

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

CAP. 1 - PREMESSA E CENNI STORICI	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
CAP. 2 - TECNICHE DI MISURA	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

CAP. 3 - TECNICHE DI PREVISIONE	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
CAP. 4 - VALUTAZIONI SOGGETTIVE	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
CAP. 5 - PROCEDURA DI MISURA E VALUTAZIONE	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
CAP. 6 - MISURE IN SALE ESISTENTI	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
CAP. 7 - CONCLUSIONI	p. 326
7.1 Discussione dei risultati	p. 327
7.2 Problemi irrisolti	p. 335
6.3 Possibili sviluppi futuri	p. 339
APPENDICI :	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^a 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 β 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.

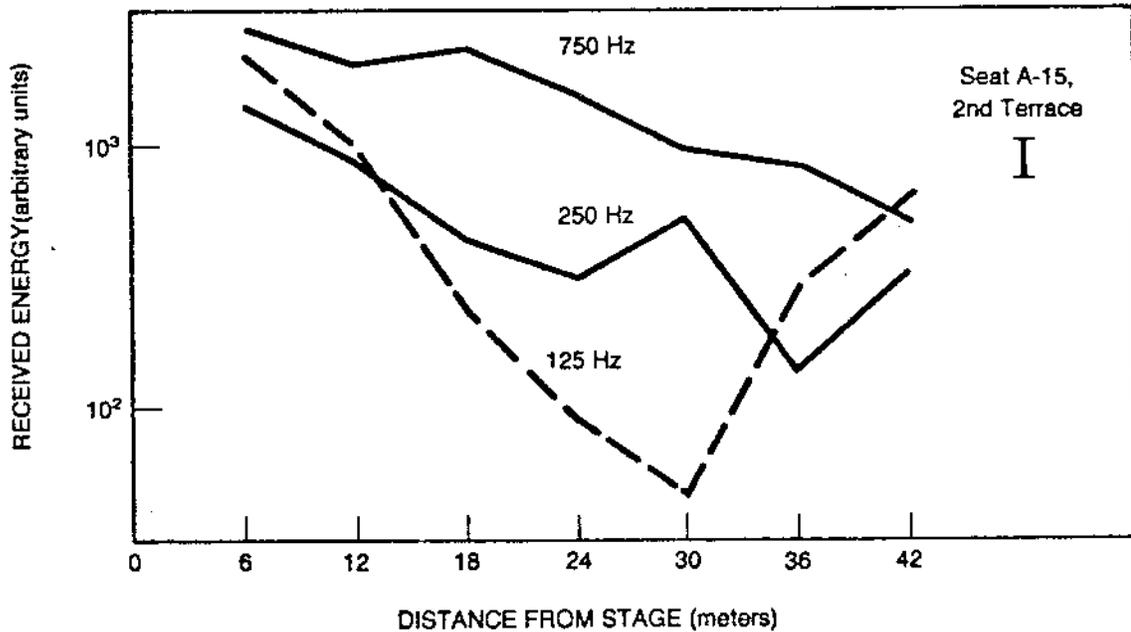
Di fronte a tali critiche, il Lincoln Center corse ai ripari, chiedendo aiuto alla American Telephone & Telegraph Company; essa a sua volta si rivolse ai Bell Laboratories, che nominarono una commissione composta da 5 esperti, capeggiata da Vern Knudsen e della quale faceva parte anche Manfred Schroeder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

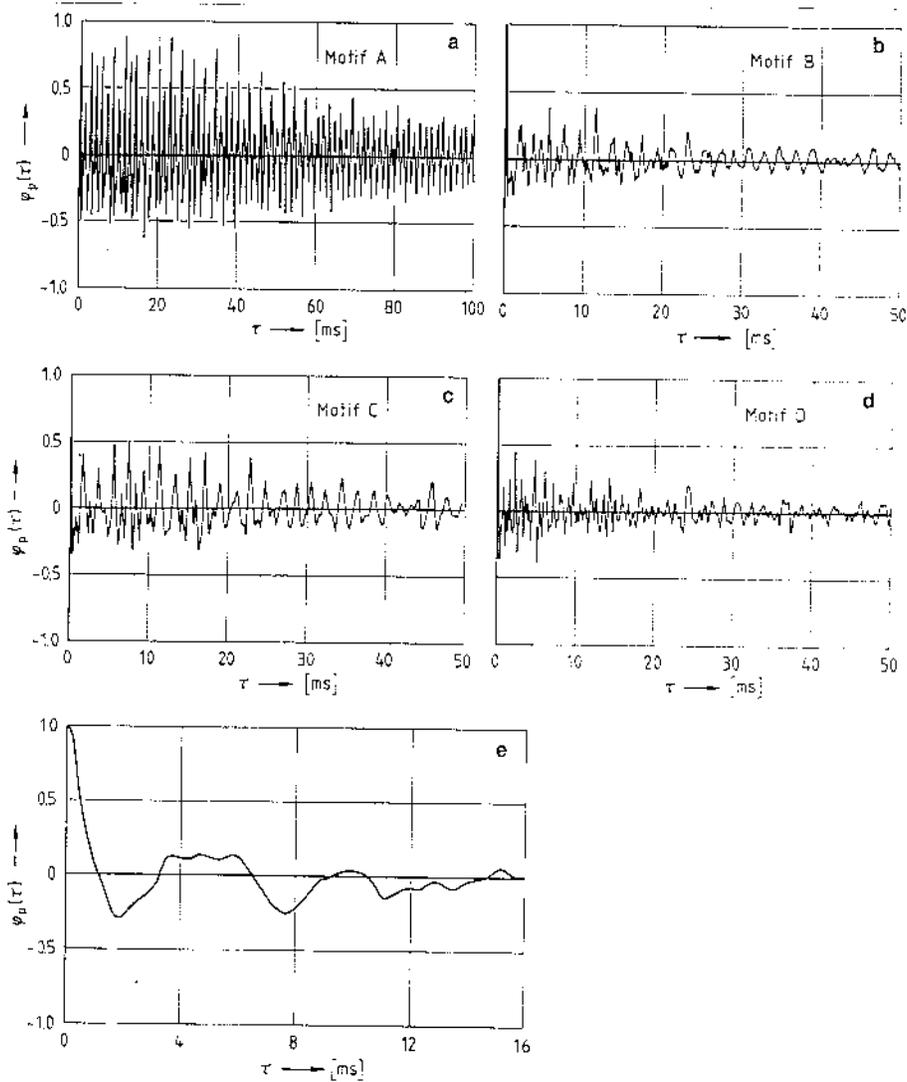
Ando sviluppò ulteriormente le analisi di questo tipo, poiché i risultati ottenuti da Schroeder dipendevano dalle particolari presentazioni musicali sottoposte a giudizio:

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	τ_c [ms] ^a
Music A	Royal Pavane	Gibbons	127 (127)
Music B	Sinfonietta, Opus 48; IV movement Allegro con brio	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) ^b

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.

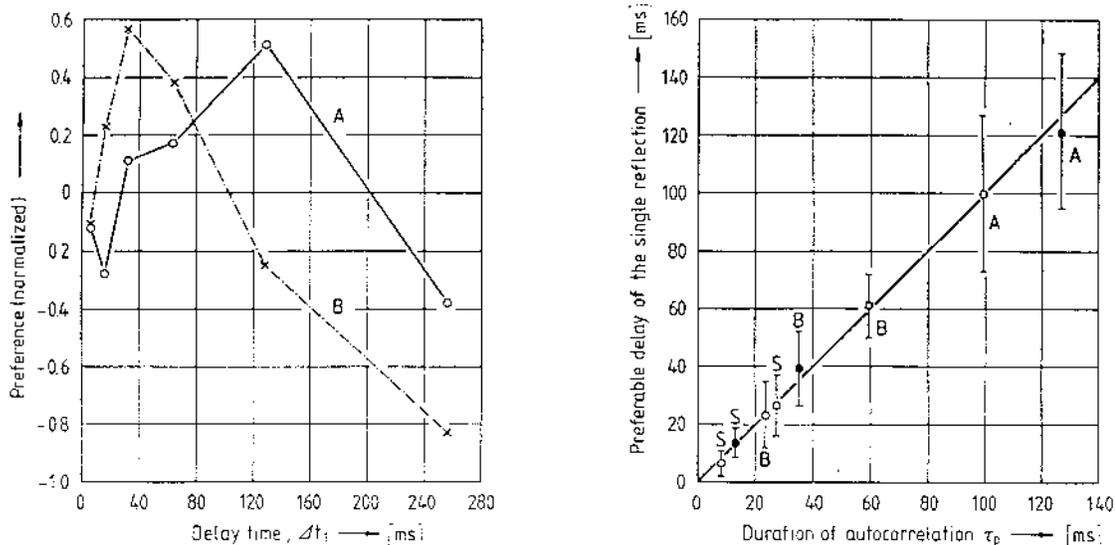


Fig. 1.3: Legame fra durata effettiva dell' autocorrelazione e tempo di ritardo preferito della prima riflessione.

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_A.

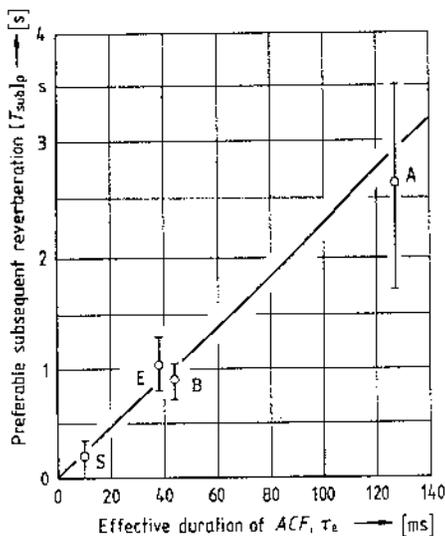


Fig. 1.4: Legame fra durata effettiva dell'autocorrelazione e tempo di riverberazione preferito.

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].

2° CAPITOLO

TECNICHE DI MISURA

2.1 Le misure acustiche

Sono state descritte nel capitolo precedente le teorie sviluppate sino ad oggi per la descrizione e la valutazione del campo acustico negli ambienti chiusi.

L'evoluzione di queste teorie è intimamente legata ai progressi che si sono succeduti nelle tecniche di misurazione delle grandezze studiate, cosicché è ora opportuno passare brevemente in rassegna, per ognuna di esse, quali strumenti e quali procedure possono venire impiegati.

E' bene anzitutto suddividere le misure in 4 grandi settori, legati a 4 distinti aspetti del fenomeno sonoro:

- 1) Misure del livello sonoro
- 2) Misure del tempo di riverberazione
- 3) Misure della distribuzione temporale dell'energia sonora
- 4) Misure della spazialità del campo acustico.

Questa divisione ripercorre, anche in senso storico, il successivo raffinarsi delle tecniche e delle teorie.

Infatti prima di Sabine, cioè nel secolo scorso, era possibile misurare soltanto il livello sonoro in vari punti della sala, ed in modo piuttosto approssimativo.

Le misure del tempo di riverberazione sono state rese

possibili dal registratore scrivente di livello, mentre le misure della distribuzione temporale di energia sonora richiedono un oscillografo, che è stato impiegato solo a partire dagli anni '30.

Le misure del grado di spazialità del campo acustico sono infine state possibili solo di recente, quando sono divenute disponibili raffinate tecniche digitali, e microfoni dalle particolari caratteristiche direttive.

Nei successivi paragrafi verranno dunque esaminate tutte le possibili tecniche di misura sino ad oggi sviluppate.

2.2 Misure di livello

La misura del livello sonoro é basata sull' uso di trasduttori acustico-elettrici, solitamente rappresentati da microfoni: si tratta di apparecchi ove una sottile membrana viene messa in movimento dalle fluttuazioni di pressione dell' aria, e questo movimento produce, secondo diversi meccanismi, un segnale elettrico direttamente proporzionale alla pressione istantanea $p'(t)$ del campo acustico.

Esistono vari tipi di microfoni, basati su differenti dispositivi per tradurre il movimento della membrana in segnale elettrico. Citiamo qui brevemente i tipi dinamici, piezoelettrici, a carbone, a condensatore. Questi ultimi sono oggi largamente i piú usati per le misure acustiche, poiché forniscono la migliore linearità in frequenza, ed hanno una calibratura costante nel tempo.

Il funzionamento dei microfoni a condensatore é molto semplice: la membrana é ricoperta di un sottile strato metallico, e si trova in prossimitá di una lamina rigida che funge da seconda armatura. Viene mantenuta una differenza di potenziale fra le due armature, mediante un apposito alimentatore. Quando la membrana si muove, varia la capacitá del condensatore, e pertanto circola una corrente che tende a riportare la differenza di potenziale

al valore preesistente. E' questa piccola corrente che, amplificata, produce il segnale elettrico proporzionale alla deflessione della membrana, e dunque alla pressione sonora. Questo tipo di microfoni manifesta una grande linearità non solo rispetto alla frequenza, ma anche rispetto all' ampiezza del segnale acustico, poiché il fattore di proporzionalità fra corrente e pressione rimane costante con variazioni di pressione sonora enormi.

Il segnale proveniente dal microfono rappresenta il valore istantaneo della pressione sonora, della quale viene calcolato il valore medio efficace mediante un circuito elettronico di pesatura R.M.S. (Root Mean Squared). L' espressione del valore medio efficace è la seguente:

$$p_{me} = \sqrt{\frac{1}{T} \cdot \int_0^T p^2(t) \cdot dt} \quad (2.1)$$

Anche il valore pesato R.M.S. tende però ad essere troppo variabile nel tempo, se il tempo T di integrazione è ridotto; si adottano dunque circuiti con costanti di tempo relativamente elevate, dell' ordine di 0.35 secondi

("fast") e di 1 secondo ("slow"). In questo modo è possibile avere una indicazione su uno strumento a lancetta, che altrimenti non sarebbe in grado di seguire il rapido succedersi della fluttuazione. L'uso della costante di tempo più lunga diviene indispensabile quando il segnale sonoro è molto variabile (musica o parlato).

In genere si esegue una mappatura del livello sonoro in una sala azionando una sorgente di rumore di potenza costante, e muovendosi con l'apparato di misura (fonometro) nei vari punti dell'ambiente.

Il livello sonoro non viene misurato direttamente dal valore della pressione sonora, poiché essa varia in intervalli troppo ampi; poiché l'orecchio umano risponde almeno approssimativamente alla legge logaritmica di Fechner (come in pratica gli altri sensi umani), si adotta una scala logaritmica, definita dalla relazione:

$$L_p = 20 \cdot \log \left(\frac{\bar{p}}{\bar{p}_{117}} \right) \quad (2.2)$$

ove \bar{p}_{117} è il valore di soglia a 1000 Hz, cioè la più

piccola pressione sonora in grado di essere avvertita dall' orecchio umano medio; essa vale $20 \cdot 10^{-6}$ Pascal.

Il livello di pressione sonora L_p è dunque valutato in scala logaritmica, espresso quindi da un numero privo di dimensioni: si indica questo apponendo il simbolo dB (decibel) dopo il valore numerico del livello stesso.

E' possibile ricondurre la sensibilità dello strumento, rispetto alle diverse frequenze, alla sensibilità media dell' orecchio umano : ciò avviene mediante un apposito circuito di pesatura elettronico, chiamato "filtro A", incorporato nella maggior parte dei fonometri. Nella fig. 2.1 è visibile la curva di risposta in frequenza del filtro A standardizzato. Se la misura è stata eseguita con il filtro A, il livello viene espresso in dB(A) (decibel-A).

