e schema compl.	p. 216

5.3 Software	p. 220
5.3.1 Software di sistema	p. 223
5.3.2 Programma di acquisizione	p. 227
5.3.3 Programma di elaborazione dati	p. 232
5.3.4 Programma di presentazione grafica	p. 242
<b>CAP. 6 - MISURE IN SALE ESISTENTI</b>	p. 249
6.1 Ambiente di prova	p. 250
6.2 Teatro "Marialuigia" di Parma	p. 272
6.3 Chiesa "S. Domenico" di Foligno	p. 290
6.4 Teatro "Astra" di Forlì	p. 308
<b>CAP. 7 - CONCLUSIONI</b>	p. 326
7.1 Discussione dei risultati	p. 327
7.2 Problemi irrisolti	p. 335
6.3 Possibili sviluppi futuri	p. 339
<b>APPENDICI :</b>	p. 344
A) Note bibliografiche	p. 345
B) Elenco delle figure	p. 353
C) Simbologia	p. 361

## PREMESSA

La qualità acustica delle sale da concerto, e delle grandi sale multiuso, è da anni al centro degli studi degli acustici più quotati, senza che sia stata sinora definita una procedura oggettiva, accettata da tutti, capace di prevedere i risultati ottenibili già in corso di progettazione di una sala o di confrontare su basi comparative le prestazioni di due sale esistenti.

Per il secondo problema, l'unico metodo apparentemente attendibile consisterebbe nella valutazione statistica dei giudizi soggettivi di un gran numero di ascoltatori: ciò è di fatto irrealizzabile, poiché i risultati dipendono troppo dalla particolare esecuzione musicale in corso, e risentono della enorme variabilità del gusto musicale. Esperimenti condotti in questo senso lasciano tuttavia pensare che, al di là delle valutazioni soggettive, esistano alcuni parametri oggettivi del campo acustico i cui valori ottimali non dipendono dagli ascoltatori, né dal tipo di musica eseguita; altri parametri invece dipendono dal tipo di musica, ma in modo abbastanza prevedibile.

Nel corso degli anni, numerosi studiosi hanno proposto vari metodi di determinazione di questi parametri, assegnando a ciascuno di essi un diverso peso. Con questa

metodologia, è possibile, entro certi limiti, prevedere il comportamento di sale in corso di progettazione, ed affrontare in questo modo il primo problema. Il primo esempio in questo senso fu dato dallo stesso Sabine, che all'inizio del secolo individuò il parametro detto "Tempo di Riverberazione", ne studiò i valori ottimali per vari tipi di musica, e fornì una semplice formula per la previsione del valore di questo parametro in funzione di alcuni elementi progettuali (Formula di Sabine).

In questo lavoro vengono presi in considerazione tutti i parametri oggettivi sinora individuati, viene fatta una analisi critica del loro effetto sulla qualità acustica delle sale da concerto, viene presentata una procedura per la determinazione sperimentale dei parametri stessi in sale esistenti, e per il calcolo di un indice di preferenza soggettiva, correlabile con i risultati delle misure statistiche succitate.

La procedura proposta, basata su moderne tecniche digitali di trattamento dei segnali, è stata utilizzata per lo studio di alcuni teatri italiani, dei quali è possibile verificare le prestazioni. I risultati sperimentali ottenuti possono venire utilizzati come dati di riferimento per la progettazione di nuove sale, riducendo grandemente le incertezze oggi presenti nel processo di previsione della qualità acustica.

**1° CAPITOLO**

**PREMESSA E CENNI STORICI**

## 1.1 Introduzione

In questo capitolo verranno prese in considerazione le principali teorie sviluppate per descrivere il campo acustico in un ambiente chiuso, e per caratterizzarne la qualità tramite un numero ridotto di parametri oggettivi.

Sino al secolo scorso, la progettazione degli spazi acustici destinati alla musica o al parlato avveniva in base a criteri di similitudine con precedenti ambienti notoriamente validi, e le innovazioni architettoniche spesso derivavano da considerazioni al più marginalmente fondate su criteri di carattere acustico; ogni tentativo di realizzare forme nuove non poteva essere valutato dal punto di vista della qualità dell' ascolto finché lo ambiente non era ultimato.

Ciononostante si giunse a realizzare ambienti dalle mirabili prestazioni, che si pongono anche oggi come traguardi da raggiungere. Nel corso di questo secolo, viceversa, non sono mancati i clamorosi fallimenti di realizzazioni eseguite in accordo a teorie fisiche e acustiche ben definite, anche se negli ultimi anni simili eventi sono diventati più rari.

La separazione netta fra l' epoca precedente, basata su concetti empirici ed analogie , e quella attuale, che vede dominare determinazioni fisiche e complesse



formulazioni matematiche, è senz'altro rappresentata dall'opera di Sabine [1], che agli inizi del '900 individuò il primo, e più importante, parametro fisico capace di dare informazioni sulla qualità acustica: il TEMPO DI RIVERBERAZIONE.

Lo stesso Sabine fu in grado di fornire i primi criteri di progettazione acustica degli ambienti chiusi, poiché riuscì a correlare in modo semplice il parametro da lui individuato con le caratteristiche fisiche e geometriche dell'ambiente. Egli individuò così i requisiti che è necessario garantire per ottenere una buona qualità acustica:

" è necessario che:

- 1) il suono sia sufficientemente forte;
- 2) le componenti contemporanee di un suono complesso mantengano un rapporto appropriato tra le loro intensità;
- 3) suoni successivi nella loro rapida articolazione siano chiari e distinti, liberi da sovrapposizione mutua e da rumori estranei."

Oggi i requisiti individuati da Sabine sono ancora validi, anche se è stato possibile precisare meglio il significato delle sue parole; inoltre è stata evidenziata la importanza di un quarto requisito, legato alla direzionalità del campo acustico: per un buon ascolto è necessario essere avvolti dal suono, e ciò avviene solo in

ambienti che forniscono sufficienti riflessioni laterali.

Prima di affrontare lo studio del campo acustico negli ambienti chiusi, è bene inquadrare l'opera di Sabine e dei suoi successori nel lungo processo che ha portato dai teatri all'aperto dell'antichità fino alle più rinomate sale oggi esistenti [2].

## 1.2 Storia del Teatro

L'origine del teatro, nell'ambito culturale definito "occidentale", viene usualmente attribuita alla civiltà Greca, che ci ha lasciato opere imponenti sia in campo architettonico che come testi per rappresentazioni. E' comunque lecito pensare che il fenomeno delle rappresentazioni pubbliche, musicali e non, sia esistito praticamente in tutte le culture, quasi in ogni epoca.

I teatri greci erano sostanzialmente di due tipi : lo Odeon, di dimensioni relativamente piccole, che inizialmente nacque come teatro all'aperto e fu poi coperto con travature in legno, e l'anfiteatro, capace di contenere fino a 15 - 20 mila spettatori; quest'ultimo era ovviamente scoperto, poiché i Greci non conoscevano le strutture a volta, e pertanto non erano in grado di coprire grandi spazi.

Le rappresentazioni che si svolgevano in questi teatri comprendevano sia esecuzioni musicali, che canti (accompagnati o no dagli strumenti), oltre alla recitazione. Non è chiaro se le famose tragedie di Sofocle ed Euripide venissero **recitate** o più propriamente **cantate**, tuttavia la potenza sonora emessa dagli attori non poteva certo essere enorme, e pertanto la forma e la collocazione dei grossi anfiteatri doveva essere tale da garantire lo

ascolto anche a distanze ragguardevoli.

Il primo criterio era la scelta del luogo, solitamente a ridosso di una collina, ed in luoghi isolati, in modo da garantire un basso rumore di fondo ed un naturale effetto schermante; l'orientamento rispetto al sole era tale da garantire una corretta illuminazione nelle ore del pomeriggio. La scena era conformata in modo da rinforzare il suono delle voci degli attori, poiché era di scarsa profondità, cosicché essi si trovavano con un parete riflettente subito alle spalle, con lo scopo di riflettere l'energia sonora verso il pubblico.

Immediatamente davanti alla scena era l'orchestra, ribassata rispetto al piano dell'azione, e pavimentata con lastre di pietra o marmo anch'esse molto riflettenti: qui stava il coro, che accompagnava la rappresentazione con canti e musiche ritmiche.

Le gradinate, su cui sedevano gli spettatori, erano molto ripide; ciò aveva la duplice funzione di garantire un buona visuale a tutti, e di evitare che il suono si dissipasse incidendo in modo radente sugli ascoltatori.

La forma a ventaglio dell'anfiteatro consentiva una minore distanze media fra gli ascoltatori e gli attori, a parità di numero di posti. Oltre alle considerazioni esposte, sono stati fatti vari tentativi per dimostrare che gli architetti greci avevano ben più approfondite

cognizioni acustiche, conoscendo il fenomeno delle riflessioni speculari, e dimensionavano le gradinate in modo che le onde riflesse giungessero in ogni punto con riflessioni di ampiezza e ritardo opportuni.

Il teatro greco trovò sbocco, a livello culturale, in quello romano, che ne arricchì notevolmente la varietà di generi e di forme espressive. Tuttavia, a livello architettonico, i Romani peggiorarono la situazione, poiché ingrandirono la scena (a vantaggio del fasto degli allestimenti) e riservarono ai senatori lo spazio dedicato al coro: in questo modo venne fortemente ridotta la efficienza riflettente della parete di fondo e della pavimentazione antistante la scena.

I Romani inventarono peraltro forme di spettacolo diverse, direttamente non riconducibili nell'ambito teatrale, che portarono alla costruzione di immense opere quali il Colosseo. Per garantire il massimo numero di spettatori, l'originale forma dell'anfiteatro fu ingrandita fino a racchiudere completamente il luogo dello spettacolo stesso. Va detto comunque che in queste strutture non aveva molta importanza l'efficienza dello ascolto, poiché vi si svolgevano eventi assimilabili più alle manifestazioni sportive dei Greci, cui erano destinati gli Stadi, che ad esecuzioni di rappresentazioni teatrali o musicali.

Dopo il declino dell' Impero Romano, per tutta la durata del Medio Evo, le uniche rappresentazioni di cui si ha notizia si svolgevano nelle chiese e nella piazze. In particolare va sottolineata l' importanza delle chiese quali contenitori musicali, che permangono tutt' oggi, e che ha visto addirittura nascere generi musicali strettamente correlati con l' architettura degli edifici, non correttamente eseguibili al di fuori delle chiese stesse.

Nel Rinascimento vennero usualmente sfruttati i cortili dei palazzi, anche se incominciarono a venir realizzate piccole sale coperte: la prima di esse, che merita di essere citata, è il teatro Olimpico del Palladio a Vicenza.

Nel XVII secolo l' opera lirica iniziò il suo prodigioso sviluppo: ciò allargò notevolmente il numero di spettatori, mentre contemporaneamente aumentavano in tutta Europa le rappresentazioni musicali. Sorsero così la necessità di creare teatri pubblici, che vennero costruiti sempre più numerosi e di maggiori dimensioni, fino a giungere al periodo di massimo fulgore dell' ottocento.

L' impianto architettonico venne fondamentalmente modificato: scomparve la gradinata per gli spettatori, sostituita da palchi sovrapposti in più ordini. La zona dell' orchestra, sempre ribassata rispetto alla scena, venne adibita agli spettatori, ribattezzata "platea", e

dotata di una minima pendenza verso la scena. Questa ultima venne dotata anch' essa di una lieve pendenza verso gli spettatori; venne creato un grande boccascena, chiudibile dal sipario, per consentire il cambio delle scene dietro il palcoscenico. Davanti al boccascena si trova il cosiddetto proscenio, prolungamento del palcoscenico che consente agli attori di avanzare nel corso della rappresentazione verso il pubblico. Tra il proscenio e la platea, ulteriormente in basso, si trova un piccolo spazio destinato all' orchestra.

La pianta di questi teatri, comunemente detti "classici", è la caratteristica forma a ferro di cavallo; le più famose sale in Italia e nel mondo sono sorte in questo periodo, e sono in gran parte utilizzate con successo anche oggi.

Solitamente i teatri classici godono di ottima fama sotto il punto di vista acustico: ciò è in parte spiegabile in base a caratteristiche fisico-acustiche della struttura, ma va anche considerato che la gran parte della produzione musicale è stata ideata appositamente per essere eseguita in queste sale da parte del compositore (spesso inconsciamente). Nella storia della musica sono stati infatti molto pochi i compositori che presero in esame il legame fra l' ambiente di esecuzione e la musica: l' esempio lasciato da Wagner è purtroppo abbastanza

isolato.

Ci si rende conto dell' importanza di questo fatto pensando come la musica sacra, composta per essere eseguita nelle chiese, perde gran parte delle sue qualità se eseguita in un ambiente poco riverberante, e così anche la musica detta appunto "classica" viene giudicata soddisfacente solo se ascoltata nei teatri classici. Va infine considerato il fattore abitudine: siamo sempre stati abituati a sentire certi brani suonati o cantati in un certo modo, in un certo ambiente, e talvolta ciò che viene giudicato sgradevole é semplicemente ciò cui non siamo abituati.

Ogni successiva modifica allo impianto architettonico suddetto fu legata alla nascita di nuovi generi musicali.

All' inizio dell' ottocento nacque lo stile sinfonico, che dava più importanza al complesso musicale che alle voci dei cantanti; fu pertanto necessario ampliare lo spazio dell' orchestra. Fu in particolare Wagner che impose modifiche architettoniche sostanziali, poiché necessitava di alloggiare una numerosa orchestra senza allontanare troppo gli spettatori dalla scena: egli inventó dunque il golfo mistico, interrato sotto il proscenio, ove il suono di molti strumenti si amalgamava ed usciva rinforzato come da una cassa armonica. In molti teatri di questo tipo, sotto il pavimento del golfo



mistico, realizzato in legno, si trova una cavità concava, simile alla parte inferiore di una botte, con lo scopo di creare una ulteriore rinforzo.

Wagner non si limitò a modificare radicalmente la zona dell' orchestra, ma introdusse altre varianti : egli fu finanziato da Ludwig II per la costruzione del teatro lirico di Bayreuth, che fu dotato per volere di Wagner di una pianta a ventaglio, e per volere del finanziatore di una parete di fondo ricoperta di palchi per la corte e la alta società. Il risultato fu molto buono, poiché i palchi sulla parete di fondo evitano riflessioni concentrate indietro verso il centro geometrico della sala.

In questo secolo vi furono molti motivi che spinsero i progettisti ad abbandonare la classica pianta a ferro di cavallo o rettangolare: necessità di aumentare il numero di posti, di garantire a tutti uguali condizioni di visuale e di ascolto, desiderio di coprire la sala con strutture a volta, suggerirono piante a ventaglio o trapezoidali, che apparentemente sono in grado di apportare solo benefici. Purtroppo, accanto a sale di questo tipo dalle buone prestazioni, ne furono realizzate altre del tutto insoddisfacenti; i criteri di progettazione acustica manifestarono tutte le loro incongruenze, l' opera di Sabine fu ridimensionata, e fu necessario intraprendere un lungo processo di ricerca che

non é ancora concluso.

In questo secolo i progettisti acustici sono rimasti notevolmente indietro rispetto agli architetti, che hanno ideato geometrie sempre piú inconsuete, delle quali non era possibile prevedere il comportamento sonoro. Spesso é stato necessario ricorrere a mezzi elettroacustici o elettronici per correggere il comportamento di sale altrimenti fallimentari.

Oggi l' elettronica ha fatto tali e tanti progressi che molti ritengono inevitabile il ricorso a queste tecnologie per migliorare l' ascolto, con il pessimo risultato che si vedono spesso impianti di amplificazione spropositati installati in sale anche piccole, il cui unico problema sono le pareti ed il pavimento troppo lisci e riflettenti : in questo modo si ottiene solo un rimbombo insopportabile.

Il desiderio di realizzare sale con elevatissima capienza, con caratteristiche multiuso, con disposizione variabile dell' evento spettacolare rispetto agli spettatori, rendono oggi estremamente arduo progettare correttamente l' acustica teatrale, anche se cominciano ad essere disponibili teorie capaci di descrivere tutte le parti del complesso trasferimento di informazione che avviene fra la sorgente sonora ed il cervello dello ascoltatore. L' analisi storica di queste teorie é dunque

il presupposto per comprendere l' attuale situazione della  
ricerca.

### 1.3 L' opera di Sabine

Pochi anni prima della fine del secolo, il professore di Fisica di Harvard, Wallace Clement Sabine, fu chiamato a correggere l'acustica dell'appena inaugurato Fogg Art Museum, il cui auditorium soffriva di eccessiva riverberazione; il parlato era infatti praticamente incomprensibile per tutti gli ascoltatori, tranne quelli seduti nelle prime file.

Sabine trascorse lunghe notti nel silenzioso sotterraneo del Jefferson Physical Laboratory, ascoltando i decadimenti sonori di canne d'organo (in particolare alla frequenza di 517 Hz, nota DO della 4<sup>a</sup> ottava); egli stava seduto in una specie di forno per bagno turco, dal quale emergeva solo la testa, per minimizzare l'effetto assorbente del corpo umano. In questo modo determinò sperimentalmente la legge che collega la riverberazione con il volume e le superfici dell'ambiente, e che porta ovviamente il suo nome.

Essendo molto silenzioso l'ambiente in cui conduceva queste sperimentazioni, Sabine era in grado di sentire la coda sonora delle note d'organo fino ad una intensità pari grosso modo ad un milionesimo della intensità di regime, e pertanto definì come Tempo di Riverberazione (o durata convenzionale della coda sonora) il tempo impiegato

dalla intensità sonora a ridursi ad un milionesimo del valore preesistente.