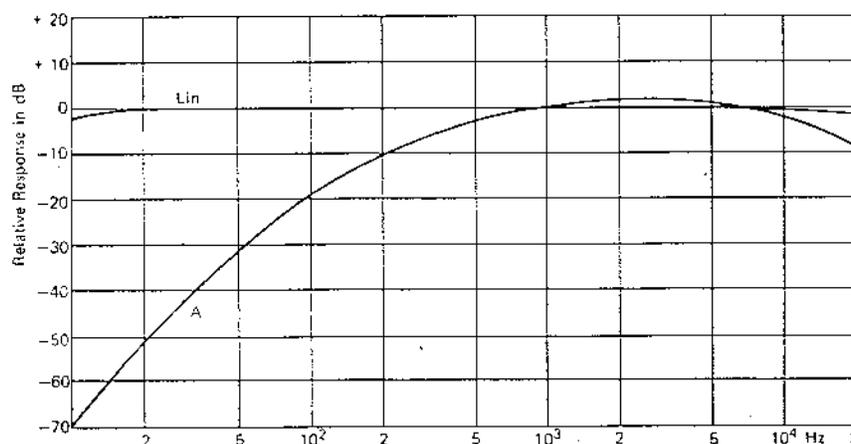


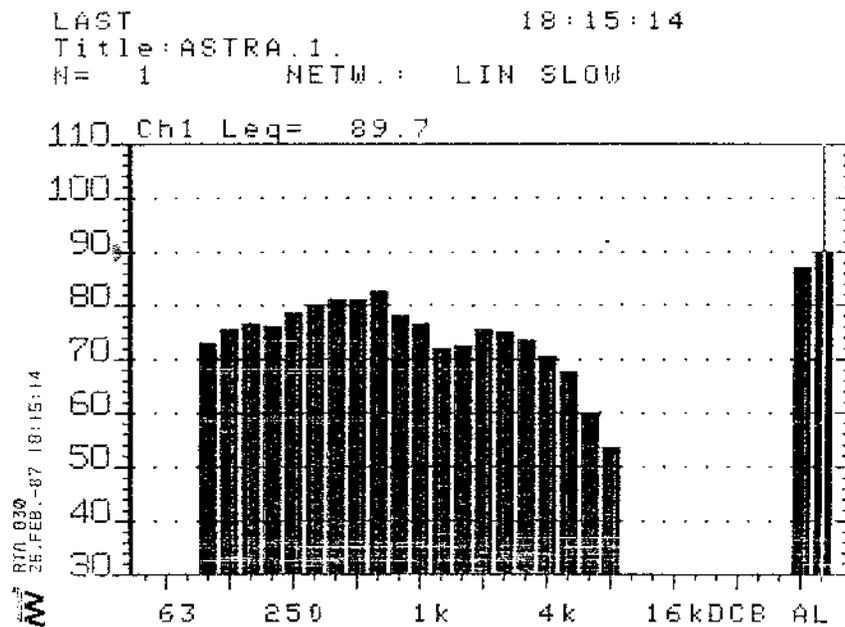
Fig. 2.1: Curva di ponderazione "A".

La misura del livello sonoro in dB(A) é ormai internazionalmente riconosciuta come la piú rappresentativa della reale sensazione sonora ricevuta tramite l' orecchio umano.

E' tuttavia possibile raffinare ulteriormente la misura effettuando una analisi in frequenza del suono ricevuto, per controllare che le riflessioni sulle pareti della sala non ne modifichino lo spettro sonoro. L' analisi in frequenza richiede l' utilizzo di un banco di filtri, solitamente ad ampiezza di banda proporzionale alla frequenza di centro banda: sono state standardizzate internazionalmente le frequenze di centro banda per analisi in ottave (ogni banda ha frequenza di centro banda doppia della precedente) e in terzi d' ottava (ogni ottava é suddivisa in tre terzi). Ovviamente l' analisi in terzi d' ottava fornisce una migliore risoluzione in frequenza.

Molti fonometri oggi incorporano filtri per l' analisi in ottave o in terzi d' ottava, ma con essi la procedura di misura é discretamente lunga, poiché occorre ripetere la misura per ogni filtro selezionato.

Sono pertanto apparsi sul mercato analizzatori in "tempo reale", che forniscono su schermo TV la rappresentazione grafica dei livelli sonori di tutte le bande di frequenza. In figura 2.2 é visibile la stampa dell' immagine prodotta da uno di questi analizzatori.



Un diverso modo di operare è basato sull' utilizzo degli analizzatori di Fourier: essi sono strumenti in grado di operare la Trasformata di Fourier su un segmento del segnale proveniente dal microfono, producendo uno spettro non più frazionato in bande di frequenza, ma uno spettro continuo, con una scala delle frequenze lineare. In fig. 2.3 è visibile la riproduzione grafica dell' immagine visualizzata sullo schermo di un analizzatore di Fourier. In questo caso è necessario operare con una sorgente sonora che emetta uguale potenza in ogni banda di frequenza di ampiezza costante (ad es. di 1 Hz), e non più in bande di ampiezza variabile come nel caso precedente. Il suono così prodotto viene detto "rumore bianco".

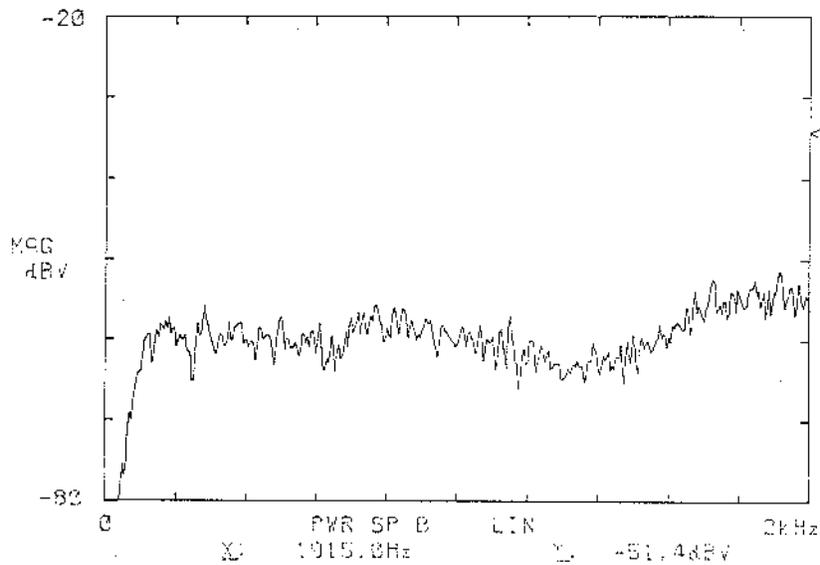


Fig. 2.3: Spettro sonoro in banda stretta.

Anche in questo caso é possibile rendere molto piú precisa la misura, se si dispone di un analizzatore bicanale che sottrae lo spettro della sorgente da quello ricevuto dal microfono. Questo modo di procedere é particolarmente utile, poiché l'analisi di Fourier fornisce non solo l'ampiezza relativa del segnale microfonico rispetto alla sorgente, ma anche lo sfasamento relativo in gradi.

E' interessante notare come lo spettro di un rumore rosa, ottenuto da una analisi di Fourier, non é piatto, ma decresce linearmente con la frequenza. Reciprocamente, lo spettro del rumore bianco, visualizzato da un analizzatore in ottave o terzi d'ottava, é crescente con la frequenza con una pendenza di 3 dB per ottava.

Entrambi i tipi di analizzatori suddetti hanno la possibilitá di calcolare, dallo spettro ottenuto, il corrispondente livello complessivo in dB ed in dB(A).

Le misure di livello sonoro su esposte hanno lo scopo di controllare la uniformitá di distribuzione dell'energia nel campo acustico e la mancanza di evidenti effetti di distorsione in frequenza del segnale originale. E' poi chiaro che l'effettivo livello udibile in ogni punto durante la esecuzione musicale dipende direttamente dalla potenza sonora emessa dagli strumenti musicali o dalla voce umana. Anche la potenza sonora W viene misurata

nella scala dei dB, mediante una relazione del tipo:

$$L_w = 10 \cdot \log \left(\frac{W}{W_{r1r}} \right) \quad (2.3)$$

ove L_w è appunto il livello di potenza, misurato in dB, e W_{r1r} è la potenza sonora di riferimento, pari a 10^{-12} Watt.

Avendo dunque misurato i livelli sonori in un ambiente, L_{p1} , mentre era in azione una sorgente sonora di potenza L_{w1} , si possono prevedere i nuovi livelli sonori prodotti da un' altra sorgente di potenza L_{w2} , che saranno semplicemente pari a $L_{p2} = L_{p1} - L_{w1} + L_{w2}$.

Non sono purtroppo prevedibili con grande precisione le potenze sonore emesse dalle principali sorgenti utilizzate nei teatri, poiché ad esempio una orchestra può variare notevolmente di composizione, e gli orchestrali stessi possono variare entro certi limiti la potenza emessa; ancora maggiore variabilità presenta la voce umana. Pertanto non è possibile prevedere l' effettivo livello di ascolto. E' tuttavia un dato importante la "sonorità" dell' ambiente, intesa come la capacità di

produrre un elevato livello sonoro in seguito all' emissione di una piccola potenza: essa si esprime solitamente in modo convenzionale come il livello di ascolto che si avrebbe se la sorgente avesse un livello di potenza di 100 dB.

In genere i musicisti, i cantanti e gli attori avvertono spontaneamente la sonorità dell' ambiente, e regolano istintivamente la potenza sonora emessa in modo da produrre il giusto livello sonoro di ascolto. Essi tuttavia ricevono questa sensazione dal "ritorno" di energia sonora da parte della sala, che non sempre è legato all' effettivo livello ricevuto dagli spettatori. L' analisi della uniformità di distribuzione del campo sonoro deve dunque estendersi anche al palcoscenico ed alla zona dell' orchestra, ed in particolare al posto normalmente occupato dal Direttore, da cui dipende l' amalgamarsi del suono dei vari strumenti.

I dati ottenuti dalle misure suddette vengono usualmente presentati in forma grafica, come mappatura dei livelli con diversi gradi di annerimento o come curve di decremento in funzione della distanza dalla sorgente. In fig. 2.4 sono visibili queste due tipiche rappresentazioni.

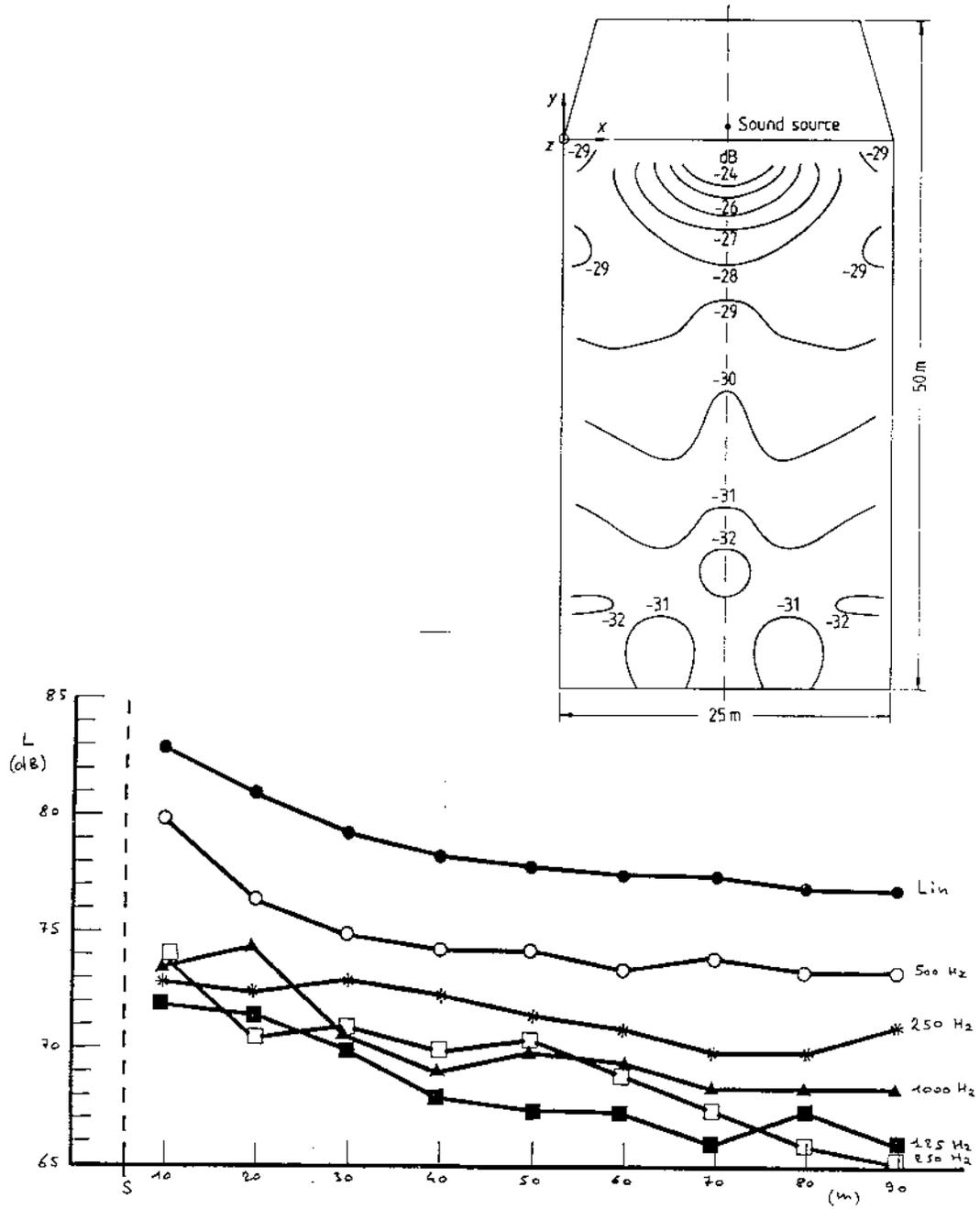


Fig. 2.4: Mappa di livello sonoro e curve di decremento.

Dall' analisi di queste mappe, ottenute nelle migliori sale da concerto del mondo, si nota che le condizioni più gradite sono rappresentate da un campo acustico di distribuzione uniforme e diffusa, privo di attenuazioni o risonanze a particolari frequenze.

Viste le modalità di misura standardizzate, è possibile confrontare senza problemi i risultati di livello sonoro ottenuti da tutti gli studiosi, senza correre rischi di comparare dati incongruenti, come purtroppo può accadere con le altre grandezze acustiche.

2.3 Misure di Riverberazione

Le misure di riverberazione furono introdotte da Sabine, il quale definì così il Tempo di Riverberazione T (detto anche "durata convenzionale della coda sonora"): ammesso che in un ambiente sia in funzione una sorgente sonora, tale da produrre un certo livello di pressione sonora a regime L_p , si interrompa il funzionamento della sorgente; il Tempo di Riverberazione è il tempo impiegato dal livello sonoro a ridursi di 60 dB rispetto al valore precedente allo spegnimento della sorgente.

La definizione data da Sabine non esplicita esattamente l'istante dal quale si inizia a misurare il Tempo di Riverberazione: infatti la intensità sonora non inizia a decadere immediatamente, ma solo dopo un certo tempo, pari al tempo impiegato dall'onda sonora diretta a raggiungere il punto di ascolto. Detta r la distanza in metri tra sorgente e punto di ascolto, e detta c la velocità del suono (pari a circa 340 m/s), l'intensità inizia dunque a decadere solo dopo r/c secondi (che non vanno dunque considerati nel Tempo di Riverberazione).

Notando che per un'onda progressiva la densità di energia sonora, definita come l'energia sonora contenuta nell'unità di volume, è proporzionale al quadrato della pressione sonora, si osserva che un decadimento di 60 dB

corrisponde ad una riduzione della densità sonora ad un milionesimo del valore preesistente.

La misura del decadimento di livello non è però attuabile con il fonometro, poiché esso è usualmente piuttosto rapido: si collega dunque un registratore scrivente al misuratore di livello, ed in questo modo si ottengono dei tracciati quali quello riportato in fig. 2.5. . Variando la velocità di trascinamento della carta si varia la scala dei tempi della registrazione, e di ciò bisogna tener conto per la determinazione del Tempo di Riverberazione dalla pendenza della linea di decadimento. Ciò può essere fatto facilmente grazie all'uso di uno speciale goniometro, che fornisce direttamente il risultato voluto. In fig. 2.6 si può vedere la tipica strumentazione per questo tipo di misure, sostanzialmente simile a quella stessa usata da Sabine all'inizio del secolo.

Utilizzando il filtro di pesatura "A", o i filtri in ottave, di cui sono dotati i fonometri, è possibile misurare tempi di riverberazione diversi, indicati solitamente con T_{sub} (pesato A) e T_{1es} , T_{2es} , etc. (in ottave); il numero a pedice indica la frequenza di centro ottava.

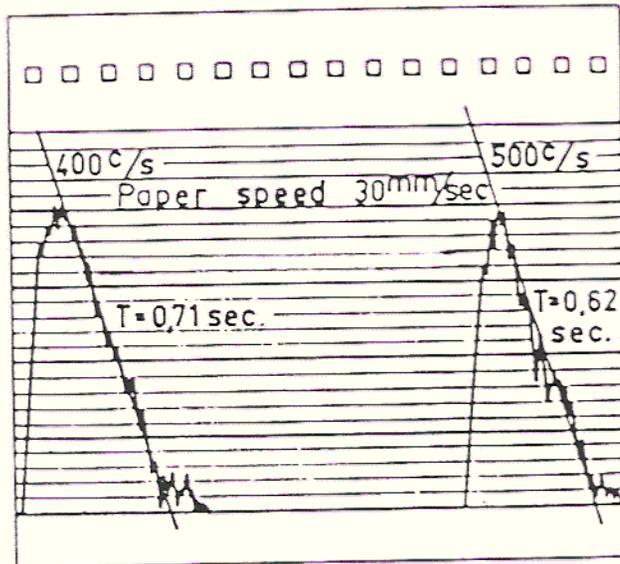


Fig. 2.5: Tracciati di decadimento di un rumore impulsivo

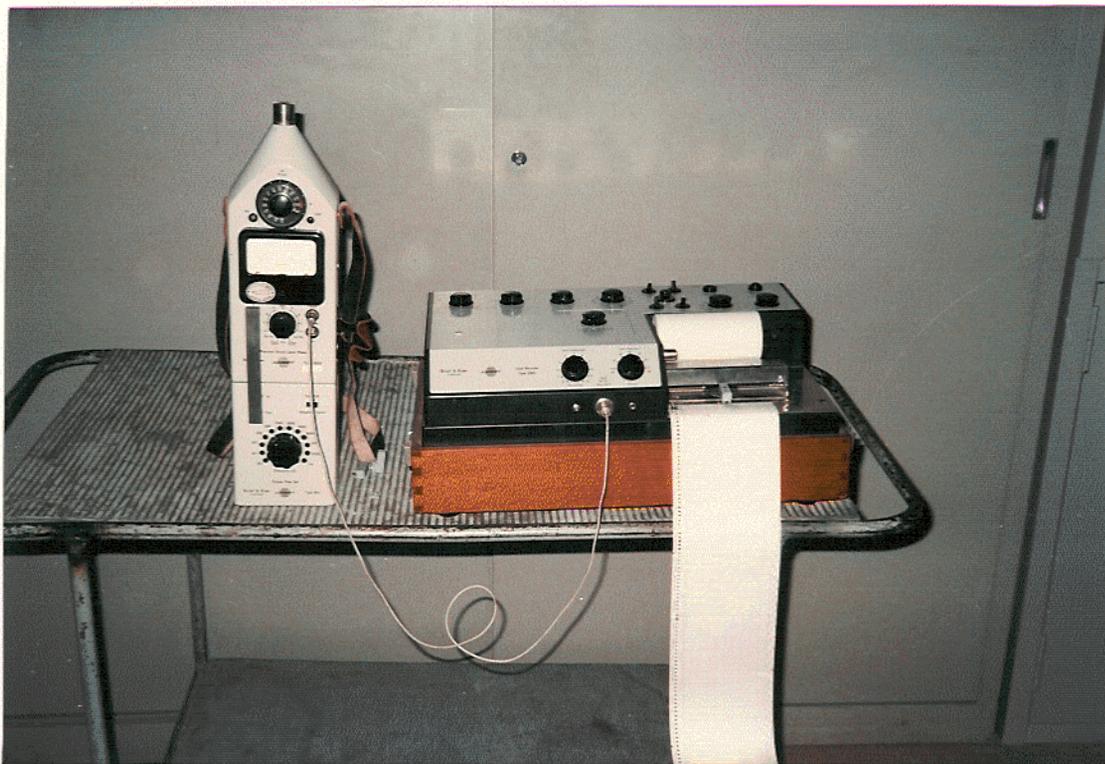


Fig. 2.6: Apparato sperimentale per la registrazione dei decadimenti sonori.

Oggi si misurano anche tempi di riverberazione in terzi d'ottava, ma questi dati non trovano per ora riscontro nei dati sui tempi di riverberazione giudicati ottimali, che sono disponibili solo in ottave. Analogamente non è possibile prevedere tempi di riverberazione in terzi d'ottava tramite la formula di Sabine (o i suoi derivati), poiché sarebbe necessario conoscere per terzi d'ottava il valore del coefficiente di assorbimento apparente dei materiali di cui è ricoperto lo' ambiente.

Spesso non è possibile ricavare il tempo di riverberazione dalla definizione di Sabine, poiché non si riesce a registrare un decadimento di 60 dB; infatti se è presente rumore di fondo, sarebbe necessario utilizzare una sorgente in grado di sovrastare il rumore di oltre 60 dB, il che spesso è inattuabile. Si ricorre pertanto ad una estrapolazione, usualmente grafica, della prima parte della curva di decadimento. In teoria, se il decadimento fosse esattamente esponenziale, come previsto dalla acustica statistica, la curva del livello sarebbe una retta con pendenza costante, e l'extrapolazione non porterebbe ad alcun errore. Nella realtà capita spesso di vedere curve di decadimento tutt'altro che rettilinee, con doppie pendenze o curvature non trascurabili. Ecco che il risultato è influenzato dall'estensione in dB o in ms

del tratto iniziale di curva usato per l' estrapolazione. Usualmente si riconosce come Tempo di Riverberazione Classico, direttamente rapportabile alla definizione di Sabine, il valore ottenuto estrapolando il decadimento da -5 dB a -35 dB sotto il livello di regime. Vengono poi definiti altri Tempi di Riverberazione, facenti riferimento a porzioni ridotte di decadimento: Kurer e Kurze [47] hanno definito un Tempo di Riverberazione Iniziale ANZ (Anfangsnachhallzeit), ottenuto dalla estrapolazione della curva da 0 a -20 dB; Atal, Schroeder e Sessler [48] hanno anch' essi definito un Tempo di Riverberazione Iniziale (IRT), basato sui primi 15 dB di decadimento, mentre Jordan [49] ha definito il Tempo di Primo Decadimento EDT (Early Decay Time), basato sui primi 10 dB. Gli stessi Atal, Schroeder e Sessler, nel lavoro già citato, utilizzarono un tempo di primo decadimento basato sui primi 160 ms della curva. I primi tre Tempi Iniziali sono indicati solitamente con i simboli T_{20} , T_{15} , T_{10} , ed il piú usato é il terzo, cioè l' EDT di Jordan. Questi Tempi Iniziali sono piú correlati all' effettiva sensazione di riverberazione prodotta nell' orecchio umano di quanto lo sia il Tempo di Riverberazione Classico.

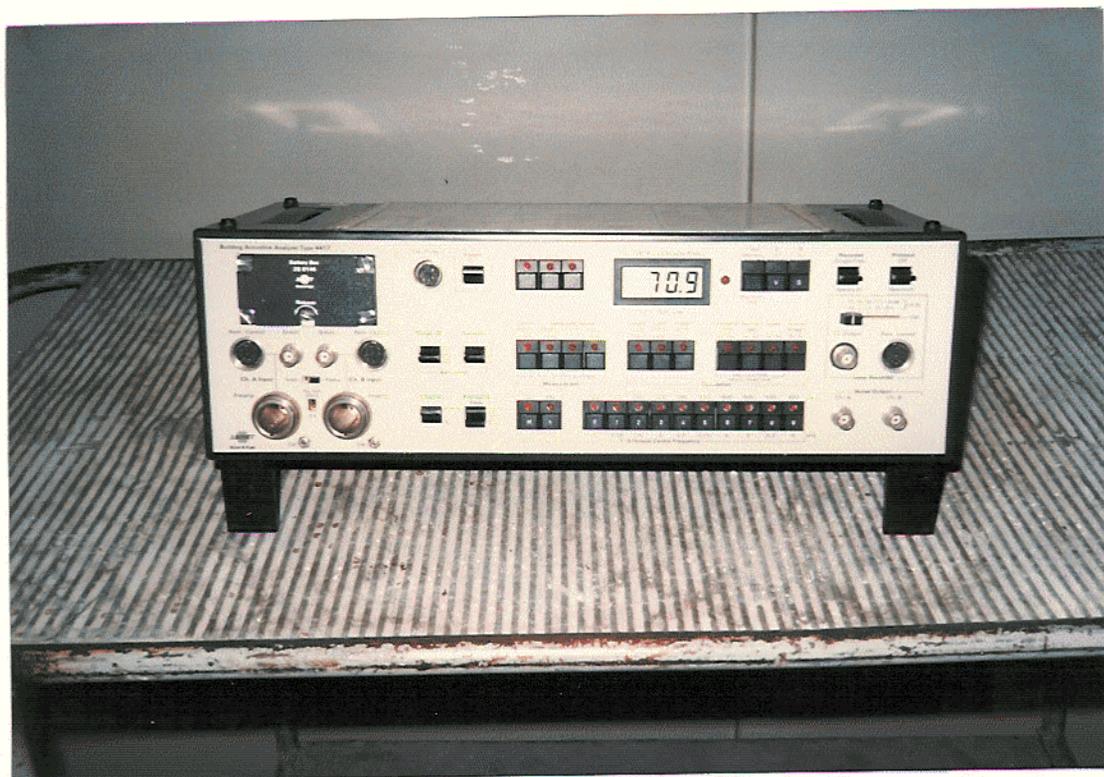


Fig. 2.7: Strumentazione per analisi in terzi d'ottava dei tempi di riverberazione.

Oltre alla classica strumentazione con registratore scrivente, sono state sviluppate apparecchiature dedicate alla misurazione diretta dei tempi di riverberazione; ad esempio in figura 2.7 è visibile uno strumento di questo tipo, che consente di misurare i tempi di riverberazione in bande di 1/3 di ottava e con estrapolazione su 20, 30 o 40 dB. L'uso di questi strumenti è del tutto automatizzato, poiché essi provvedono ad alimentare la sorgente con un opportuno segnale (già filtrato in terzi d'ottava, in modo da concentrare l'energia sonora in un ristretto campo di frequenza, migliorando così il rapporto

segnale/disturbo), provvedono ad interrompere il segnale stesso al momento opportuno, valutano direttamente la pendenza del decadimento e memorizzano il Tempo di Riverberazione così ottenuto; dopo aver analizzato tutte le bande di frequenza si ottiene una stampa dei tempi misurati in forma tabellare. E' possibile così ottenere risultati indipendenti dall'operatore e molto ripetibili, specie se ottenuti su medie di più rilevamenti, con grande riduzione del tempo necessario per le misure.

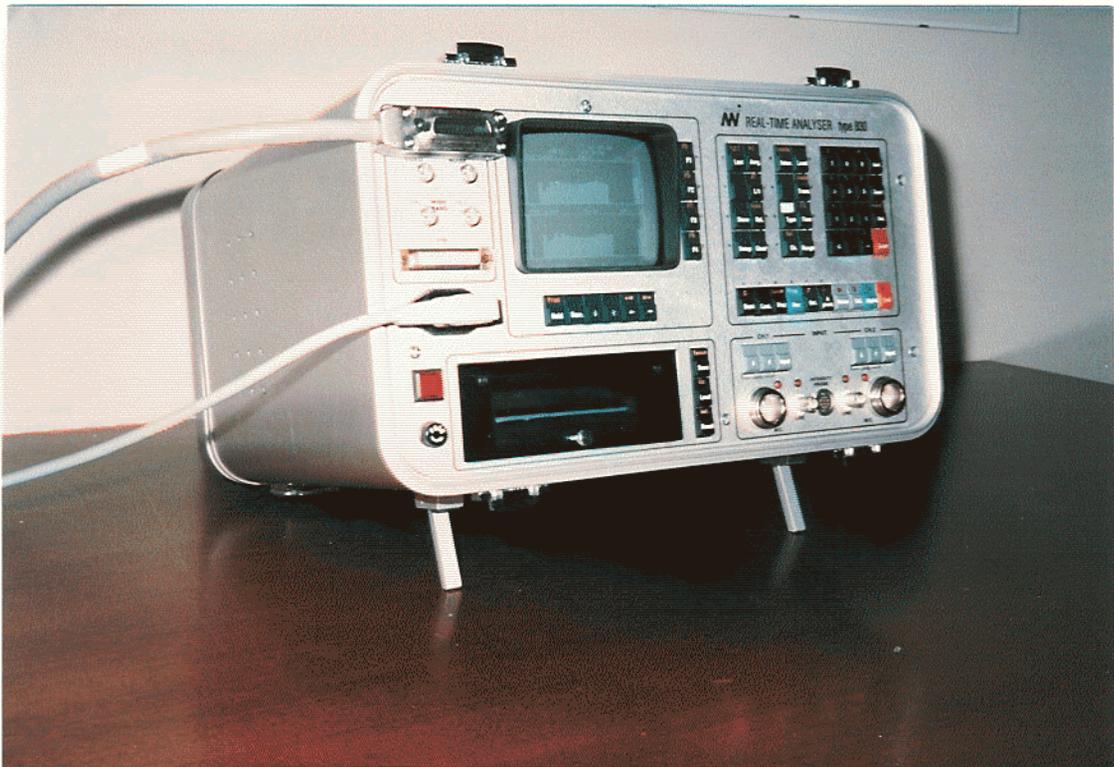


Fig. 2.8: Analizzatore di frequenza in tempo reale.

Una ulteriore considerevole riduzione di tempo é conseguibile utilizzando analizzatori in tempo reale, che sono in grado di processare simultaneamente tutte le diverse bande di frequenza. In questo caso la sorgente sonora viene alimentata con rumore rosa, e ciò penalizza leggermente le condizioni di misura poiché la potenza viene dispersa su tutte le frequenze, ed il rapporto segnale/disturbo si riduce. E' però possibile ovviare allo inconveniente aumentando la potenza della sorgente, ovvero riducendo l' intervallo in dB su cui estrapolare la pendenza; si può anche ridurre il numero delle bande di frequenza. In fig. 2.8 é visibile uno strumento di questo tipo, che incorpora anche una unità a minidisco sulla quale possono venire memorizzate le curve di decadimento per successive elaborazioni e confronti.

In tutti gli strumenti considerati sinora la base del calcolo é un processo di interpolazione grafica, che presuppone un decadimento più o meno lineare. Per cercare di rendere le curve di decadimento più facilmente interpolabili, si ricorre solitamente ad uno "smussamento" (in inglese "smoothing") dei segnali; nel caso del registratore scrivente ciò é ottenuto tramite la regolazione della costante di tempo del circuito di pesatura R.M.S., cui deve corrispondere una adeguata velocità di scrittura del pennino del registratore.

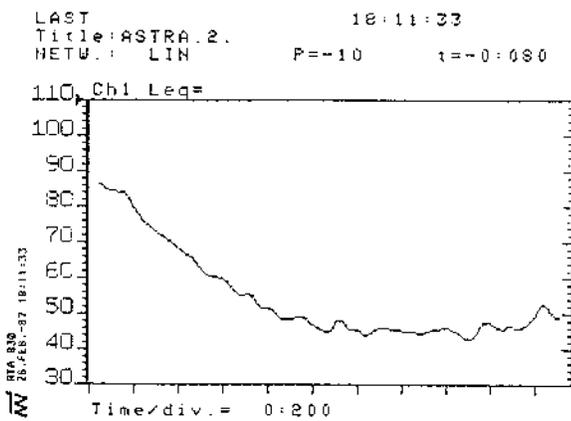
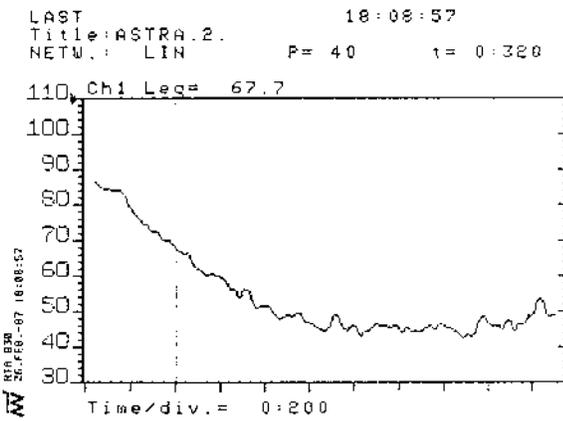
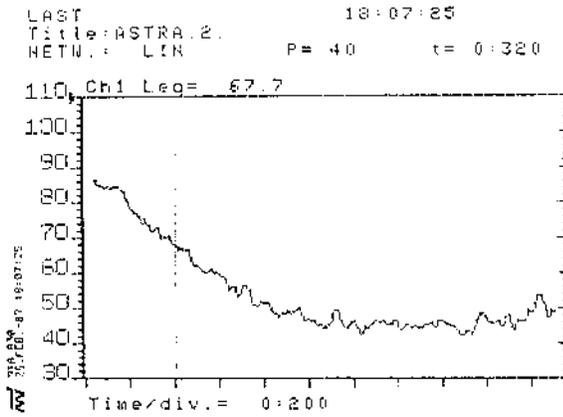


Fig. 2.9: Effetto dello "smoothing" sulle curve di decadimento.