Sabine effettuò poi misure sperimentali in alcuni ambienti, in particolare nella Boston Concert Hall, e concluse che il legame fra il tempo di riverberazione da lui definito e le caratteristiche dell' ambiente era approssimato molto bene dalla relazione:

$$T = 0.16 \cdot \frac{V}{\sum_i a_i \cdot S_i} \quad ( 1.1 )$$

in cui  $V$  è il volume dell' ambiente in  $m^3$ ,  $S_i$  è la superficie  $i$ -esima di parete in  $m^2$ , ed  $a_i$  sono i **coefficienti di assorbimento apparente** delle superfici stesse, compresi fra 0 e 1, definiti dal rapporto fra la energia non rinviata nell' ambiente e l' energia incidente sulla superficie ( in effetti Sabine diede un diverso valore al coefficiente numerico 0.16, poiché non utilizzava le grandezze del S.I.).

I coeff. di assorbimento apparente  $a_i$  rappresentano lo unico dato di determinazione incerta, ma lo stesso Sabine risolse brillante questo problema: è infatti sufficiente confrontare i Tempi di Riverberazione misurati in uno

stesso ambiente prima e dopo l' introduzione di una superficie nota di un certo materiale, ed applicando due volte la formula di Sabine si ottiene il coeff. di assorbimento del materiale introdotto. Questo risultato fu ottenuto dopo un lungo via-vai notturno dell' assistente di Sabine, incaricato di introdurre o togliere cuscini dall' ambiente di prova.

Grazie ai risultati ottenuti, Sabine fu in grado di determinare la quantità di materiale foncassorbente da introdurre nell' auditorium in esame, che divenne perfettamente utilizzabile.

In seguito a questo successo, fu affidata al professor Sabine la progettazione acustica della nuova Boston Symphony Hall. Egli decise di riprodurre i risultati delle sale più stimate esistenti, e seguendo la compagnia orchestrale della Boston Symphony in una delle sue tournée, ebbe modo di analizzare fra l' altro la Carnegie Hall di New York, l' Accademia della Musica di Filadelfia e la Gewandhaus di Leipzig.

Il risultato fu la progettazione di una delle migliori sale a tutt' oggi realizzate, cosa che consacrò il prof. Sabine come il vero iniziatore della Acustica degli Ambienti Chiusi.

Negli anni successivi Sabine perfezionò i suoi studi, affrontando il complesso campo della individuazione dei

tempi di riverberazione ottimali per i vari possibili eventi acustici: gli fu infatti subito chiaro che il parlato richiedeva meno riverberazione della musica, e che i diversi generi musicali richiedevano ambienti adatti. Egli fu pertanto pioniere anche dei giudizi soggettivi, poiché effettuò indagini comparative di preferenza su un gruppo di musicisti, cui veniva chiesto un parere corale, in base alla loro stessa esecuzione di un brano musicale, sulla riverberazione di una aula di conservatorio, il cui tempo di riverberazione veniva variato introducendo un appropriato numero di cuscini.

Il rigore metodologico di Sabine non fu però comunicato agli altri studiosi, che hanno per decenni individuato i tempi di riverberazione ottimali in base più al gusto personale che alla reputazione di sale esistenti, sebbene nel campo del parlato le prove di intelligibilità abbiano consentito di individuare ben presto che lo intervallo ottimale varia da 0.5 s per le sale più piccole fino ad un massimo di 1.2 s per i grandi auditori.

Di fatto, nonostante l'individuazione di relazioni più accurate e di metodi di calcolo estremamente raffinati, la formula di Sabine viene tutt'oggi largamente utilizzata per la sua semplicità, per la discreta affidabilità, e soprattutto perché la gran parte dei dati di riscontro oggi disponibile, sia per i tempi di

riverberazione che per i coeff. di assorbimento apparente,  
é desunta dall' utilizzo della formula stessa.



#### 1.4 Critiche all' opera di Sabine

Dal lavoro di Sabine presero le mosse altri ricercatori, che da un lato misurarono i Tempi di Riverberazione di numerosissime sale in tutto il mondo, dall' altro approfondirono l' analisi dei fondamenti teorici, riuscendo a ottenere da essi ciò che Sabine aveva dedotto sperimentalmente.

Tra i primi vanno citati Knudsen, Wood, Lochner e Burger, Kuhl, Michel, Watson, Beranek, ecc. [3..90]: dal loro lavoro dipendono ancor oggi i valori consigliati del Tempo di Riverberazione per i vari tipi di musica.

Tra i secondi vanno ricordati innanzitutto Jaeger [10], che giunse ad una espressione analoga a quella di Sabine utilizzando la teoria cinetica dei gas; poi il belga Dungen, che riaffrontò il problema mediante le equazioni della meccanica dei fluidi; infine Strutt e Morse [12,13], che si servirono dei metodi della meccanica quantistica. Grazie a questi lavori furono compresi meglio il significato e le limitazioni della formula di Sabine: in pratica essa può essere derivata teoricamente, se si fanno alcune ipotesi da tenere accuratamente presenti poi come limiti di applicabilità.

Lo stesso Sabine si rese conto delle approssimazioni

insite nella sua formula: basti pensare che essa, qualora tutte le pareti siano dotate di assorbimento unitario, fornisce per T un valore diverso da zero, mentre è evidente che in realtà non esiste riverberazione in assenza di riflessioni sulle pareti.

Comunque furono evidenziate 5 condizioni, tali da consentire la giustificazione teorica della formula: vediamole separatamente.

La prima condizione è quella di uguaglianza in tutti i punti dell' ambiente del tempo di riverberazione: ciò equivale ad ammettere che la legge di decremento della energia sonora D sia la medesima in tutti i punti, cosa che si verifica effettivamente in ambienti di forma usuale, con sorgente sonora abbastanza baricentrica, ma non certo in quei casi in cui l' ambiente risulta dallo insieme di altri vani minori con caratteristiche diverse.

La seconda condizione consiste nella possibilità di sostituire alla lunghezza dei singoli percorsi dei raggi sonori un libero cammino medio, valutato secondo la teoria cinetica dei gas in questo modo:

$$l = \frac{4 \cdot V}{S_t} \quad ( 1.2 )$$

nella quale  $V$  è il volume dell' ambiente e  $S_t$  è la somma delle superfici di contorno. Questa ipotesi è lecita solo se le tre dimensioni dell' ambiente sono non molto dissimili fra loro, e perde significato in ambienti di forma inusuale.

La terza condizione è quella di poter trattare le pareti come se fossero dotate tutte dello stesso coefficiente di assorbimento apparente,  $a_m$ , ottenuto da una media dei coefficienti di assorbimento pesata sulle superfici stesse. Questo è lecito solo se le superfici hanno assorbimenti poco dissimili, cosa che in generale non si verifica nei teatri, per la presenza di una superficie (il pubblico) di assorbimento nettamente superiore alle altre.

La quarta condizione consiste nel considerare nullo lo assorbimento da parte dell' aria, che viceversa può divenire rilevante in caso di ambienti grandi, specie alle alte frequenze.

Infine la quinta condizione è quella di continuità del decadimento sonoro, rappresentato con una curva di tipo esponenziale, mentre in realtà è noto che il primo tratto della curva di decadimento presenta gradini piuttosto evidenti, dovuti alla onda diretta ed alle prime riflessioni, anche se in seguito la legge esponenziale è effettivamente ben approssimata.

In base alle ipotesi fatte, ci si può aspettare che la formula di Sabine non sia adatta a trattare ambienti di forma irregolare, con disuniforme distribuzione delle superfici assorbenti, e con valori elevati del coeff. di assorbimento medio; di fatto però essa è stata applicata anche in questi casi, dando luogo a previsioni errate o a risultati aberranti quali coeff. di assorbimento maggiori dell' unità.

Per ovviare alle limitazioni insite nella quinta condizione fu sviluppata una teoria più raffinata, che tiene conto della natura a scalini del decadimento sonoro: essa è dovuta ad Eyring [13], ed è valida anche in presenza di forti assorbimenti e di ambienti molto grandi.

Nella teoria di Eyring si fa l' ipotesi di conoscere un coefficiente di riflessione medio delle pareti  $r_m$ , esprime la frazione di energia rinviata nell' ambiente dalle pareti soggette al campo acustico effettivamente presente; grazie a questo concetto si ricava la seguente espressione per il tempo di riverberazione T:

$$T = - 0.161 \cdot \frac{V}{S_t \cdot \ln(r_m)} \quad \dots ( 1.3 )$$

Il calcolo di  $r_m$  può tenere conto della disuniformità di distribuzione del materiale fonoassorbente, e della eventuale mancanza di uniforme diffusione dell' energia sonora all' interno dell' ambiente: in questo senso la formula di Eyring rimuove molti dei limiti concettuali tipici dell' espressione di Sabine. Se poi si fa la ipotesi di poter considerare il campo sonoro perfettamente diffuso, si ottiene per  $r_m$  il semplice valore  $1-a_m$  (ciò però limita nuovamente il campo di applicazione). Nonostante i numerosi studi compiuti sulla determinazione di  $r_m$  in casi diversi, usualmente la formula di Eyring è stata utilizzata sotto le ipotesi di uniforme diffusione, e solo in quei casi ove l' alto valore del coeff. di assorbimento medio  $a_m$  non consentiva di utilizzare la formula di Sabine.

Un ulteriore limite alla diffusione della formula di Eyring discende dal fatto che tutti i dati sperimentali riguardanti i coeff. di assorbimento discendono dall' uso della formula di Sabine, e pertanto il loro utilizzo in altre formule conduce ad errori anche rilevanti.

Per quanto riguarda l' effetto dell' assorbimento del suono da parte dell' aria, è stata proposta [14] la seguente modifica della formula di Sabine:

$$T = 0.161 \cdot \frac{V}{\frac{a}{m} \cdot S_t + 4 \cdot \beta \cdot V} \quad ( 1.4 )$$

nella quale  $\beta$  rappresenta un coefficiente connesso con le proprietà assorbenti dell'aria, con l'umidità relativa e con la frequenza del suono.

Essendo detto coefficiente di valore modesto, soprattutto alle basse frequenze, appare giustificato trascurare il termine aggiuntivo a denominatore ogniqualevolta l'ambiente abbia un volume  $V$  non enorme.

Nonostante le migliorie apportate alla teoria di Sabine, l'evoluzione architettonica portò alla costruzione di sale estremamente lontane dalle capacità di previsione di una formula tutto sommato così semplice: alcune di queste sale diedero buoni risultati, malgrado i tempi di riverberazione effettivi fossero risultati diversi da quelli previsti; altre, viceversa, pur essendo dotate di tempo di riverberazione compreso nei limiti di accettabilità, furono criticate per difetti acustici di diversa origine (a parte certi echi, udibili solo da orecchi acutissimi).

Ci si rese conto pertanto che il tempo di riverberazione non è il solo parametro importante per una

buona acustica, e che ben più complessi fenomeni andavano considerati. Di questi il primo a venire considerato fu lo equilibrio spettrale, ovvero la capacità dell' ambiente di fornire un campo acustico privo di attenuazioni o esaltazioni pronunciate su tutta la gamma di frequenze.

Il peso della passata enfasi sul problema della riverberazione fece sì che questo aspetto venisse riconvertito in termini di tempo di riverberazione: esso venne dunque determinato per bande di ottava o, più recentemente, di terzi d' ottava, e si ritenne corretto pretendere una sostanziale uniformità del tempo di riverberazione alle varie frequenze. Ciò in effetti non equivale ad una trasmissione del suono uniforme in frequenza, poiché una certa banda di frequenza può risultare fortemente attenuata, ma può decadere con la stessa velocità di altre bande di frequenza non attenuate.

Fu comunque l' opera di Beranek a ridimensionare la importanza del tempo di riverberazione, affiancandolo a numerosi altri criteri.

### 1.5 L' opera di Beranek

Il primo serio tentativo di giungere ad una classificazione di qualità delle sale da concerto è rappresentato dall' opera di Leo Beranek intitolata "Music, Acoustic and Architecture" [15], pubblicata nel 1962.

Dopo aver raccolto informazioni sulla geometria, sulla natura delle superfici interne, sui tempi di riverberazione e su vari altri dettagli di 54 sale da concerto e teatri d'opera, Beranek fece compilare dettagliati (e ridondanti) questionari a 50 fra direttori d'orchestra e critici musicali. Molti di essi aggiunsero le loro opinioni personali, che unite a quelle dello autore vennero inserite nella valutazione complessiva.

Beranek visitò personalmente tutte le 54 sale da lui considerate, per controllare l' esattezza dei dati fornitigli , dei disegni e dei materiali; e ove furono riscontrate discrepanze, egli le risolse tramite corrispondenza con le persone che gli avevano fornito i dati di riferimento originali.

Purtroppo, in contrasto con la estrema cura con cui Beranek maneggiò i dati oggettivi delle sale, appare piuttosto arbitraria la tecnica di manipolazione dei giudizi soggettivi di qualità; infatti egli



presumibilmente operò qualche selezione dei giudizi ricevuti, e diede un peso rilevante alle proprie opinioni personali.

Nel libro di Beranek, le sale vengono suddivise in 5 classi di qualità:

- A+ ECCELLENTE (p. 90-100)
- A da MOLTO BUONA a ECCELLENTE (p. 90-80)
- B+ da BUONA a MOLTO BUONA (p. 80-70)
- B da SUFFICIENTE a BUONA (p. 70-60)
- C SUFFICIENTE (p. 60-50)

A parte la confusione generata dall' uso di termini descrittivi, che assumono significati diversi a sonda delle culture, appare poco rigorosa la stessa suddivisione in 5 classi, della quale non vengono illustrate dettagliatamente le caratteristiche. Beranek non ha dunque approfondito il nesso fra giudizi soggettivi e scala di valutazione, sebbene egli credesse fermamente nella possibilità di valutare esattamente la qualità acustica, e di assegnare un punteggio ad ogni sala in modo da poterle comparare, punteggio basato direttamente ed esclusivamente su misurazioni oggettive.

Lo schema di valutazione di Beranek prevede la determinazione di numerosi parametri oggettivi, tra i quali compare il tempo di riverberazione, che non è però considerato il più importante; ciò è evidente dal fatto

che le sei sale del gruppo A+ hanno tempi di riverberazione varianti da 1.7 a 2.05 s; quelle del gruppo A vanno da 1.2 a 2 s, e così via. Egli concluse che altre proprietà positive possono compensare tempi di riverberazione non adeguati.

Fra queste egli trovò che la più importante è il tempo di ritardo fra il suono diretto e la prima forte riflessione (come osservato in posti particolarmente "buoni" delle sale). Questo parametro oggettivo fu chiamato "Initial Time Delay Gap" (ITDG, ovvero intervallo temporale di ritardo iniziale).

L'importanza di ITDG è evidente dal fatto che esso risulta inferiore a 20 ms in tutte le sale del gruppo A+, minore di 33 ms nelle sale del gruppo A, minore di 57 ms per le sale del gruppo B; per la sola sala del gruppo C (la Royal Albert Hall di Londra), il valore è di 70 ms.

Tutti questi valori furono calcolati da Beranek a tavolino, mediante la tecnica di costruzione dei raggi sonori con riflessione speculare, sui disegni delle sale. Egli assegnò all'ITDG un rilevante peso nella sua scala di valutazione, 40 punti sui 100 totali disponibili.

Al Tempo di Riverberazione alle Medie Frequenze  $(T_{500}+T_{1k})/2$  venne assegnato un peso di soli 15 punti, uguale al peso del cosiddetto "Rapporto dei Bassi" (Bass Ratio), definito come  $(T_{125}+T_{250})/(T_{500}+T_{1k})$ .

Ciascun parametro oggettivo viene dotato di una scala di comparazione, che fornisce il corrispondente valore del punteggio di valutazione; la scala di comparazione può anche fornire valori negativi del punteggio, che in questo caso sono sottratti dalla somma delle altre grandezze positive.

Esiste anche un punteggio (sempre negativo!) per i difetti acustici più evidenti, quali eco molto pronunciati o eccessivo rumore dell' impianto di ventilazione; ciascuno di questi difetti può produrre fino a 50 punti di penalizzazione, rendendo così la sala "non usabile" (Beranek indica così le sale il cui punteggio complessivo è inferiore a 50).

La connessione fra aspetti oggettivi e soggettivi è la parte del lavoro di Beranek che più ha dato adito a critiche: egli infatti individua numerosi aspetti soggettivi, dai nomi pittoreschi quali Vivezza del Suono (liveness), Pienezza delle Note (fullness), Intimità (intimacy), Calore (warmth), e così via. Alcune di queste qualità soggettive sono univocamente correlate con criteri oggettivi (ad es. l' Intimità è collegata all' ITDG), mentre altre danno luogo a connessioni multiple (ad esempio sia la Vivezza del Suono che la Pienezza delle Note sono correlate con il Tempo di Riverberazione alle Frequenze Intermedie). Questi termini hanno influenzato

per anni i successivi giudizi di qualità, ma lo scarso rigore con cui erano stati definiti, e la più o meno grande interdipendenza fra essi hanno in effetti creato più problemi di quanti ne abbiano risolti.

Al di là della mancanza di rigore nel trattare gli aspetti soggettivi, il lavoro di Beranek rimane il primo tentativo di calcolare la qualità acustica complessiva  $g_k$  di una sala da concerto mediante la somma dei prodotti di parametri oggettivi quantificabili  $f_{ik}$  per i corrispondenti fattori di peso  $w_i$ :

$$g_k = \sum_i w_i \cdot f_{ik} \quad ( 1.5 )$$

Questo approccio potrebbe sembrare simile all'analisi dei fattori oggi comunemente accettata, che verrà illustrata nel capitolo 4; viceversa la differenza è sostanziale, poiché Beranek da' per scontato il numero e la scelta dei parametri oggettivi  $f_{ik}$ , pensa che i pesi siano gli stessi per tutte le sale, e li determina statisticamente sulla base dei dati soggettivi. Nella analisi fattoriale, come si vedrà meglio in seguito, non è predeterminato né il numero, né la scelta dei parametri

oggettivi, si ammette che i pesi  $w_i$  assegnati da osservatori diversi siano pure diversi, e si ricavano tutte le risposte dalla analisi diretta dei risultati dei test soggettivi.