Nel secondo tipo di strumento lo smoothing viene effettuato automaticamente sul segnale d'ingresso prima della elaborazione, in modo non influenzabile dallo operatore. Infine nell'analizzatore in tempo reale é possibile effettuare una elaborazione digitale della curva di decadimento, prima di calcolare da essa i tempi di riverberazione, mediante un semplice algoritmo di interpolazione fra i punti adiacenti della curva stessa; ripetendo un certo numero di volte la interpolazione, si può smussare la curva a piacimento, come mostrato dalle successive stampe riportate in fig. 2.9.

Una diversa possibilità é offerta dall'uso di analizzatori di Fourier: questi strumenti usualmente non sono corredati del software necessario per il calcolo del Tempo di Riverberazione, ed é pertanto necessario interfacciarli con un microcomputer opportunamente programmato. In questo modo si può utilizzare qualsiasi algoritmo per il calcolo della pendenza delle curve di decadimento, é possibile misurare tempi di riverberazione in bande di frequenza anche molto piccole, prefissare intervalli di interpolazione in dB o in millisecondi. Si paga questa grande libertà operativa in termini di scarsa confrontabilità dei risultati ottenuti con quelli degli altri strumenti più classici, con i quali é stata ottenuta la gran parte dei dati di raffronto oggi disponibili.

E' stata sinora considerata l' idea iniziale di Sabine, cioè una sorgente che produce un campo sonoro stazionario e diffuso, interrotta improvvisamente. In effetti spesso viene utilizzata una sorgente di tipo impulsivo, quale un colpo di pistola a salve, lo scoppio di un palloncino, o un impulso inviato ad un altoparlante.

Questi suoni producono decadimenti usualmente più rapidi di quelli prodotti dalla sorgente a regime, ed i tempi di riverberazione misurati sono dunque leggermente inferiori. Alcuni strumenti, come l' analizzatore in terzi d' ottava di fig. 2.8, sono in grado di elaborare le curve di decadimento prodotte da rumori impulsivi in modo diverso da quelle prodotte da suoni a regime, utilizzando una tecnica numerica sviluppata da Schroeder [50], e ricostruendo in tal modo la curva di decadimento che sarebbe stata prodotta da una sorgente in funzionamento continuo. Questa tecnica deriva direttamente dalla misurazione della Risposta all' Impulso, descritta nel prossimo paragrafo, e verrà pertanto colá illustrata.

2.4 Misure di Distribuzione Temporale

Il Tempo di Riverberazione costituisce senza dubbio il primo e piú importante parametro oggettivo da determinare in un ambiente chiuso, sia esso destinato allo ascolto della parola o della musica. Tuttavia esso da solo non rende conto delle diversità della sensazione uditiva riscontrabili fra diverse sale con lo stesso Tempo di Riverberazione, o addirittura fra punti diversi della stessa sala, poiché dá informazioni solo sul decadimento di tipo statistico-esponenziale, che si verifica dopo un certo intervallo dall' arrivo del suono diretto; in questo intervallo giungono all' orecchio, distinte una dalla altra, le prime riflessioni prodotte dalle pareti, dal soffitto e dal pavimento.

L' importanza di queste prime riflessioni é già stata messa in luce nel precedente capitolo; la determinazione delle caratteristiche di distribuzione temporale della energia sonora riveste dunque una importanza predominante nella valutazione della qualità acustica.

E' possibile rappresentare con un diagramma l' effetto delle riflessioni multiple in un ambiente chiuso: si assume come ascissa il tempo, con un intervallo di circa 200-250 ms. Si riportano poi in ordinata le pressioni

sonore, corrispondenti all' arrivo sul microfono della onda diretta e delle onde riflesse successive, nella ipotesi che la sorgente sonora generi la cosiddetta "funzione delta di Dirac", ovvero un impulso unitario positivo di pressione, di durata temporale nulla.

L' onda diretta e le successive riflessioni sono rappresentate da segmenti verticali positivi, di altezza ridotta rispetto all' unità, posizionati al tempo di ritardo corrispondente. In fig. 2.10 è visibile un diagramma teorico di questo tipo, chiamato usualmente Reflectogramma, o Risposta all' Impulso Teorica; esso può essere costruito mediante la individuazione delle sorgenti virtuali (immagini speculari della sorgente reale prodotte dalle pareti della sala), e calcolando i tempi di ritardo in base alla distanza fra sorgente (reale o virtuale) e posizione microfonica, mentre l' ampiezza è inversamente proporzionale alla distanza e risente della attenuazione prodotta dalla riflessione sulle pareti.

Usualmente il diagramma viene disegnato con l' onda diretta di altezza unitaria, indipendentemente dalla distanza dalla sorgente, e con le successive riflessioni rapportate in scala ad essa.

Esiste una Risposta all' Impulso diversa in ogni diverso punto dell' ambiente, assegnata una particolare posizione della sorgente; variando quest' ultima, si

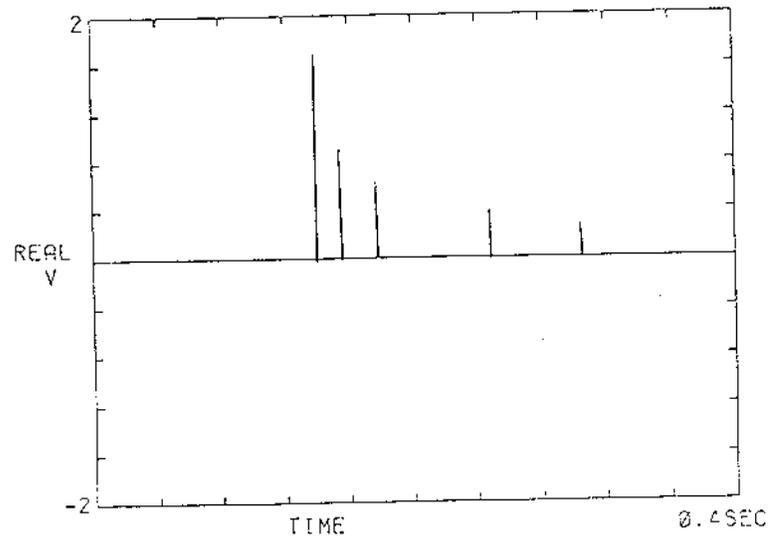


Fig. 2.10: Risposta all' impulso teorica.

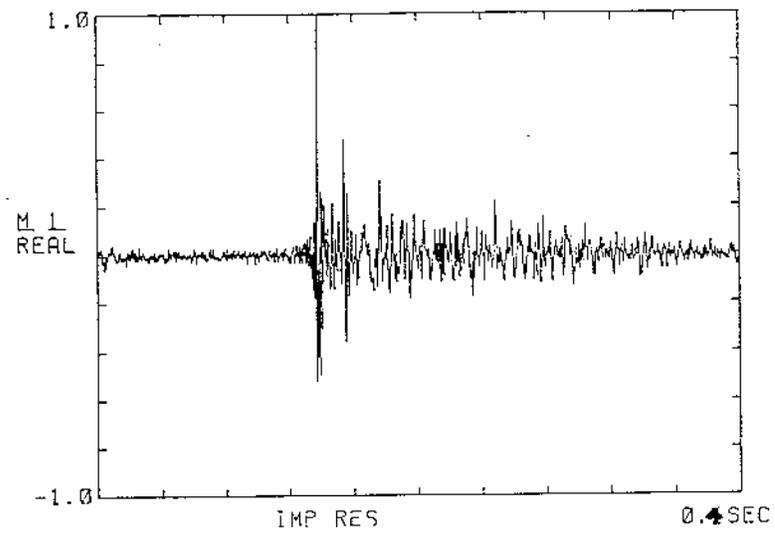


Fig. 2.11: Risposta all' impulso effettiva.

modificano in varia misura le risposte all' impulso di tutti i punti della sala.

Oltre al calcolo teorico citato, è possibile ottenere Reflectogrammi sperimentali in ambienti esistenti. La procedura più classica, entrata nell' uso già prima della ultima guerra mondiale, consiste nel visualizzare su un oscilloscopio il segnale elettrico prodotto da un microfono, in risposta ad una sollecitazione di tipo impulsivo prodotta da una apposita sorgente, tipicamente un colpo di pistola (anche se possono essere usati scoppi di palloni, scintille, appositi altoparlanti, etc.). In fig. 2.11 è riportata una tipica misura di questo tipo, che secondo Cremer [51] assomiglia ad un abete rovesciato. Come si nota sono presenti picchi sia positivi che negativi, e ciò è dovuto a due distinti fenomeni: innanzitutto i suoni impulsivi succitati sono tutti, più o meno, di tipo bipolare, cioè dopo una variazione di pressione positiva ne producono un' altra negativa, circa di pari ampiezza; inoltre i microfoni non sono mai perfettamente omnidirezionali, e tendono a dare una risposta elettrica negativa se colpiti dal di dietro da una onda di pressione positiva.

Indubbiamente nei Reflectogrammi sperimentali sono contenute tutte le informazioni riguardanti la trasmissione sonora fra la sorgente e il punto di ascolto,

ma queste informazioni sono rese poco evidenti dalla complessità del tracciato. Va notato inoltre che lo aspetto complessivo dei Reflectogrammi dipende drasticamente dalla distanza fra ascoltatore e sorgente, per cui è difficile poter comparare tracciati misurati in punti a distanza diversa.

Per rendere la visualizzazione più significativa si ricorre a vari metodi: il più semplice è quello di visualizzare il quadrato della pressione sonora, tramite un circuito elettrico di quadratura interposto fra il microfono e l'oscilloscopio. In questo modo si ottengono tracciati molto più chiari, privi ovviamente della parte negativa, e più facilmente interpretabili in termini energetici (l'energia sonora è proporzionale al quadrato della pressione sonora). In fig. 2.12 si può osservare un diagramma di questo tipo.

Una ulteriore modifica consiste nell'adottare una scala logaritmica delle ordinate, ovvero riportare i valori di pressione sonora in dB. In questo modo le riflessioni più deboli divengono apprezzabili, però risulta amplificato anche il rumore di fondo. Una rappresentazione di questo tipo è visibile in figura 2.13.

In generale, il Reflectogramma dipende dalla sorgente impulsiva utilizzata. È stato evidenziato [52] che, per garantire una sufficiente ripetibilità delle misure,

TEATRO COM. CASLIASI 17/2/87 P.1/01 09:41
102kHz A:AC/ 50V B:AC/ 50V INST 0/10 DUAL 12

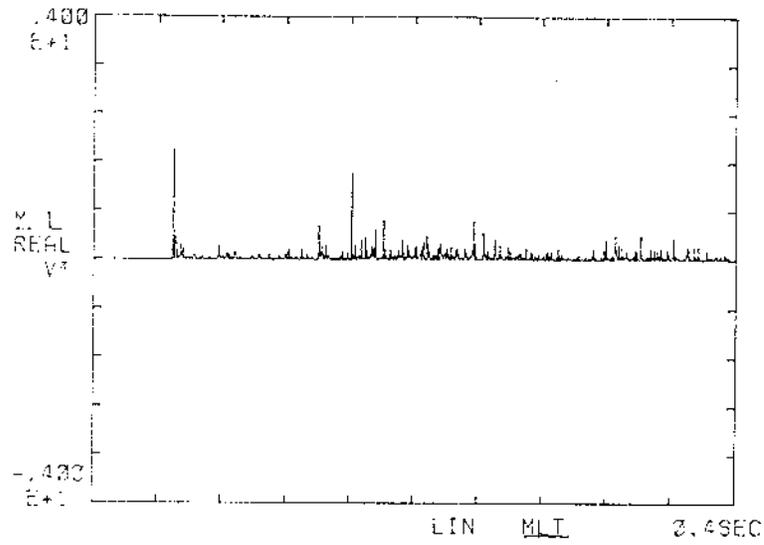


Fig. 2.12: Risposta all' impulso quadrata.

LAST 18:50:45
Title: NUOVO-TEATRO-COMUNALE-(CA)
NETW.: LIN P= 203 t= 6:496

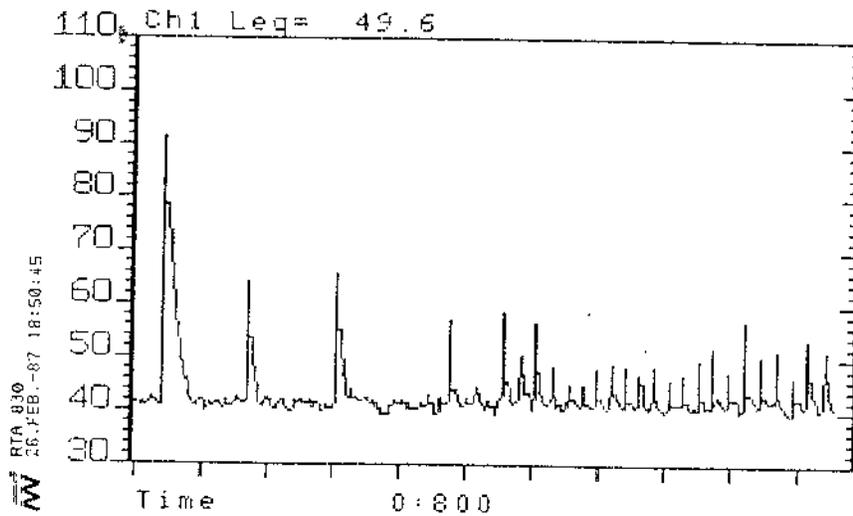


Fig. 2.13: Risposta all' impulso in decibel.

occorre utilizzare sorgenti in grado di fornire un sufficiente apporto energetico a tutte le frequenze interessate, e nello stesso tempo con impulsi di durata sufficientemente ridotta rispetto alla risoluzione temporale voluta. Le due condizioni sono in reciproco contrasto, poiché tanto più l' impulso è corto, tanto minore è la quantità di energia con esso emessa, specialmente alle basse frequenze, mentre l' ampiezza non può superare certi limiti, dettati da fenomeni di propagazione non lineare riscontrati con sorgenti impulsive troppo potenti.

Una soluzione correntemente accettata è quella di limitare l' ampiezza in frequenza dell' analisi tramite un sistema di filtraggio, ed utilizzare un impulso la cui durata sia di poco inferiore al reciproco della massima frequenza analizzata. Ciò comporta l' inconveniente di dover utilizzare sorgenti diverse per la misura nelle varie bande di frequenza, inconveniente risolvibile facilmente solo se la sorgente è un altoparlante pilotato da un apposito generatore di segnali. L' utilizzo di pistole è ancora possibile, se la frequenza massima non è molto elevata; alle frequenze più alte si possono utilizzare scintille elettriche.

Nella fig. 2.14 sono riportate le caratteristiche di emissione temporale delle più comuni sorgenti impulsive,

ottenute mediando un certo numero di eventi. Si nota ad esempio che le scintille sono adatte per i modelli in scala, che richiedono frequenze molto elevate, mentre i palloni vanno bene per studiare le basse frequenze.