Nonostante i difetti procedurali, la scala di valutazione di Beranek é stata l' unica disponibile fino ad oggi, e pertanto é stata utilizzata in modo estensivo sia per la progettazione di nuove sale, sia per interventi di correzione acustica di sale esistenti.

## 1.6 Ulteriori sviluppi

Quando, nel settembre del 1962, fu inaugurata la Philarmonic Hall, l'installazione iniziale del "Lincoln Center for the Performing Arts di New York", con la direzione orchestrale di Leonard Bernstein, le aspettative acustiche erano rosee. Ma la nuova, elegante sala, accuratamente progettata dal suo consulente acustico in base ai dati raccolti da Beranek, lasciava parecchio a desiderare. Le lusinghiere aspettative di cui era stata fatta oggetto furono ben presto ridimensionate.

In termini non tecnici, fu riscontrata una mancanza di "calore" e di "intimitá". C' erano anche echi ben udibili, provenienti dal retro della sala. Gli stessi musicisti si lamentavano, poiché non riuscivano a sentirsi reciprocamente, e ciò rendeva difficile l' esecuzione di brani orchestrali.

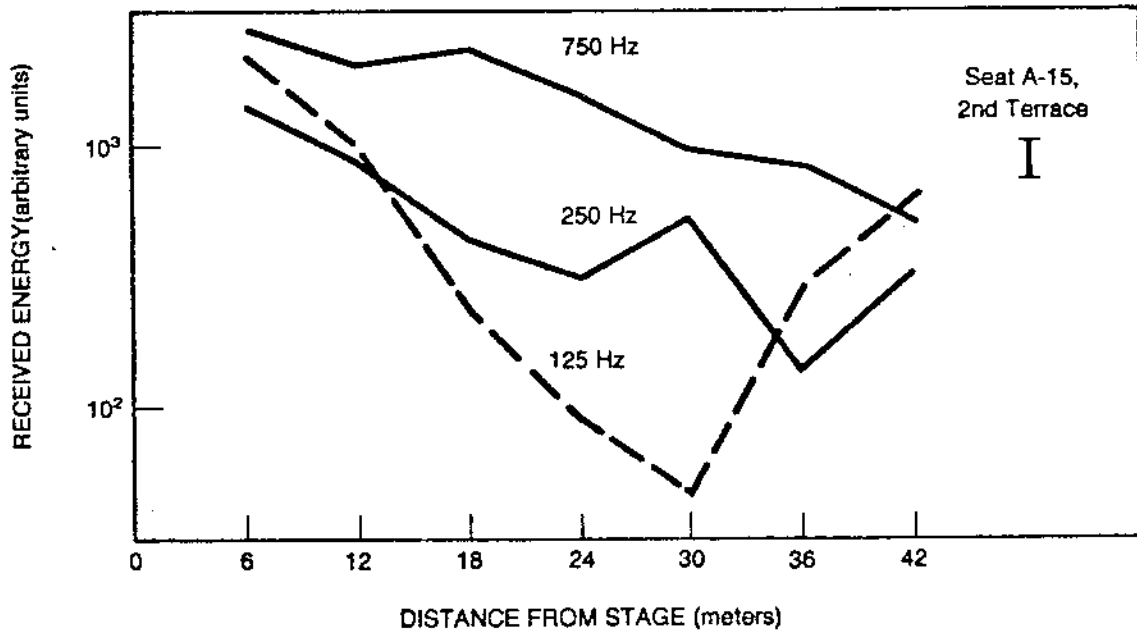
Di fronte a tali critiche, il Lincoln Center corse ai ripari, chiedendo aiuto alla American Telephone & Telegraph Company; essa a sua volta si rivolse ai Bell Laboratories, che nominarono una commissione composta da 5 esperti, capeggiata da Vern Knudsen e della quale faceva parte anche Manfred Schroeder [16].

Dal lavoro della commissione, supportato da misure acustiche estremamente raffinate, emerse come principale

difetto una forte attenuazione delle frequenze più basse in gran parte della platea: questo effetto fu spiegato grazie a esperimenti su modelli in scala effettuati da Meyer e Kuttruff [17], che ne individuarono la causa nei riflettori acustici appesi al soffitto ("nuvole"), espressamente introdotti dal consulente acustico originale per aumentare l'energia sonora delle prime riflessioni, fra l'arrivo dell'onda diretta e l'energia più ritardata del campo riverberante. I riflettori erano troppo piccoli e leggeri per riflettere le basse frequenze, e per di più erano disposti in una schiera perfettamente regolare, tale da produrre un forte assorbimento di energia alla frequenza la cui lunghezza di onda era uguale al passo della schiera, a causa di interferenza distruttiva fra le onde sonore diffratte.

Una seconda causa della attenuazione delle basse frequenze era dovuta, come fu scoperto da Sessler e West [18], all'incidenza radente del suono sul pubblico, che produce fenomeni di diffrazione e di risonanza tali da ridurre progressivamente l'ampiezza del suono diretto al crescere della distanza dalla sorgente. Nella fig. 1.1 è visibile l'energia ricevuta, in unità arbitrarie, in funzione della distanza dalla sorgente, per tre frequenze tipiche: si nota che al centro della sala la frequenza di 125 Hz ha una energia ridotta di un fattore 20 rispetto

alla frequenza di 750 Hz. Sulla destra si nota anche che, nel posto denominato A15, sulla seconda balconata, il divario fra le tre frequenze é notevolmente ridotto: in effetti questo posto era stato indicato come il migliore della sala da parte delle maschere (allievi della Juilliard School of Music).



**Sound energy transmission from stage to main floor for New York's Philharmonic Hall in its early configuration. Note the unusually large attenuation of the lowest octave band (around 125 Hz) in the center of the main floor compared to the higher octave around 750 Hz. At seat A-15, in the second terrace, the variation of energy with frequency was much smaller; in fact, this was judged "the best seat in the house."**

Fig. 1.1: Attenuazione delle principali frequenze con la distanza nella New York's Philharmonic Hall.



Un altro grave difetto venne individuato da Schroeder: tutta l'energia ricevuta dopo l'onda diretta proveniva dall'alto, e pertanto giungeva alle due orecchie praticamente contemporaneamente: ciò produce una sensazione di "distacco" dalla sorgente sonora, anziché sentirsi gradevolmente "avvolti" dalla musica. Schroeder intravvide così che l'importanza attribuita da Beranek alla prima riflessione sonora era effettiva, ma soltanto per le riflessioni laterali, mentre le riflessioni provenienti dall'alto non contribuiscono alla qualità acustica.

La storia di questo fallimento è stata riportata perché da esso scaturirono nuove, importanti linee di ricerca, e perché essa mise subito in luce i limiti delle teorie di Beranek. Ciò nonostante, molti credettero di poter correggere i risultati precedenti in base alle nuove scoperte, per cui la scala di valutazione a punti rimase nell'uso.

In seguito vennero effettuati a più riprese lavori di ristrutturazione nella Philharmonic Hall, comprensivi addirittura di un sistema elettro-acustico di controllo della riverberazione. Infine essa fu ribattezzata Avery Fisher Hall, non essendo oramai più nemmeno parente (dal punto di vista acustico) della sala originale.

## 1.7 Le teorie odierne

Negli ultimi 20 anni sono stati compiuti notevoli progressi nella comprensione del meccanismo uditivo: essi hanno visto da un lato lo sviluppo di raffinate tecniche psicosoggettive, per la analisi statistica dei giudizi di qualità; dall' altro lato sono state messe a punto tecniche molto sofisticate per la determinazione delle caratteristiche acustiche degli ambienti chiusi, facendo ricorso ad un approccio multidisciplinare che ha consentito di sfruttare risultati già acquisiti in altre discipline scientifiche.

Riguardo alla valutazione soggettiva, è stata determinante la possibilità di riprodurre in un ambiente di prova i campi acustici presenti in numerose sale esistenti nel mondo, poiché in questo modo vengono annullati i tempi del confronto, ed è possibile evidenziare differenze anche molto lievi. Uno dei primi tentativi di questo tipo è stato compiuto presso la Università di Gottingen [19], tramite una disposizione semisferica di altoparlanti in camera anecoica: in questo modo è stato possibile simulare, oltre al suono diretto, una combinazione di 13 riflessioni, con intensità, ritardo e direzione variabili.