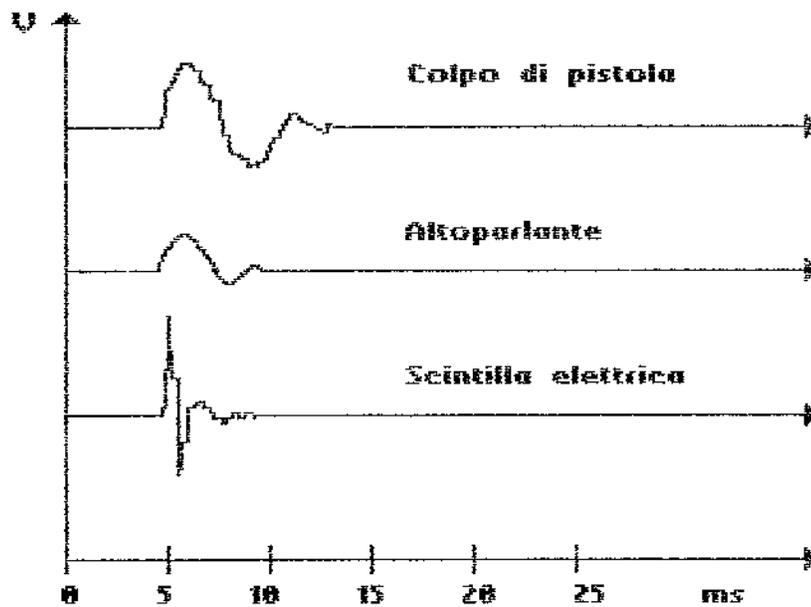
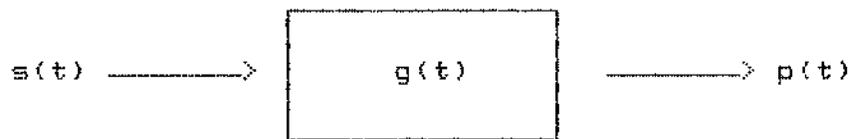


Fig. 2.14: Caratteristiche temporali delle sorgenti impulsive.

Sono stati proposti molti metodi per attenuare la influenza del tipo di sorgente sul risultato delle misure: all'origine di tutti sta la teoria dei sistemi di propagazione lineari, schematizzabile in questo modo:



ove $s(t)$ è il segnale emesso dalla sorgente, il rettangolo rappresenta il sistema fisico, dotato di una Risposta all'Impulso $g(t)$; all'uscita del sistema troviamo un segnale $p(t)$, che è il risultato delle modifiche prodotte dal sistema sul segnale in ingresso.

Per chiarezza, d'ora in avanti, verrà indicato $p(t)$ con il termine "Reflectogramma", mentre verrà indicata $g(t)$ come "Risposta all'Impulso".

Se il sistema è lineare, il risultato $p(t)$ è la **convoluzione** del segnale in ingresso con la Risposta allo Impulso, cioè:

$$p(t) = s(t) * g(t) \quad (2.4)$$

nella quale il simbolo " * " indica appunto la convoluzione, operazione matematica consistente sostanzialmente in questo: per ottenere il valore della funzione $p(t)$ all'istante t , si sommano gli infiniti prodotti del valore della funzione $s(t)$, valutato allo istante t' , per il valore della funzione $g(t)$, valutato all'istante $t-t'$, con t' variante fra 0 e infinito.

In termini matematici, ciò è esprimibile con il seguente integrale :

$$p(t) = \int_{t'=-\infty}^{t} s(t') \cdot g(t-t') \cdot dt' \quad (2.5)$$

Effettuando la trasformata di Fourier delle tre funzioni reali nel dominio del tempo $s(t)$, $g(t)$ e $p(t)$, si ottengono tre funzioni complesse nel dominio della frequenza, $S(f)$, $G(f)$ e $P(f)$; la trasformata di Fourier è una operazione matematica molto usata come filtro numerico di segnali, per generare il cosiddetto "spettro", ovvero la analisi in frequenza del segnale originario. Essa è definita matematicamente dalla relazione:

$$F(f) = \int_{-\infty}^{+\infty} f(t) \cdot \exp(-j \cdot 2 \cdot \pi \cdot f \cdot t) \cdot dt \quad (2.6)$$

La relazione 2.5 diviene dunque, nel dominio della frequenza:

$$P(f) = S(f) \cdot G(f) \quad (2.7)$$

La convoluzione si riduce pertanto al semplice prodotto fra gli spettri complessi delle funzioni di partenza.

Da questa relazione si comprende come, misurando la funzione $p(t)$ con le procedure prima viste, è possibile estrarre da essa la vera Risposta all' Impulso $g(t)$, indipendente dalla sorgente usata: è sufficiente effettuare la trasformata di Fourier del reflectogramma, dividere lo spettro complesso $P(f)$ così ottenuto per lo spettro della sorgente impulsiva $S(f)$, precedentemente determinato in campo libero, e sottoporre poi lo spettro $G(f)$ risultante dalla divisione ad una trasformata di

Fourier inversa, in modo da ottenere la voluta funzione $g(t)$.

Sono stati proposti vari metodi per effettuare questa trasformazione, indicata matematicamente come **deconvoluzione** [53], facenti riferimento a vari tipi di sorgente sonora.

Il procedimento è concettualmente applicabile a qualunque tipo di sorgente, anche non impulsiva, purché se ne conosca con esattezza la caratteristica temporale $s(t)$ ovvero lo spettro $S(f)$; ad esempio Berkhout, de Vries e Boone [54] propongono l' utilizzo di una sinusoide di ampiezza costante e frequenza crescente rapidamente (durata del segnale di 100 ms), mentre il Gruppo di Gottingen [55] propone l' utilizzo di un segnale pseudo-casuale generato da un calcolatore, con il vantaggio che l' algoritmo di deconvoluzione diviene estremamente semplice, essendo costituito solo da operazioni di somma e sottrazione.

Si giunge all' estremo limite di questo procedimento utilizzando una sorgente di rumore continuo, anziché un segnale di breve durata. Se infatti è disponibile un analizzatore di Fourier a due canali, è possibile misurare direttamente la Funzione di Trasferimento $G(f)$ fra lo altoparlante ed il microfono di ascolto, effettuando il rapporto complesso fra lo spettro del segnale ricevuto dal

microfono e lo spettro del segnale emesso dallo altoparlante; la trasformata di Fourier inversa della Funzione di Trasferimento fornisce poi direttamente la desiderata Risposta all'Impulso $g(t)$.

Quest' ultimo metodo é stato utilizzato nella procedura sperimentale che verrà descritta nei capitoli successivi, per cui si ritiene utile scendere qui piú in dettaglio ed analizzare pregi e difetti del metodo stesso.

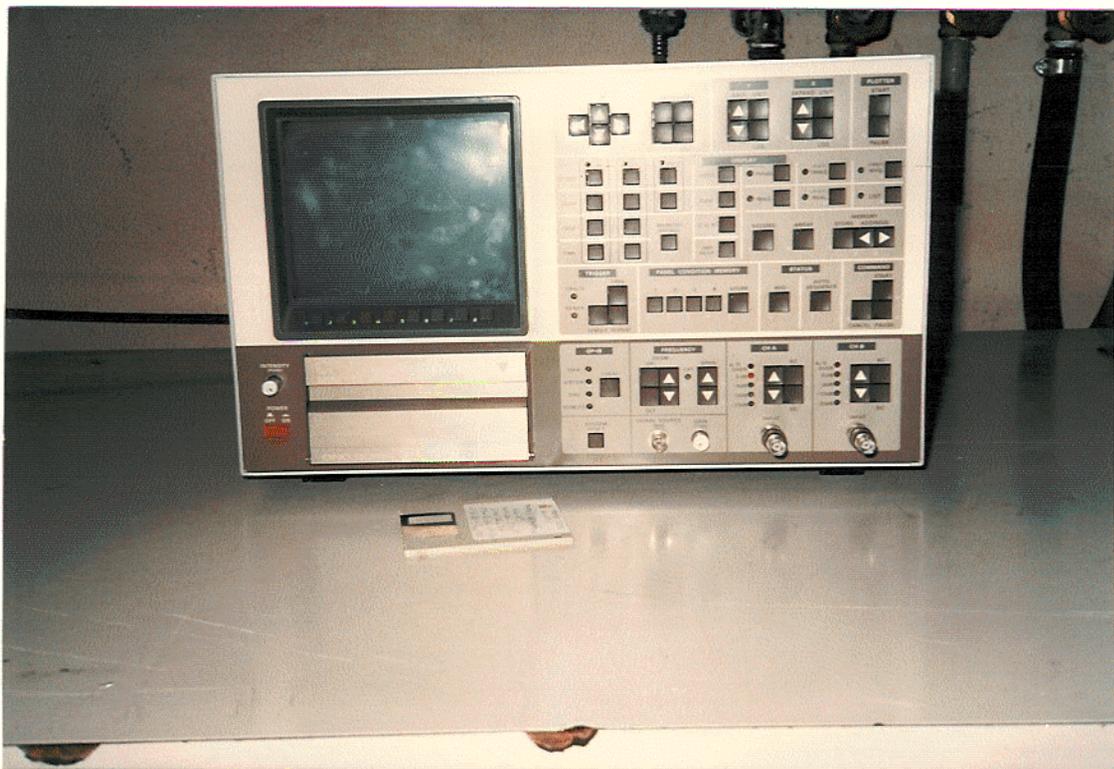


Fig. 2.15: Analizzatore di Fourier (FFT).

L'analizzatore di Fourier utilizzato (visibile in fig. 2.15) consente l'analisi a due canali su segmenti di segnale costituiti da 1024 punti campionati ciascuno; la frequenza di campionamento è 2.56 volte la massima frequenza ottenuta nell'analisi spettrale, onde evitare il fenomeno noto come "aliasing", dovuto ad un campionamento troppo lento, e dunque incapace di seguire la forma d'onda effettiva.

In base ai dati su esposti, limitando a 2 kHz la massima frequenza dell'analisi di Fourier, si ottiene che il segnale campionato su ciascun canale ha una lunghezza temporale di 200 ms, e tale sarà anche la lunghezza della risposta all'impulso ottenuta. Va poi tenuto conto che la analisi di Fourier inversa della Funzione di Trasferimento fornisce un segnale sviluppato sia nel tempo positivo che in quello negativo (un segnale cioè compreso fra -100 e +100 ms), e ciò riduce di fatto la lunghezza utile della funzione $g(t)$.

La prima onda diretta giunge poi sul microfono con un certo ritardo dall'istante in cui è stata emessa, e dunque essa corrisponde ad un picco posizionato in ritardo rispetto al centro della visualizzazione (0 ms). Ciò significa anche che l'analizzatore confronta due segnali in parte incorrelati, tanto meno correlati quanto maggiore è il ritardo temporale fra essi. Al limite, se il ritardo

superasse i 100 ms, non sarebbe possibile visualizzare la risposta all' impulso. Si può ovviare in parte a questo inconveniente utilizzando un apposito circuito di ritardo inserito nell' analizzatore, che consente di operare per passi pari ad $1/2$ della lunghezza temporale campionata, e cioè 100 ms. In questo modo, quando il ritardo supera i 50 ms, si inserisce un primo passo di ritardo fittizio sul segnale proveniente dall' altoparlante, e si trasla così di 100 ms a sinistra la risposta all' impulso ottenuta. La durata effettiva del segnale utile, successivo all' onda diretta, varia dunque fra 50 e 150 ms, a seconda della distanza dalla sorgente. La misura è tanto migliore quanto più il ritardo dell' onda diretta è prossimo a 0 ms, poiché in queste condizioni i segnali analizzati sono massimamente correlati. Viceversa le condizioni divengono critiche quando il ritardo dell' onda diretta si approssima ai 50 ms di ritardo (o di anticipo, se si è operato il ritardo fittizio), e compare un rumore spurio a inquinare tutto il segnale, visibile chiaramente a sinistra della onda diretta, dove non dovrebbe esistere alcun segnale.

È possibile ridurre grandemente l' effetto di questo rumore fittizio operando una media su un discreto numero di successivi segnali: infatti la casualità del rumore fa sì che mediando esso tenda a ridursi notevolmente.

Un' altro aspetto da tenere presente è lo spettro di emissione della sorgente: siccome esso appare a denominatore nel calcolo della Funzione di Trasferimento, è importante che non vi siano zeri, cioè che lo altoparlante irradi sufficiente energia a tutte le frequenze. Ciò è difficile da realizzare soprattutto alle basse frequenze, ove solitamente la potenza emessa dallo altoparlante non riesce a sovrastare il rumore di fondo. Per ovviare a questo inconveniente si utilizza una sorgente di dimensioni rilevanti, alimentata con rumore rosa (più ricco di energia alle basse frequenze rispetto al rumore bianco). Una diversa soluzione sarebbe ottenibile con il filtraggio digitale della Funzione di Trasferimento, prima di effettuare la trasformata inversa, ponendo uguale a zero la prima parte di essa, corrispondente alle frequenze più basse.

Occorre infine tenere conto della Funzione di Trasferimento stessa dell' altoparlante, che in genere non è perfettamente piatta, e che pertanto influenza il risultato. Un modo per ovviare a questo ulteriore problema potrebbe essere quello di **equalizzare** la Funzione di Trasferimento ottenuta, dividendola per la Funzione di Trasferimento del solo altoparlante, misurata in precedenza in camera anecoica o in campo libero. Ciò però fornisce il risultato corretto solo se la equalizzazione

viene fatta utilizzando la Funzione di Trasferimento dello altoparlante misurata ad una distanza uguale a quella della misura effettiva nella sala, mantenendo poi invariata la potenza della sorgente.

Lo stesso risultato può essere ottenuto in modo molto elegante se si dispone di un microfono di riferimento posizionato in stretta prossimità dell' altoparlante stesso: il segnale generato da questo microfono di riferimento serve come segnale di ingresso allo analizzatore, assieme all' altro segnale proveniente dal microfono posizionato nel punto di misura. Se i due microfoni sono identici, si ha l' ulteriore vantaggio che la Risposta all' Impulso misurata non dipende né dallo spettro di emissione della sorgente, né dalla potenza sonora emessa, ferme restando le ipotesi di linearità della propagazione sonora comunemente verificate.

In fig. 2.16 sono visibili Risposte all' Impulso misurate secondo la procedura suddetta: si può notare un residuo rumore presente prima dell' arrivo dell' onda diretta, di ampiezza comunque tale da non distorcere significativamente il segnale successivo.

Il grande vantaggio della tecnica di misura adottata consiste nella accurata ripetibilità delle misure, che non trova riscontro nelle tecniche basate su un singolo evento impulsivo.

TEATRO ASTRA 25/02/87 - PUNTO 41 - ORECCHIO DESTRO
100kHz A:AC/ 50V B:AC/ 52V INST 0/16 DUAL 1k

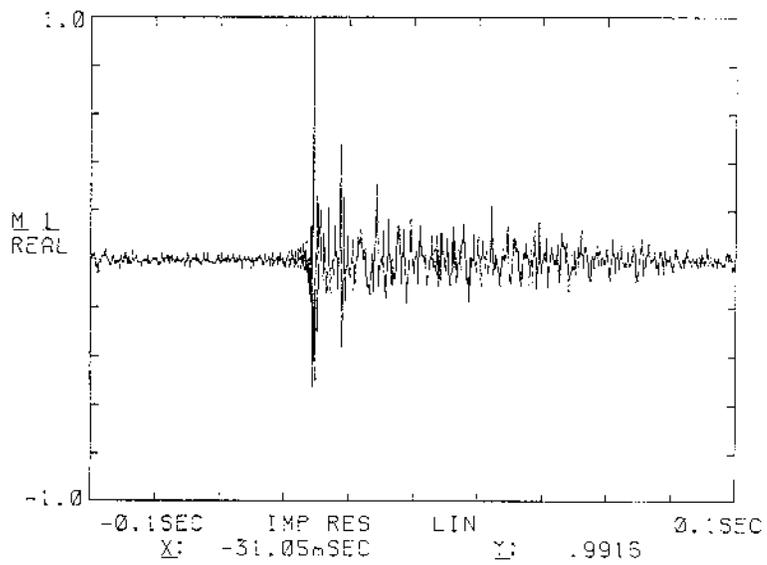
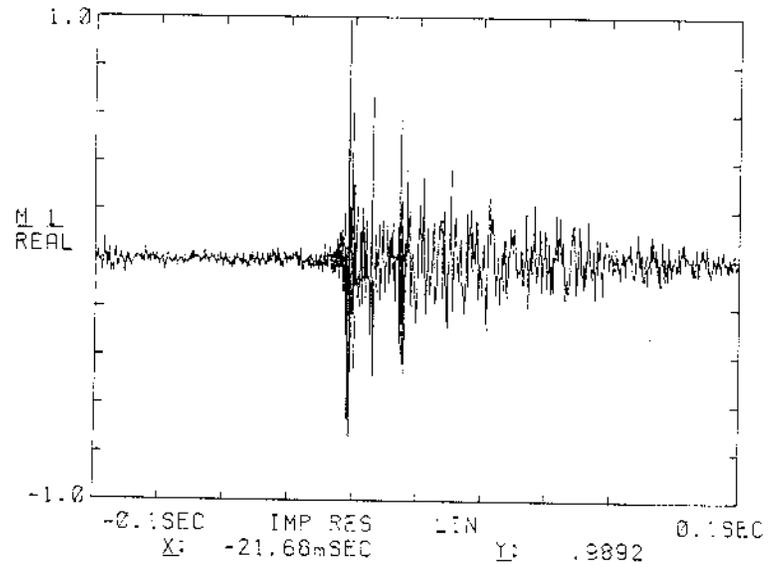


Fig. 2.16: Risposte all' impulso ottenute per deconvoluzione.

Lo svantaggio è rappresentato dalla limitata lunghezza temporale del segnale ottenuto, che consente sì lo studio delle prime riflessioni, ma non quello del successivo decadimento esponenziale, secondo la tecnica illustrata nel sottoparagrafo successivo.

Il segnale ottenuto viene memorizzato su un minidisco, da dove può venire in seguito richiamato per successive elaborazioni e confronti, possibili sia direttamente sullo analizzatore di Fourier che tramite un microcalcolatore ad esso interfacciato.

2.4.1 Risposta all' Impulso e Tempo di Riverberazione

Il legame fra la Risposta all' Impulso (che teoricamente contiene **tutte** le informazioni relative al campo acustico) ed il Tempo di Riverberazione è stato studiato ed esplicitato da Schroeder [50]: egli ha mostrato che il tradizionale decadimento riverberante, indicato con $n^e(t)$, prodotto dallo spegnimento di una sorgente di rumore stazionaria, è legato ad un integrale sulla Risposta all' Impulso.

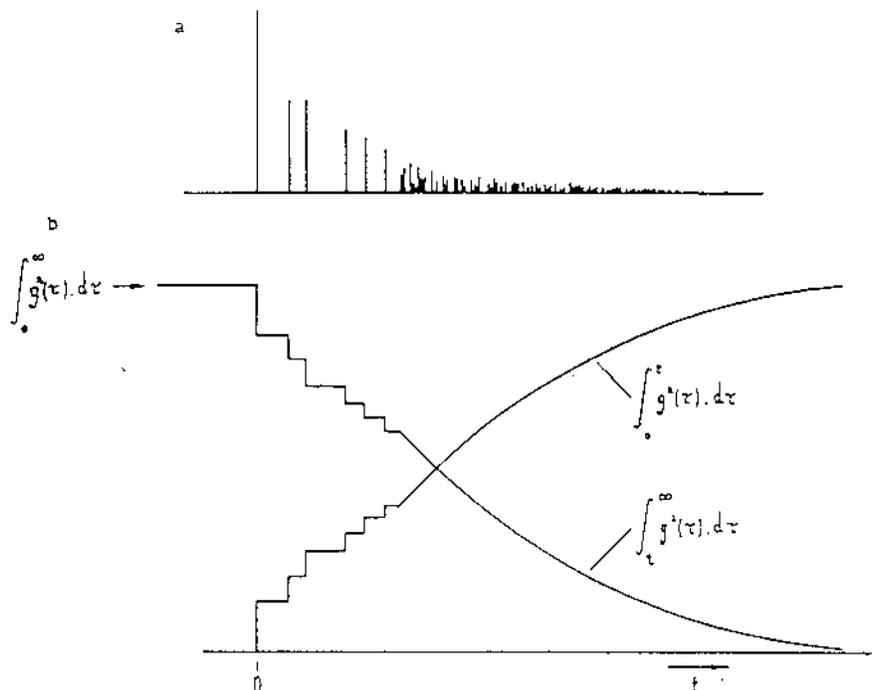
Il decadimento del rumore contiene fluttuazioni casuali dovute alla storia casuale del segnale immediatamente precedente allo spegnimento. Comunque, la media temporale di un numero infinito di decadimenti quadrati, $\langle n^e(t) \rangle$, è collegata alla Risposta all' Impulso al quadrato, $g^e(t)$, dalla seguente relazione:

$$\langle n^e(t) \rangle = \int_t^{\infty} g^e(t') \cdot dt' = \int_0^{\infty} g^e(t') \cdot dt' - \int_0^t g^e(t') \cdot dt' \quad (2.8)$$

La prima forma dell' integrale prevede un intervallo di

integrazione compreso fra t e infinito, il che implica misure con scala dei tempi invertita; la seconda forma consente invece di procedere in modo piú usuale, sottraendo dalla energia integrata totale, calcolata una sola volta, l' integrale fra 0 e t della Risposta allo Impulso al quadrato.

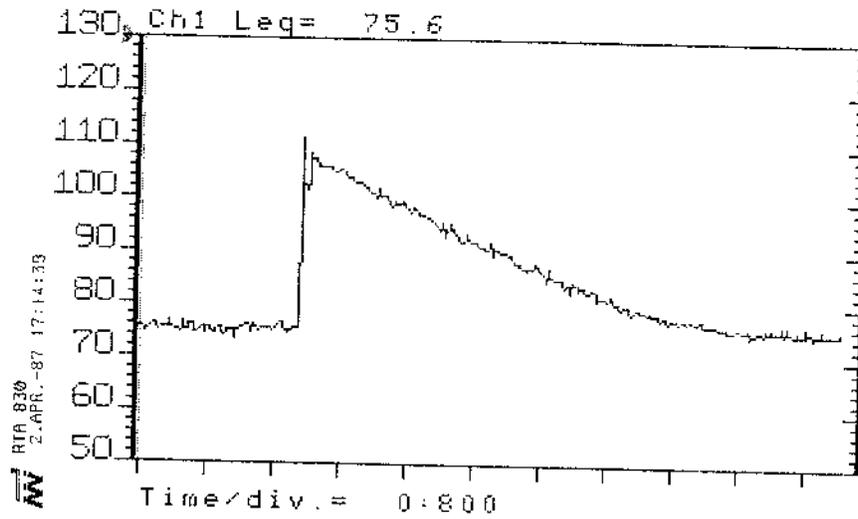
In fig. 2.17 é visibile la rappresentazione grafica della integrazione di Schroeder; trasformando questi grafici in scala logaritmica, é possibile calcolare il tempo di riverberazione con gli stessi procedimenti illustrati nel precedente paragrafo.



(a) Idealised squared impulse response. (b) Corresponding build-up curve (integral from 0 to t) and decay curve (integral from t to ∞).

Fig. 2.17: Ricostruzione della curva di decadimento mediante integrazione all' indietro.

LAST 17:14:39
Title: NUOVO-TEATRO-COMUNALE-(CA)
NETW.: LIN P=-60 t=-1:920



LAST 17:13:07
Title: NUOVO-TEATRO-COMUNALE-(CA)
NETW.: LIN P=-60 t=-1:920

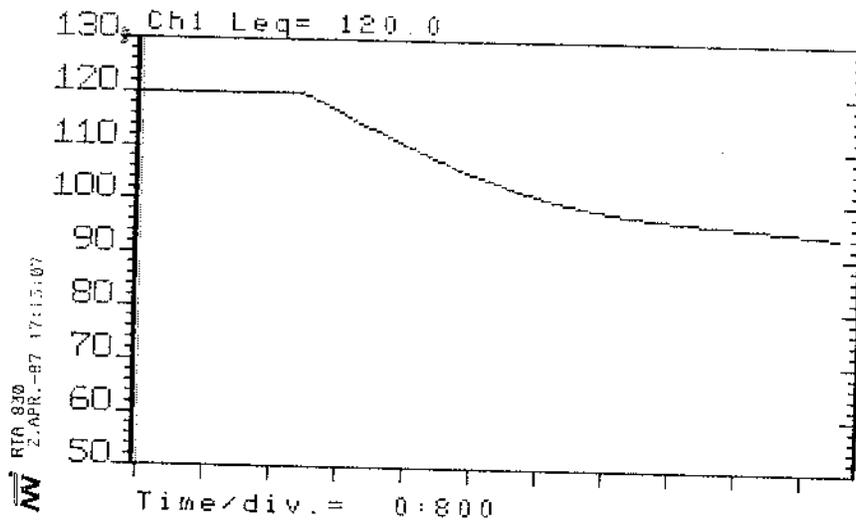


Fig. 2.18: Risposta all' impulso e corrispondente curva di decadimento ricostruita tramite la integrazione di Schroeder.

L' integrazione di Schroeder é molto utile per il calcolo dei Tempi di Prima Riverberazione, poiché fornisce con molto dettaglio i primi millisecondi della curva di decadimento. Essa dá risultati meno buoni nel calcolo del Tempo di Riverberazione Classico, poiché in questo caso é necessario disporre di una Risposta all' Impulso lunga almeno la metà del Tempo di Riverberazione stesso.

Attualmente sono disponibili strumenti, quale quello illustrato in fig. 2.8, capaci di effettuare automaticamente l' integrazione di Schroeder di segnali impulsivi; in questo modo é possibile ottenere accurate misure dei tempi di riverberazione alle varie frequenze con un semplice colpo di pistola, misure usualmente abbastanza confrontabili con le misure classiche, ottenute dallo spegnimento di un sorgente stazionaria; in caso di decadimento non esponenziale si riscontrano viceversa discrepanze fra i due metodi di misura del tempo di riverberazione, ma secondo Schroeder é proprio il valore misurato dalla risposta all' impulso integrata ad essere meglio correlato con la sensazione soggettiva.

In fig. 2.18 sono visibili una risposta all' impulso quadrata in scala logaritmica e la corrispondente curva di decadimento ottenuta dall' integrazione di Schroeder: nella seconda si nota un tipico fenomeno di decadimento non esponenziale, che non era così evidente nel segnale

impulsivo; si nota anche che la integrazione ha ridotto il campo dinamico della misura, ma ha smussato le asperità del tracciato di decadimento.

2.5 Misure di Distribuzione Spaziale

Nel capitolo precedente è stata evidenziata la importanza crescente attribuita nel tempo alla sensazione di spazialità del campo sonoro, definita di volta in volta con termini soggettivi diversi quali "Impressione Spaziale" o "Avvolgimento" (envelopment). Concettualmente però questi termini non indicano la causa fisica della gradevole sensazione di trovarsi **dentro** la musica anziché ascoltarla da lontano, causa in parte non del tutto chiarita nemmeno dalle teorie più moderne.

La capacità dell' uomo di percepire la direzione di provenienza dei suoni dipende da una serie di complessi fattori: in ordine di importanza, il primo è certamente il tempo di ritardo fra la percezione dei suoni nelle due orecchie, responsabile della individuazione dell' angolo formato dalla direzione di arrivo del suono con la congiungente i centri dei timpani.

La evidenza di questo fenomeno si ha dalla constatazione che sott' acqua non si percepisce la direzione di provenienza dei suoni, anche se i suoni stessi sono perfettamente uditi. Osservando che la velocità del suono nell' acqua è circa 5 volte maggiore che in aria, si deduce che il tempo impiegato dal suono a

viaggiare da una orecchia all' altra viene ridotto di un fattore 5 rispetto all' analogo fenomeno in aria; in queste condizioni, il centro nervoso dell' udito non è piú in gradi di riconoscere tempi di ritardo cosí ridotti, ed interpreta la sensazione binaurale come quella di un suono proveniente frontalmente, qualunque sia la reale direzione di provenienza.

Un secondo fenomeno, utile per la localizzazione delle sorgenti sonore, è costituito dalla diffrazione di certe frequenze attorno alla testa ed ai padiglioni auricolari. Ciò fa sì che a queste frequenze l' orecchio diventi leggermente direttivo, e ciò, unitamente a una serie di piccoli movimenti involontari della testa, consente di localizzare la direzione dalla quale proviene il segnale. Anche questa sensazione addizionale scompare sott' acqua, poiché anche le lunghezze d' onda crescono di un fattore 5, e pertanto le diffrazioni avvengono a frequenze diverse da quelle cui l' orecchio è abituato.

Contribuiscono infine a fornire la localizzazione anche gli altri sensi, in particolare la vista: guardando la televisione nessuno localizza la provenienza dei suoni nell' altoparlante dell' apparecchio, ma nelle appropriate immagini visualizzate sullo schermo.

La caratterizzazione della sensazione spaziale in un punto di una sala da concerto sarebbe dunque teoricamente

possibile individuando per ciascuna riflessione, oltre che per l'onda diretta, la direzione di provenienza, tramite ad esempio una coppia di angoli: ciò è fattibile nel caso di calcolo teorico con la tecnica delle sorgenti virtuali, ma risulta del tutto problematico dal punto di vista pratico. In questo modo si ottengono peraltro informazioni fortemente ridondanti rispetto alla sensazione studiata; infatti campi acustici strutturalmente anche molto differenti per numero e provenienza delle riflessioni possono fornire una sensazione spaziale equipollente.

Sono stati proposti pertanto numerosi parametri oggettivi per descrivere la sensazione spaziale, tutti basati sul fatto che vengono usualmente giudicati "avvolgenti", e perciò graditi, i campi acustici dotati di numerose e forti prime riflessioni laterali, mentre vengono giudicati "distaccati" e "lontani" i campi acustici caratterizzati da riflessioni deboli, o forti ma provenienti dell'alto.

Due di questi parametri si sono rivelati fisicamente rilevanti e soggettivamente molto ben correlati: sono la Efficienza Laterale (LE) di Jordan [30] e la Coerenza Mutua Inter-Aurale (IACC) del gruppo di Gottingen [27].

La prima costituisce un parametro di misurazione molto semplice, poiché è definita da un rapporto fra due energie integrate, misurate la prima tramite un microfono "a

figura di 8" (così chiamato dalla forma della sua curva di sensibilità direzionale), e la seconda tramite un comune microfono omnidirezionale:

$$LE = \frac{\int_{25 \text{ ms}}^{80 \text{ ms}} p_e^E(t) \cdot dt}{\int_0^{80 \text{ ms}} p_o^E(t) \cdot dt} \quad (2.9)$$

In cui p_o è la pressione sonora misurata dal microfono omnidirezionale, mentre p_e è la pressione sonora misurata dal microfono "a figura di 8": questo è un microfono a caratteristica dipolare (microfono sensibile al gradiente della pressione del primo ordine), orientato con una direzione di sensibilità nulla verso la sorgente sonora, essendo la direzione di massima sensibilità allineata con la congiungente i centri dei due timpani.

La misurazione è molto semplice, poiché la strumentazione non richiede elevata sofisticazione, e la elaborazione dei segnali è possibile senza ricorrere a costosi analizzatori digitali.

L' Efficienza Laterale è stata oggetto di numerosi studi, che ne hanno confermato la significatività come

parametro sperimentale in grado di descrivere adeguatamente la sensazione spaziale. Tuttavia è difficile prevedere teoricamente il valore della LE tramite le tecniche usuali, divenendo in tal caso la mole di lavoro equivalente a quello necessario per calcolare il secondo parametro, cioè la Coerenza Mutua Inter-Aurale

Quest' ultima è definita come il valore massimo assunto nell' intervallo $(-1..+1)$ ms dalla funzione di Correlazione Mutua dei primi 50 ms delle risposte allo impulso misurate tramite due microfoni collocati al posto dei timpani di una testa artificiale, orientata in direzione della sorgente sonora.

La procedura di misura consiste dunque anzitutto nella determinazione delle due risposte all' impulso (sinistra e destra), indicate con $g_1(t)$ e $g_2(t)$ (left e right), tramite uno dei metodi illustrati nel paragrafo precedente.