Il confronto di campi acustici reali (non

sintetizzati) è stato reso possibile dalla tecnica della registrazione con testa artificiale, sviluppata dai gruppi di Gottingen e Berlino [20,21]: si tratta di registrare in un certo numero di posti di ogni sala un brano musicale, ottenuto usualmente dalla riproduzione su un unico altoparlante di un segnale originale anecoico, attraverso due microfoni collocati al posto dei timpani di una testa artificiale. La registrazione ottenuta viene poi fatta riascoltare in modo opportuno, onde riprodurre esattamente la sensazione sonora della sala originale.

La tecnica di riproduzione con cuffia ha creato lievi problemi, poiché alcuni fenomeni di spazialità del campo acustico ne risultano distorti; è stata pertanto messa a punto una tecnica di riproduzione in camera anecoica facente uso di soli due altoparlanti, alimentati con i segnali originali della testa artificiale sovrapposti a segnali di correzione, in modo da annullare il segnale spurio inviato da ogni altoparlante sull' orecchio opposto a quello voluto [22]. Grazie a questa tecnica sono state effettuate centinaia di giudizi comparativi (basati cioè sul semplice giudizio di preferenza fra una coppia di presentazioni sonore): i risultati sono dunque privi dello effetto di distorsione semantica implicito nell' uso di termini coloriti ma poco chiari quali appunto "Intimità", "Calore", "Vivezza", e rispondono ai requisiti statistici

necessari all' applicazione dell' analisi fattoriale.

Grazie a questi test psicosoggettivi è stato possibile creare un legame chiaro e sufficientemente ripetibile fra i numerosi descrittori oggettivi del campo acustico e la preferenza globale, e sono stati definiti i valori ottimali dei parametri fisici indipendenti. E' stato anche possibile calcolare il grado di correlazione fra i parametri fisici stessi, che sono risultati fortemente in soprannumero rispetto alle esigenze effettive: in effetti, assegnato il valore di 4 o 5 di essi, tutti gli altri assumono per forza valori definiti dai legami che intercorrono fra essi.

Sono stati definite, ad esempio, numerose modalità di valutazione del tempo di riverberazione: basato sulla estrapolazione di diversi segmenti della curva di decadimento, filtrato in ottave o in terzi d' ottava, misurato con tecniche di rumore stazionario o impulsivo. L' analisi psicosoggettiva ha consentito di estrarre da essi solo quelli veramente significativi.

Lo stesso perfezionamento delle tecniche di misura ha suggerito la creazione di numerosi nuovi descrittori: in particolare i progressi hanno riguardato le tecniche di determinazione della risposta d' impulso dell' ambiente, originariamente definita come il segnale di pressione sonora  $p(t)$  ricevuto in un punto della sala in seguito ad

un impulso positivo di pressione in un altro punto (tipicamente l'esplosione della carica a salve di una pistola). Le tecniche di registrazione e visualizzazione digitale hanno infatti consentito di integrare l'energia sonora ricevuta in intervalli di tempo arbitrari, e da questa possibilità è scaturita la individuazione di rapporti fra l'energia ricevuta immediatamente dopo la onda diretta (considerata usualmente benefica) e la successiva energia riverberante. Un tipico esempio di descrittore di questo tipo è l'indice di Definizione D (Deutlichkeit), così definito da Thiele [23]:

$$D = \frac{\int_0^{50 \text{ ms}} p^e(t) dt}{\int_0^{\infty} p^e(t) dt} \quad ( 1.6 )$$

in cui  $p(t)$  è la pressione sonora ricevuta in risposta del suono impulsivo. Strettamente legato alla definizione di D è anche il criterio R proposto da Beranek e Schultz [24]:

$$R = 10 \cdot \log \frac{\int_0^{\infty} p^E(t) dt}{50 \text{ ms}} = 10 \cdot \log \frac{1-D}{D} \quad (1.7)$$

Secondo invece il gruppo di Dresda [25], il tempo limite di integrazione per l'energia utile deve essere esteso a 80 ms; viene così definito l'Indice di Chiarezza C (Klarheitmass), che vale:

$$C = 10 \cdot \log \frac{\int_0^{80 \text{ ms}} p^E(t) dt}{\int_{80 \text{ ms}}^{\infty} p^E(t) dt} \quad (1.8)$$

L'estensione del limite a 80 ms discende dal fatto che per la musica è accettabile un certo grado di sovrapposizione fra le note, al contrario che per la parola, e che il transitorio della maggior parte degli strumenti musicali supera i 100 ms.

Questi limiti netti non paiono tuttavia giustificabili

a livello psicosoggettivo, ed é stata pertanto definita una altra grandezza, che utilizza il concetto di momento del primo ordine: é l' Istante Baricentrico dell' Energia di Cremer e Kurer [26], indicato con  $t_s$  (Schwerpunktzeit), cosí definito:

$$t_s = \frac{\int_0^{\infty} t \cdot p^e(t) dt}{\int_0^{\infty} p^e(t) dt} \quad ( 1.9 )$$

Tutti i parametri fisici sopra descritti, basati sulla determinazione della risposta d' impulso, sono risultati ben correlati fra loro, ed hanno mostrato pure un buon grado di correlazione con il criterio dell' ITDG di Beranek (che era calcolato in base a considerazioni geometriche, non misurato).

La disponibilitá della tecnica di registrazione binaurale ha poi fatto sí che venissero individuati anche descrittori della spazialitá del campo sonoro, tra i quali vanno senz' altro ricordati la Correlazione Mutua Inter-aurale di Schroeder [27], l' Impressione Spaziale di Barron e Marshall [28] (ottenuta da un criterio della frazione energetica simile ai precedenti, ma nel quale il

numeratore è pesato dal coseno dell' angolo fra la direzione d' arrivo dell' energia e la congiungente i timpani), e l' Indice di Impressione della Sala (Raumeindrucksmaß) di Reichardt e Lehmann [29], ottenuto da un rapporto fra le energie ricevute da un microfono omnidirezionale ed un microfono direttivo puntato verso la sorgente. In modo analogo Jordan [30] ha suggerito un rapporto fra l' energia ricevuta da un microfono dipolare ed uno omnidirezionale, indicato Efficienza Laterale LE.

Di tutti questi indici di spazialità, l' unico effettivamente misurabile direttamente dalle registrazioni binaurali con testa artificiale è il primo, cioè la Correlazione Mutua Inter-aurale di Schroeder, definito come il valore massimo della correlazione mutua dei due segnali ottenuti dai microfoni aurali.

Altri autori hanno perfezionato la definizione di questo parametro fisico, proponendo di valutare la correlazione mutua non già dei segnali musicali, ma delle risposte d' impulso misurate nei due microfoni auricolari; secondo Schroeder le risposte d' impulso vanno troncate dopo un intervallo di 50 ms dall' arrivo dell' onda diretta, mentre secondo Ando [31] conviene utilizzare lo intervallo temporale massimo consentito dalla strumentazione usata. Si è poi visto che occorre tenere conto solo dell' intervallo temporale compreso fra -1 e +1



s della funzione di correlazione mutua, poiché in ogni caso il tempo di ritardo fra l' arrivo di un suono su un orecchio rispetto all' altro non supera mai 0.75 s. Ando ha infine mostrato come i valori della coerenza mutua inter-aurale dipendano leggermente dal brano musicale adottato [32].

Le tecniche di misura di questi parametri di spazialità del campo acustico verranno illustrate più in dettaglio nel cap. 2; comunque le indagini psicosoggettive hanno mostrato un elevato grado di correlazione fra tutti essi, unito ad una buona significatività sui giudizi di qualità.

Lo scopo di tutte queste ricerche è stato sinora la determinazione dei valori ottimali dei vari parametri, determinazione che può considerarsi oramai raggiunta [33]. Solo recentemente è stato nuovamente affrontato lo ambizioso progetto di Beranek, la creazione cioè di una procedura di valutazione oggettiva della qualità acustica, indipendente da test soggettivi contingenti anche se basata su un gran numero di risultati di questo tipo.

## 1.8 La proposta di Ando

Yoichi Ando iniziò a collaborare con gli studiosi del gruppo di Gottingen nel 1969, quando intraprese sotto la direzione di Manfred Schroeder lo studio psicosoggettivo comparato dei campi acustici registrati con la tecnica della testa artificiale [31]: le registrazioni provenivano da 20 sale diverse, e la tecnica dell'analisi fattoriale applicata ai giudizi di preferenza consentì di definire uno **spazio delle preferenze**, dotato di tre dimensioni principali.

All'interno di questo spazio potevano essere collocati i principali parametri oggettivi misurabili: ad esempio la coerenza mutua inter-aurale risultò situata quasi in posizione antitetica sull'asse della preferenza generale, con un coeff. di correlazione  $-0.74$  rispetto alla preferenza soggettiva; viceversa il tempo di riverberazione risultò correlato in modo positivo ( $+0.76$ ) con la preferenza soggettiva. Schroeder concluse asserendo che per una buona acustica è necessario avere un tempo di riverberazione sufficientemente lungo, ed una coerenza inter-aurale sufficientemente bassa.