Dalle risposte all' impulso viene estratto uno spezzone, lungo usualmente 50 ms a partire dall' arrivo dell' onda diretta (anche se alcuni autori propongono di estendere questo intervallo ad 80 ms [56]). Dei due segnali così ottenuti viene calcolata la funzione normalizzata di Correlazione Mutua $K(t')$, così definita matematicamente per tempi sia positivi che negativi:

$$K(t') = \frac{\int_{-T}^{+T} p_1(t) \cdot p_r(t+t') \cdot dt}{\left[\int_{-T}^{+T} p_1^2(t) \cdot dt \cdot \int_{-T}^{+T} p_r^2(t) \cdot dt \right]^{1/2}} \quad (E.10)$$

Essa rappresenta il grado di somiglianza dei segnali ricevuti dalle due orecchie, sfasati del ritardo t' . Usualmente essa presenta il valore massimo per un ritardo di 0 ms, se la testa è orientata direttamente verso la sorgente. Qualora invece la maggior energia sonora provenisse lateralmente, il valore massimo si verifica per un valore di t' diverso da zero, ma comunque mai superiore a $+ 0 - 1$ ms, poiché questo è il massimo tempo impiegato da un suono perfettamente laterale ad aggirare la testa e a colpire l' orecchio opposto.

Questo valore massimo viene considerato come parametro significativo della somiglianza degli eventi sonori sulle due orecchie, e pertanto è tanto più basso quanto più i suoni sono dissimili (segno di forti riflessioni laterali); il valore numerico della IACC deve dunque essere il più basso possibile per garantire la migliore sensazione spaziale, al contrario della Efficienza Laterale LE.

Ando [45] propone di utilizzare non le risposte allo

impulso misurate dalle orecchie, ma direttamente i segnali di pressione sonora prodotti dalla esecuzione di un brano musicale, estendendo il tempo di integrazione T a 17 s. I risultati ottenuti con questa procedura dipendono leggermente dalla sorgente sonora e dal brano musicale, ma in pratica restano molto vicini a quelli misurati a partire dalle risposte all' impulso.

In ogni modo è stato riscontrato uno stretto legame fra i valori dei parametri IACC e LE, e si può ritenere che ai fini pratici la scelta dell' uno o dell' altro metodo possa essere decisa in base alla strumentazione ed ai dati disponibili. Utilizzando un filtraggio in frequenza nella determinazione di LE (ad es. da 350 a 1400 Hz, secondo Jordan [57]), si semplifica ulteriormente la misurazione, poiché è più facile ottenere buoni rapporti segnale/disturbo, senza ridurre la significatività del parametro misurato.

Analogamente è possibile filtrare i segnali provenienti dalla testa artificiale, ed in questo caso solitamente si utilizza un filtro di pesatura A, corrispondente alla sensibilità media dell' orecchio umano; secondo Ando questo modo di procedere porta a simulare strettamente i processi di localizzazione sonora che avvengono effettivamente nel Sistema Nervoso Centrale dell' uomo.

Sulla base delle possibilità suesposte, è stata scelta la Coerenza Mutua Inter-Aurale quale parametro sperimentale da utilizzare nella procedura di valutazione della qualità acustica descritta nei capitoli successivi: in particolare è stata seguita la definizione originale data da Schroeder, cioè sono stati utilizzati i primi 50 ms delle risposte all' impulso non filtrate.

Il calcolo della funzione normalizzata di correlazione mutua viene svolto dallo stesso analizzatore di Fourier utilizzato per l' elaborazione delle Risposte allo Impulso: infatti un microcalcolatore provvede ad estrarre da esse i segmenti temporali utili, e a rinviarli sotto forma di segnale nel tempo all' analizzatore che ne valuta la correlazione mutua. Viene infine individuato il valore massimo della funzione nell' intervallo citato, pari al valore della IACC del punto di misura.

2.6 Misure di intensità acustica

Si consideri un campo acustico, ed in un particolare punto di esso si indichi con $p'(t)$ il valore istantaneo della fluttuazione di pressione sonora, mentre si indichi con $\mathbf{u}(t)$ il vettore velocità istantanea delle particelle di fluido. Si consideri poi nel punto scelto un elemento di superficie dS , la cui giacitura sia individuata dal versore \mathbf{n} . Il vettore forza, agente su una faccia dello elemento di superficie, dovuto alla pressione $p'(t)$, vale $p'(t) dS \mathbf{n}$. Il lavoro fatto nell'unità di tempo da questa forza sulle particelle in movimento con velocità $\mathbf{u}(t)$ vale pertanto $p'(t) dS \mathbf{n} \cdot \mathbf{u}(t)$; dividendo per l'area dS , si ottiene l'energia che attraversa nell'unità di tempo l'unità di superficie di giacitura assegnata:

$$\frac{\partial w}{\partial t} = p'(t) \mathbf{n} \cdot \mathbf{u}(t) \quad (2.11)$$

Si definisce pertanto un vettore Intensità Acustica Istantanea $\mathbf{I}(t)$, tale che la sua proiezione nella direzione normale ad una superficie fornisca la potenza

incidente sulla unità di superficie stessa, tramite la posizione:

$$I(t) = p(t) u(t) \quad (2.12)$$

Dell' Intensità Acustica Istantanea così definita viene poi usualmente calcolato il valore medio nel tempo, cui si dá semplicemente il nome di Intensità Acustica I.

Questa grandezza si é rivelata molto utile per lo studio dei fenomeni di propagazione sonora, poiché calcolando (o misurando) la Intensità Acustica in numerosi punti del campo sonoro, é possibile visualizzare le linee di flusso della propagazione. E' altresí possibile, da misure di Intensità Acustica, ottenere direttamente la potenza sonora emessa da una sorgente in un ambiente qualsiasi, senza necessariamente disporre di una camera anecoica; si può ricavare in tal modo l' efficienza di emissione delle varie parti della sorgente, operando poi per aumentarla (ad es. se si tratta di un altoparlante) o per ridurla (se si tratta di una macchina rumorosa). E' infine possibile misurare l' impedenza acustica effettiva di una parete, e quindi anche il coeff. di assorbimento,

semplicemente misurando l' Intensità Acustica in prossimità della stessa.

La misura della Intensità Acustica é resa possibile direttamente in base alla sua definizione; é infatti sufficiente disporre di un trasduttore in grado di rilevare la pressione sonora istantanea (cióé un semplice microfono) e di un altro in grado di rilevare la velocità istantanea delle particelle del mezzo. Questo secondo trasduttore non può essere costituito da uno degli usuali anemometri, poiché essi non sono in grado di misurare fluttuazioni molto rapide di velocità: l' unica realizzazione commerciale sinora prodotta sfrutta il rilevamento dell' effetto Doppler prodotto dal movimento dell'aria su una onda ultrasonica prodotta appositamente.

Un altro metodo molto diffuso di misurazione della intensità acustica (o meglio della componente del vettore Intensità Acustica in una data direzione), sfrutta la conservazione della quantità di moto in un fluido in quiete, espressa dalla relazione:

$$\frac{\partial p}{\partial n} = - \rho_0 \frac{\partial u_n}{\partial t} \quad (2.13)$$

dove n indica la direzione scelta. Integrando nel dominio del tempo si ottiene:

$$u_n = - \frac{1}{\rho_0} \int \frac{\partial p}{\partial n} dt \quad (2.14)$$

In pratica la derivata della pressione nella direzione prefissata viene ottenuta con un rapporto incrementale, misurando la pressione sonora tramite due microfoni identici, spaziati di una distanza r ; la pressione sonora viene poi posta uguale al valor medio delle pressioni sonore misurate dai due microfoni; si ha dunque:

$$p = \frac{p_1 + p_2}{2} \quad u_n = - \frac{1}{r \rho_0} \int_{-t}^t (p_2 - p_1) dt' \quad (2.14)$$

Il valore istantaneo della Intensità Acustica può dunque essere ottenuto come prodotto delle due quantità suindicate:

$$I_n(t) = \frac{p_1(t) + p_2(t)}{2 \rho_0 r} \int_{-\infty}^t [p_1(t') - p_2(t')] dt' \quad (2.15)$$

In base a questo principio funzionano numerosi strumenti per la misura della Intensità Acustica; ad esempio lo analizzatore in terzi d'ottava di fig. 1.8 può funzionare come misuratore di intensità sia mediante una coppia di microfoni, sia con un sensore di velocità ad ultrasuoni.

Anche un analizzatore di Fourier bicanale può essere utilizzato per la misura della intensità acustica (nelle ipotesi in cui è lecito utilizzare la trasformata di Fourier), poiché la trasformazione nel dominio della frequenza della relazione 2.15 fornisce:

$$I_n(f) = - \frac{\text{Im} [G_{12}(f)]}{\rho_0 2\pi f r} \quad (2.16)$$

Nella quale G_{12} indica la densità spettrale incrociata dei due segnali di pressione, pari al prodotto complesso degli

spettri di Fourier dei due segnali. La intensità $I(f)$ deve essere intesa come valore medio nel tempo, e non più come valore istantaneo, essendo la durata temporale della media pari alla lunghezza nel tempo dei segmenti di segnale analizzati.

Tramite le misure di intensità acustica si acquisisce una notevole comprensione dei fenomeni di propagazione dell'energia sonora, utilizzata fino ad oggi soprattutto per la riduzione della propagazione del rumore [58] e per la riproduzione di campi sonori in scala reale e ridotta [59], mentre sono ancora in corso studi sulla capacità dell'apparato uditivo umano di percepire la direzione di provenienza delle riflessioni in un ambiente chiuso.

3° CAPITOLO

TECNICHE DI PREVISIONE

3.1 Modelli e criteri di similitudine

L' utilizzazione di modelli é da tempo diffusa per lo studio di quei problemi fisici troppo complessi per consentire una soluzione analitica esatta; in particolare rimangono classici i lavori sulla fluidodinamica di Prandtl e Von Karman [60,61], che sono un tipico esempio della proficuitá di studi sui modelli accompagnati da una adeguata analisi teorica.

Nel campo dell' acustica sono stati realizzati sia modelli fisici in scala, che modelli numerici basati sullo utilizzo estensivo della elaborazione elettronica: in questo capitolo verranno brevemente passati in rassegna i risultati ottenuti in entrambi i campi, con particolare riferimento alla possibilitá di applicazione alle sale da concerto.

Per essere proficuo, l' utilizzo di un modello deve sottostare ad alcuni requisiti: il modello deve infatti essere economico, in rapporto al costo di un analogo studio sull' edificio reale; esso deve essere semplice da usare, perlomeno piú semplice di quanto lo sia il prototipo studiato; infine, malgrado i primi due aspetti, il modello deve riprodurre correttamente i fenomeni fisici oggetto dello studio.

L'ultima condizione viene garantita dal rispetto di opportuni criteri di similitudine, che possono essere ricavati solo da una accurata preliminare analisi teorica del problema, tenendo ben presenti gli scopi della ricerca. Se ad esempio si è interessati solo alla ricerca delle frequenze di risonanza di una cavità, è possibile schematizzarla a pareti perfettamente rigide, commettendo così un errore trascurabile; ciò corrisponde a non imporre alcun criterio di similitudine sulle condizioni al contorno del campo acustico. Se viceversa si intende studiare il tempo di riverberazione di un ambiente, occorre non solo riprodurre il campo acustico all'interno della cavità, ma bisogna rispettare accuratamente le condizioni al contorno sulle pareti, poiché il parametro studiato dipende largamente da esse.

Una ulteriore distinzione riguarda il fenomeno di trasmissione dell'energia sonora: esso deve essere schematizzato con la sua natura ondulatoria ogniqualvolta le dimensioni delle superfici dell'ambiente sono confrontabili con le lunghezze d'onda. Nel caso dei teatri, viceversa, essendo le dimensioni delle superfici piuttosto grandi rispetto anche ai valori più grandi della lunghezza d'onda, è possibile considerare che la propagazione avvenga secondo le leggi dell'ottica geometrica, con riflessioni speculari o diffusioni, ma

senza effetti di diffrazione dovuti ai bordi delle superfici stesse. In questo caso si ottiene così una notevole semplificazione del problema.

Una rilevante mole di lavoro riguardo la simulazione del campo acustico in ambienti chiusi di piccole dimensioni è già stato svolto in precedenti ricerche [62,63,64,65], ed è tuttora in corso di svolgimento; la trattazione dei grandi ambienti, concettualmente più semplice, ha fornito risultati apprezzabili già da alcuni anni [66,67], grazie a tecniche di modellistica in scala e a simulazioni numeriche basate sulla tecnica delle sorgenti virtuali.

Verranno pertanto presentati nel seguito i risultati raggiunti, dopodiché verranno prese in considerazione due nuove tecniche attualmente in corso di sviluppo, che dovrebbero consentire ulteriori progressi nel campo dei modelli numerici e della realizzazione di simulazione udibili del campo acustico di sale reali mediante modelli in scala.

3.2 Modelli fisici in scala

La costruzione di un modello acustico può essere affrontata grazie ai risultati della analisi dimensionale, che forniscono criteri di similitudine fisica per ogni sistema del quale siano note le equazioni fondamentali, anche se non è possibile risolvere esplicitamente dette equazioni.

Nel caso dei modelli acustici, deve essere garantita, oltre alla similitudine geometrica, quella dei seguenti fenomeni:

- a) similitudine del campo acustico;
- b) similitudine delle condizioni al contorno;
- c) similitudine delle sollecitazioni.

La terza condizione dipende sostanzialmente dalla origine delle sollecitazioni stesse: se infatti si deve costruire il modello di una struttura chiusa vibrante, essa implica la corretta modellizzazione dinamica della intera struttura. Se viceversa la sollecitazione acustica proviene da sorgenti sonore interne alla cavità, è sufficiente rispettare localmente le prime due condizioni per vedere rispettata anche la terza.

Il primo caso citato corrisponde allo studio, ad esempio, dell'abitacolo di veicoli [62,63]. Viceversa il secondo caso è quello dei grandi ambienti teatrali, che

verrà dunque qui approfondito.

Per ottenere le condizioni di similitudine, si devono adimensionalizzare le equazioni che governano il fenomeno da studiare; per il campo acustico si fa riferimento alla usuale equazione d'onda di Helmholtz, che può essere scritta, nel caso di sollecitazione di tipo periodico, come:

$$\nabla^2 p + \left(\frac{\omega}{c_0}\right)^2 p = 0 \quad (3.1)$$

nella quale p è la pressione sonora in un generico punto del campo acustico, c_0 è la velocità del suono nel mezzo acustico (aria) e $\omega = 2\pi f$ è la pulsazione della sollecitazione.

Sulle pareti che limitano la cavità può essere scritta la seguente condizione al contorno:

$$\frac{\partial p}{\partial n} = - \rho_0 \cdot \omega \cdot \frac{p}{z} \quad (3.2)$$

nella quale n indica la direzione normale alla superficie di contorno, Z è l'impedenza acustica della superficie e ρ_0 è la densità dell'aria.