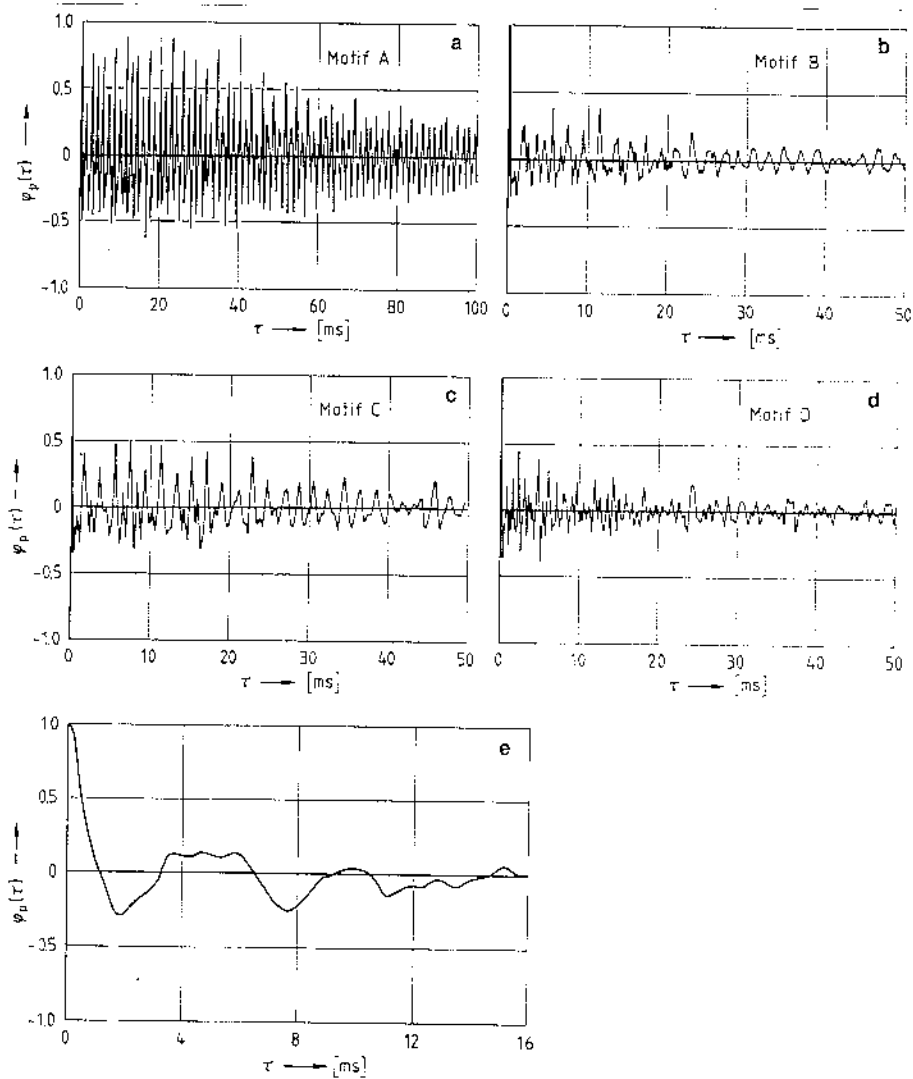
Ando sviluppò ulteriormente le analisi di questo tipo, poiché i risultati ottenuti da Schroeder dipendevano dalle particolari presentazioni musicali sottoposte a giudizio:

se infatti tutte le presentazioni fossero state registrate con un tempo di riverberazione troppo lungo, esso sarebbe risultato correlato in modo **negativo** con la preferenza, ed in teoria si sarebbe dovuto attendere un analogo risultato per ogni altro criterio oggettivo.

Nel corso di campagne di ricerca svolte sia presso la Università di Gottingen, sia presso l'Università di Kobe in Giappone, Ando utilizzò le tecniche di presentazione in camera anecoica per studiare l'influenza sui giudizi di preferenza di numerosi descrittori fisici: innanzi tutto il Tempo di Ritardo della Prima Riflessione [32], che fu messo in relazione al tipo di brano musicale eseguito. Si consideri la funzione normalizzata di autocorrelazione del segnale musicale anecoico di partenza, definita dalla:

$$A_c(t') = \frac{\lim_{T \rightarrow \infty} \frac{1}{2 \cdot T} \cdot \int_{-T}^{+T} p(t) \cdot p(t+t') \cdot dt}{\lim_{T \rightarrow \infty} \frac{1}{2 \cdot T} \cdot \int_{-T}^{+T} p^2(t) \cdot dt} \quad ( 1.10 )$$

nella quale  $p(t)$  è la pressione sonora istanea filtrata in base alla sensibilità media dell'orecchio umano. Questa funzione si smorza in valore assoluto al crescere del tempo di sfasamento  $t'$ : si può supporre che essa sia



Sound source	Title	Composer	$\tau_c$ [ms] <sup>a</sup>
Music A	Royal Pavane	Gibbons	127 (127)
Music B	Sinfonietta, Opus 48; IV movement	Malcolm Arnold	43 (35)
Music C	Symphony No. 102 in B flat major; II movement; Adagio	Haydn	(65)
Music D	Siegfried Idyll; Bar 322	Wagner	(40)
Music E	Symphony in C major, K-V no. 551, Jupiter IV movement; Molto Allegro	Mozart	38
Speech S	Poem read by a female	D. Kunikita	10 (12) <sup>b</sup>

Fig. 1.2: Caratteristiche di autocorrelazione di diversi segnali musicali.

involupata da una funzione di smorzamento esponenziale. Ando descrive la rapidità dello smorzamento con il tempo dopo il quale l' involuppo del valore assoluto della autocorrelazione si è ridotto al valore 0.1 (il picco centrale, per  $t'=0$ , vale sempre 1, poiché la funzione è normalizzata). Questo tempo  $t_e$  viene indicato **Durata Effettiva dell' Autocorrelazione** del segnale musicale, ed è un indice della ripetitività del segnale stesso. Tanto più la funzione di autocorrelazione si smorza rapidamente, tanto più il brano musicale ha un ritmo rapido e note poco a lungo sostenute; si può dire che la funzione di autocorrelazione misura la **riverberazione intrinseca** della musica.

In fig. 1.2 sono visibili le funzioni di autocorrelazione di 4 tipici brani musicali e del parlato, e sono riportate le corrispondenti durate effettive  $t_e$ . È chiaro dunque che ogni brano musicale ha una diversa ripetitività.

Dall' analisi psicosoggettiva è risultato che il tempo di ritardo preferito per la prima riflessione è pari alla durata effettiva della funzione di autocorrelazione, come viene illustrato dalla fig. 1.3, se l' ampiezza della riflessione è pari a quella dell' onda diretta.

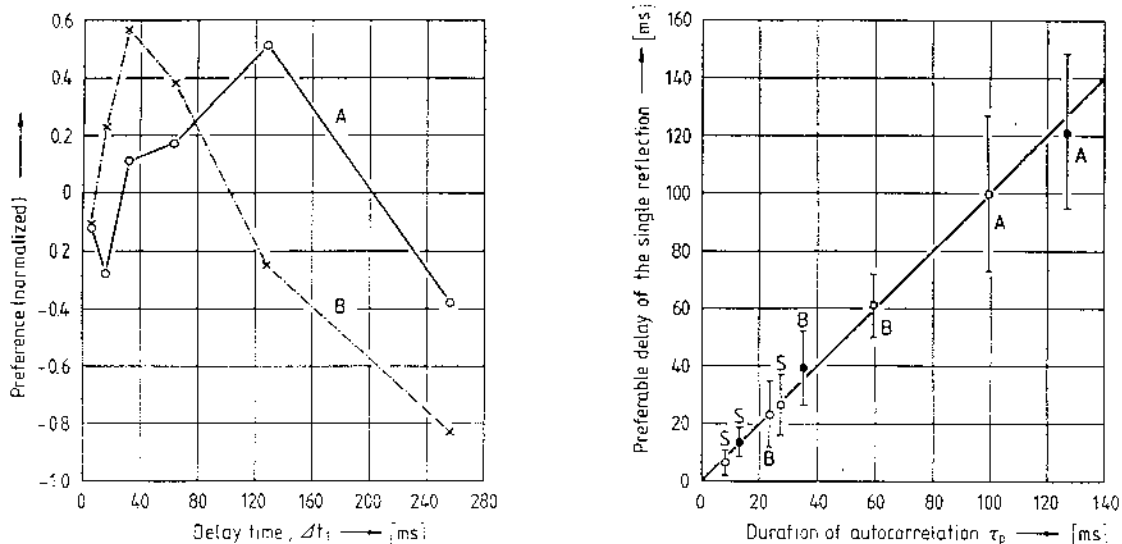


Fig. 1.3: Legame fra durata effettiva dell' autocorrelazione e tempo di ritardo preferito della prima riflessione.

Una successiva indagine mostrò che il tempo di ritardo preferito per la seconda riflessione è pari a 1.8 volte il tempo di ritardo preferito per la prima riflessione [34].

Andò studiato poi la direzione d' arrivo della prima riflessione, concludendo che il suo valore ottimale non dipende dal tipo di musica, ma è semplicemente quello che rende minima la correlazione mutua inter-aurale [35].

L' ampiezza preferita della prima riflessione risultò essere circa uguale a quella dell' onda diretta, ma questo dato può essere interpretato come quell' ampiezza che

consente di rendere minima la coerenza interaurale, compatibilmente con il mantenimento della localizzazione della sorgente sonora; Ando concluse dunque che la ampiezza della riflessione non é di per se un parametro indipendente, ma va tenuto presente per valutare la diminuzione di preferenza dovuta al mancato ottenimento del valore ottimale degli altri parametri [36]. In particolare il tempo di ritardo preferito per la prima riflessione é influenzato dall' ampiezza della riflessione stessa, ed é pari a quel tempo dopo il quale l' involuppo della funzione di autocorrelazione del segnale di partenza é pari ad  $1/10$  dell' ampiezza relativa  $A$  della onda riflessa rispetto all' onda diretta.

Anche la composizione spettrale dell' energia ricevuta per riflessione fu studiata da Ando [37], con la conclusione che qualunque scostamento dallo spettro della onda diretta produce una diminuzione della preferenza soggettiva: le pareti perfettamente speculari sono dunque le sole a garantire una funzione di trasferimento priva di picchi e di attenuazioni.

Le indagini suddette furono svolte mantenendo tutti i parametri tranne quello studiato costanti, al valore preferito. In seguito furono presi in considerazione coppie di parametri, per saggiare la loro mutua indipendenza sul giudizio di preferenza.

Ando studiò ad esempio l'effetto del successivo campo riverberante, assieme al tempo di ritardo delle riflessioni iniziali: mediante un complesso sistema di simulazione acustica mediante calcolatore, furono riprodotti i campi acustici della Symphony Hall di Boston, con diversi brani musicali [39]. Risultò che il tempo di riverberazione soggettivo  $T_{sub}$  (tempo di riverberazione valutato tramite misure con testa artificiale) era un parametro del tutto indipendente dal tempo di ritardo della prima riflessione, e poteva anch'esso venire correlato con la durata effettiva della funzione di autocorrelazione del segnale musicale scelto, come mostrato dalla fig. 1.4: il legame è del tipo  $[T_{sub}]_p = 23 \cdot t_e$ .

Fu poi la volta della coppia Livello d'Ascolto - Correlazione Mutua Inter-Aurale [39], che mostrò pure la indipendenza di questi due parametri, nonché consentì di ottenere il livello preferito di ascolto, pari a circa 79 - 80 dB<sub>A</sub>.

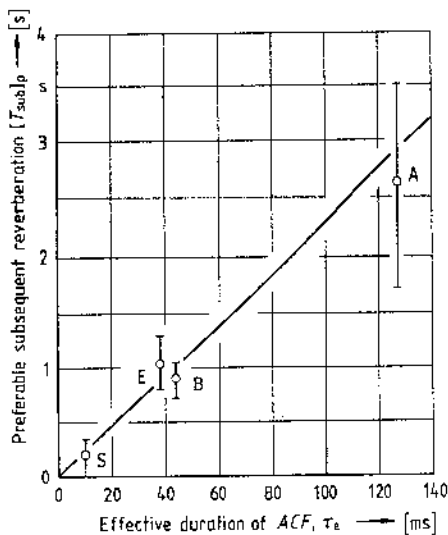


Fig. 1.4: Legame fra durata effettiva dell'autocorrelazione e tempo di riverberazione preferito.



Infine Ando mise a confronto la Cross-Correlazione Inter-Aurale con il Tempo di Riverberazione Susseguente, concludendo ancora una volta che i parametri erano indipendenti, e che il valore preferito della Cross-Correlazione Inter-Aurale (IACC) è il minimo valore che consenta ancora la localizzazione della sorgente sonora [40].

Contemporaneamente altri studiosi affrontavano gli stessi argomenti, giungendo a risultati molto ben confrontabili, anche se il materiale umano oggetto dei tests era di provenienza estremamente diversificata [41..43].

Ando pertanto ha concluso che sono ormai disponibili dati sufficienti per la creazione di una scala globale della preferenza, ottenibile da una sovrapposizione lineare delle scale di preferenza ottenute per i singoli parametri indipendenti, dopo averne ridotto le unità ad un uguale peso mediante la tecnica dei confronti a coppie [44].

La proposta di questa scala della preferenza è molto recente [45], essendo del 1985 la pubblicazione del libro "Concert Hall Acoustic" nel quale vengono raccolti i risultati di tutte le ricerche citate, unite ad una trattazione globale del fenomeno di trasmissione della informazione sonora dalla sorgente fino alla mente dello

ascoltatore, attraverso i meccanismi uditivi ed i trasmettitori nervosi.

Ando conclude che si possono considerare alla fine solo 4 parametri indipendenti: il tempo di ritardo della prima riflessione (l' ITDG di Beranek), il livello di ascolto, il tempo di riverberazione soggettivo e la correlazione mutua inter-aurale.

I primi tre parametri vengono considerati globalmente come criteri temporali-monofonici, mentre il quarto è un criterio spaziale-binaurale: i primi hanno una scala di valutazione della preferenza nella quale compare come variabile il logaritmo del rapporto fra il valore attuale del parametro ed il suo corrispondente valore ottimale, mentre l' ultimo è dotato di una scala di preferenza funzione direttamente del valore assoluto del parametro fisico. Ad esempio il livello di ascolto viene rapportato al valore ottimale tramite la differenza in dB, mentre per il tempo di ritardo si considera come variabile il logaritmo del rapporto fra il valore effettivo e quello teorico preferibile per il tipo di musica considerato. Analogamente anche del tempo di riverberazione viene calcolato il logaritmo del rapporto con il valore ideale per il brano musicale scelto, mentre la correlazione mutua inter-aurale viene considerata già di per sé un parametro adimensionale, che non deve essere rapportata ad un valore

ottimale ma semplicemente resa la piú bassa possibile.

Dopo questa normalizzazione ai valori preferiti, chiamando  $x_i$  il valore attuale del parametro  $i$ -esimo, calcolato come indicato, tenendo conto del tipo di musica in esame, si può esprimere il valore complessivo della preferenza soggettiva come somma pesata dei parametri normalizzati stessi, elevati ad un esponente tale da rendere consistente l'unità di misura della scala di preferenza così costruita:

$$S_t = - \sum_i w_i \cdot |x_i|^{a/a} \quad (i = 1,4) \quad (1.11)$$

nella quale  $S_t$  è il valore complessivo della preferenza, ottenuto dalla somma dei 4 valori parziali relativi ai 4 parametri fisici, e  $w_i$  sono i coefficienti di peso dello scostamento dal valore ottimale, definiti in modo da garantire la corretta importanza relativa dei parametri fisici.

Nel cap. 4 verranno illustrate le tecniche con cui Ando ed altri studiosi hanno determinato, in base alle misure psicometriche, i coefficienti  $w_i$  necessari per il calcolo dell'Indice di Preferenza Globale.

Il valore di  $S_0$ , così definito risulta sempre negativo, essendo il valore zero corrispondente alla condizione di massima preferenza. L' esponente è pari a  $2/3$  per tutti quattro i parametri individuati da Ando, ed in questo fatto è probabilmente insita qualche approssimazione, sebbene i dati sperimentali combacino piuttosto bene con le curve ottenute dalla relazione esponenziale riportata.

Lo stesso Ando ha poi mostrato come è possibile calcolare teoricamente i valori dei parametri fisici quando il teatro è ancora in fase di progettazione, e ne ha dedotto utili regole per massimizzare il numero di posti con buone condizioni d'ascolto di una sala; queste regole coincidono in gran parte con quanto è stato ottenuto da altri studiosi, in seguito alle loro esperienze dirette di progettazione, ed ai successi e fallimenti conseguenti [44]. Sebbene il principale scopo del lavoro di Ando fosse la ricerca di un metodo che consentisse di evitare clamorosi errori, del tipo di quello citato, relativo alla New York Philharmonic Hall, egli ha anche proposto un sistema di valutazione oggettiva della qualità acustica, basato sul diagramma a blocchi visibile in fig. 5.1: tramite esso è teoricamente possibile analizzare le sale già esistenti, e confrontare dunque con giudizi soggettivi diretti i risultati ottenuti dalla misura [45].

La metodologia proposta da Ando è stata posta in essere nel corso del presente lavoro, e verrà descritta nel cap. 5; nel cap. 6 vengono invece riportati i risultati ottenuti tramite esso in alcune sale italiane. Se i risultati così ottenuti si dimostreranno ripetibili e confrontabili con quelli di altri gruppi di ricerca, sarà possibile standardizzare la procedura di valutazione di qualità acustica relativa alle sale da concerto, così come è stato fatto con successo nel campo della comprensibilità del parlato con la definizione dello Indice di Trasmissione della Parola (S.T.I., Speech Transmission Index) [46].