Entrambe le equazioni scritte possono essere adimensionalizzate, facendo comparire in esse nuove variabili definite in questo modo:

$$\begin{aligned} p^* &= \frac{p}{p_{\text{rif}}} & \nabla^{*2} &= \nabla^2 \cdot L^2 \\ t^* &= t \cdot \omega & n^* &= \frac{n}{L} & Z^* &= \frac{Z}{\rho_0 c_0} \end{aligned} \quad (3.3)$$

Sostituendo le variabili adimensionali, si ottengono le due nuove equazioni:

$$\begin{aligned} \nabla^{*2} p^* + \left(\frac{\omega L}{c_0} \right)^2 p^* &= 0 \\ \frac{\partial p^*}{\partial n^*} &= - \frac{\omega L}{c_0 Z^*} p^* \end{aligned} \quad (3.4)$$

Affinché le equazioni scritte in questa forma continuino a valere immutate al variare della lunghezza

caratteristica del sistema L, é necessario che i raggruppamenti adimensionali che in esse compaiono siano costanti: si ottengono pertanto le due condizioni:

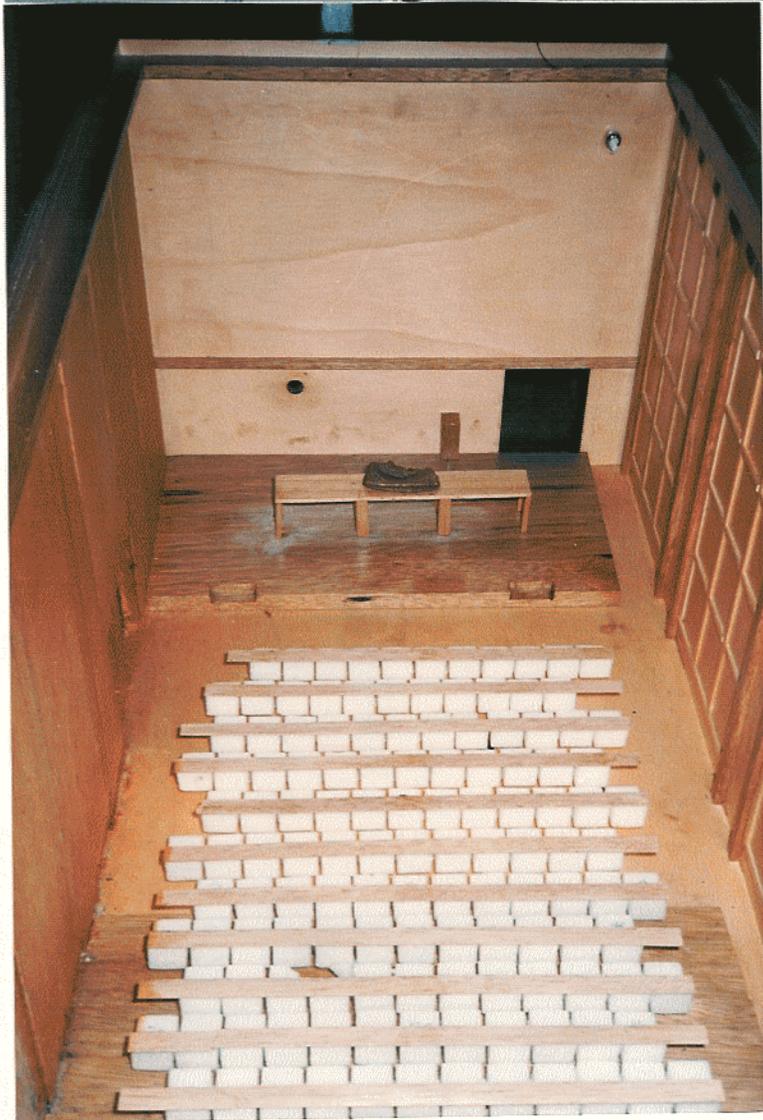
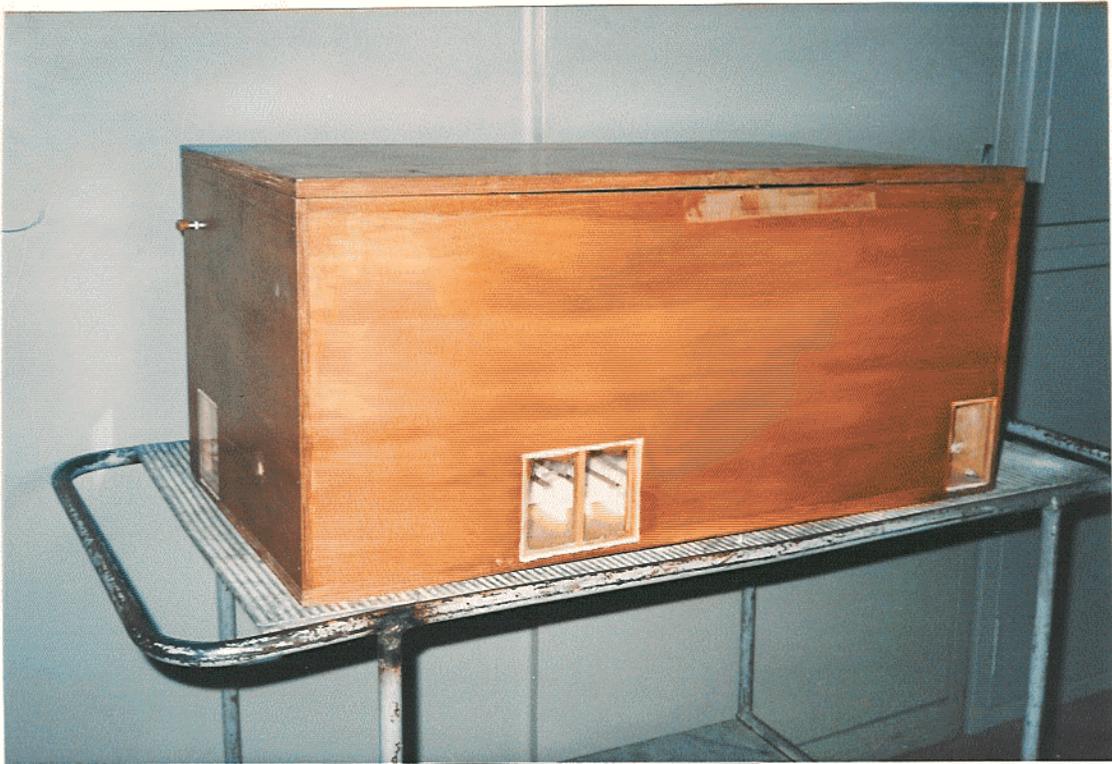
$$\frac{\omega L}{c_0} = \text{cost} \quad \frac{\omega L}{c_0 Z^*} = \text{cost} \quad (3.5)$$

La prima condizione sancisce la inversa proporzionalit  fra la scala delle lunghezze e quella delle frequenze, altrimenti nota come **Teorema di Savart**: essa impone di estendere il dominio di frequenza studiato proporzionalmente al fattore di riduzione in scala, e pertanto limita la possibilit  di realizzare modelli minuscoli di ambienti enormi, poich  cos  facendo si otterrebbero frequenze talmente elevate da non poter essere studiate con le usuali strumentazioni. Va inoltre considerato che ad alta frequenza si modificano fortemente le caratteristiche del campo acustico, quali ad. esempio la velocit  del suono c_0 , e compare un rilevante assorbimento da parte dell'aria, per cui anche disponendo di strumentazioni apposite per le alte frequenze, il modello non fornirebbe la corretta risposta.

La seconda condizione permette di riprodurre correttamente le superfici di contorno, che in pratica debbono presentare la stessa impedenza acustica di quelle reali. Ciò non deve far pensare che si possano utilizzare gli stessi materiali dell'edificio vero, poiché in genere l'impedenza acustica varia con la frequenza, ed è necessario individuare materiali che alle alte frequenze del modello forniscano quell'impedenza che le pareti dello edificio reale forniscono alle frequenze consuete.

Le limitazioni prodotte dalle condizioni di similitudine individuate possono essere in parte superate ricorrendo a modelli nei quali il mezzo acustico è diverso dall'aria, poiché in questo caso è possibile limitare notevolmente l'incremento del campo di frequenze di indagine: è stato ad esempio mostrato come utilizzando Freon 12 si riduca del 60% l'incremento in frequenza [68].

Se l'ambiente non è troppo grande, si riescono tuttavia a realizzare validi modelli funzionanti anche in aria: ad esempio è stato costruito un modello in legno dell'Aula Magna della facoltà di Ingegneria di Bologna, visibile nelle figg. 3.1 e 3.2 [67]. Lo stesso ambiente è stato oggetto di approfondite indagini nel corso del presente lavoro, e la disponibilità del modello in scala ha consentito di eseguire utili raffronti, e di mettere a



Figg. 3.1 e 3.2: Modello in scala per lo studio della riverberazione della Aula Magna.

punto su di esso la procedura di misura.

I valori del tempo di riverberazione, misurati sul modello in una precedente ricerca, sono risultati molto prossimi a quelli determinati nel presente lavoro mediante misure dirette nell' aula, i cui risultati sono riportati nel cap. 6.

A volte non è richiesto di rispettare accuratamente la seconda condizione di similitudine, poiché non interessa misurare il tempo di riverberazione o la distribuzione del livello sonoro, ma solo determinare la direzione di provenienza ed il tempo di ritardo delle prime riflessioni. In questo caso è possibile realizzare le pareti del modello con svariati materiali, la cui unica caratteristica deve essere quella di fornire riflessioni sufficientemente forti. Ad esempio vengono realizzati modelli in poliuretano espanso rivestito di carta, un materiale economico e facilmente lavorabile: nelle figg. 3.3 e 3.4 si vede un modello attualmente in corso di ultimazione, che riproduce il Nuovo Teatro Comunale di Cagliari, attualmente in fase di allestimento.

Per effettuare misure acustiche su modelli in scala è usualmente preferibile utilizzare strumentazioni apposite: si ricorre a piccoli microfoni, sensibili anche agli ultrasuoni, e ad analizzatori in grado di estendere il campo di frequenza misurato fino a 100 kHz. Anche le

sorgenti sonore debbono essere in grado di emettere potenza a frequenze molto alte: per rumori stazionari si usano tweeter alimentati con appositi segnali ad alta frequenza, mentre nel caso di rumori impulsivi si è universalmente affermato l'impiego di scintille elettriche, che sono in grado di fornire energia fino a circa 200 kHz.

Sebbene il rapporto di scala abbastanza elevato non consenta di riprodurre l'interno dei teatri con grande dettaglio, le misure sui modelli fisici in scala hanno mostrato di essere molto utili per correggere difetti acustici ancora nella fase di progettazione dell'edificio, e consentono di saggiare con costi ragionevoli gli effetti di modifiche proposte su edifici già esistenti.

3.3 Modelli numerici

L' utilizzo di modelli numerici é diventato negli ultimi anni sempre piú frequente, poiché si é ridotto notevolmente il rapporto costo/prestazioni degli elaboratori elettronici, cosa che ne ha favorito enormemente la diffusione, e sono stati sviluppati algoritmi generalizzati per lo studio di problemi fisici complessi, applicabili a svariati sistemi, tra cui i campi acustici.

In genere i modelli numerici per l' acustica sono rivolti specificamente allo studio di un particolare aspetto del problema, poiché cosí facendo é possibile introdurre notevoli semplificazioni nelle ipotesi, tali da ridurre la complessità della soluzione.

Essi sono sostanzialmente divisi in due tipi: modelli che simulano la natura ondosa del campo acustico e modelli che considerano la propagazione sonora per raggi rettilinei.

I primi sono decisamente piú raffinati dei secondi, e si rivolgono allo studio di quei problemi nei quali la lunghezza d' onda del suono é confrontabile con le dimensioni fisiche delle superfici a contorno del campo acustico: casi tipici sono la ricerca delle frequenze di risonanza di una cavità [64], o lo studio della

distribuzione di pressione sonora in una cavità [65] prodotta da assegnate sollecitazioni esterne.

Riguardo la tecnica matematica utilizzata, prevale in questi modelli l' utilizzo di impostazioni di tipo integrale, che conducono ad individuare la soluzione minimizzando la variazione di un certo integrale esteso alla regione di spazio da studiare. La soluzione viene ottenuta suddividendo il dominio spaziale in un elevato numero di **elementi finiti**, tramite un opportuno reticolo di suddivisione; vengono considerate come incognite le pressioni sonore nei nodi di questo reticolo, ed imponendo la condizione di minimo dell' integrale esteso ai singoli elementi si ottiene un numero di equazioni risolutive pari al numero di incognite. La tecnica degli **elementi finiti** fornisce dunque una soluzione discretizzata, ed è necessario garantire che il passo della discretizzazione sia sufficientemente piccolo in rapporto alla lunghezza di onda del suono per evitare errori eccessivi.

La tecnica succintamente esposta è stata utilizzata con successo per la previsione dei campi sonori in piccoli ambienti, quali ad esempio l' abitacolo di veicoli [62].

L' utilizzo di questo tipo di formulazione non è però possibile per lo studio di grandi ambienti, a causa del vincolo sul passo della discretizzazione: sarebbe necessario infatti risolvere sistemi con miliardi di

incognite per studiare teatri di dimensioni anche modeste. Si ricorre pertanto all' ipotesi di propagazione per raggi rettilinei dell' energia sonora, secondo le ipotesi normalmente indicate con il termine **Acustica Geometrica**: essa é sì una semplificazione del problema rispetto ad uno studio di tipo ondulatorio, ma rimane notevolmente piú dettagliata della acustica statistica derivata dalle teorie di Sabine, che presuppone una uniforme distribuzione del campo sonoro.

L' acustica geometrica non tiene conto degli effetti di diffrazione prodotti dai bordi delle superfici, ma considera che i raggi sonori viaggino sempre in linea retta; quando incontrano un ostacolo, essi possono:

- a) essere riflessi specularmente, secondo le leggi della ottica.
- b) attraversare la superficie incontrata, venendo rifratti ancora secondo le leggi dell' ottica.
- c) essere riflessi in modo diffuso, secondo leggi di diffusione variabili.

In generale avvengono, sovrapposti, tutti e tre i fenomeni descritti, ognuno dei quali agisce su una certa frazione dell' energia del raggio incidente.

A seconda di come viene schematizzato il fenomeno, vengono definiti diversi tipi di modelli numerici basati sulle leggi della acustica geometrica. Nei successivi

sottoparagrafi verranno illustrati alcuni di questi modelli, attualmente utilizzati per lo studio dell'acustica di grandi ambienti, e verranno messe in luce le diverse possibilità di ciascuno di essi.

3.3.1 Tecnica delle sorgenti virtuali

Facendo riferimento alle ipotesi di riflessione prima descritte, la tecnica delle sorgenti virtuali ammette che una frazione a dell' energia incidente su una parete la attraversi, e vada dunque persa dal bilancio energetico dell' ambiente, mentre la frazione $(1-a)$ viene rinviata nell' ambiente secondo le leggi della riflessione speculare.

Fissata una posizione della sorgente sonora, ed un punto di ascolto, l' arrivo delle onde riflesse dalle pareti può essere "visto" come l' arrivo di onde dirette provenienti da dietro le pareti stesse, supposte trasparenti: queste onde dirette provengono da sorgenti virtuali, ottenute dalla immagine speculare della sorgente reale. La intensità di queste onde provenienti dalle sorgenti virtuali è legata alla potenza emessa dalla sorgente reale secondo la stessa legge che determina la intensità della vera onda diretta, e cioè:

$$I = \frac{W \cdot Q}{4 \pi r^2} \quad (3.6)$$

Nella quale I é l' intensità ricevuta, W la potenza della sorgente, Q é il fattore di direttività ed r é la distanza fra la sorgente e l' ascoltatore.

Nel caso delle sorgenti virtuali, la distanza r é ovviamente quella fra sorgente virtuale ed ascoltatore, che é poi uguale all' effettivo percorso del "raggio" sonoro riflesso. Va poi tenuto conto che, nella riflessione ("attraversamento") di una parete, la intensità si riduce del fattore $(1-a)$, e perciò la intensità calcolata con la (3.6) andrà moltiplicata per questo fattore.

I raggi che subiscono due riflessioni vengono anche essi visti come provenienti da una sorgente virtuale, stavolta del secondo ordine, ottenuta cioè dall' immagine speculare di una sorgente virtuale del primo ordine rispetto alla seconda parete su cui avviene la riflessione.

E' possibile considerare riflessioni di ordine N , sommando tutti i contributi energetici provenienti dalle riflessioni, supponendo per semplicità che il coeff. di assorbimento a sia costante, ed accumulando la intensità totale ricevuta nel punto di ascolto:

$$I = \sum_{n=1}^N \sum_{k=1}^K \frac{W \cdot Q}{4 \pi r_k^2} \cdot (1-a)^n \quad (3.7)$$

la prima sommatoria si riferisce all' ordine delle riflessioni; per ogni ordine si sommano poi i contributi di tutte le sorgenti virtuali, il cui numero K dipende dall' ordine stesso e dalla conformazione geometrica dello ambiente.

Al tendere di N all' infinito, la serie converge ad un valore finito, che rappresenta l' intensità a regime nel punto di ascolto; mediante un test di convergenza si può interrompere il calcolo quando l' intensità accumulata non varia più apprezzabilmente in seguito all' arrivo di un ulteriore ordine di riflessioni.

Il metodo appare, per come è stato definito, estremamente semplice: la difficoltà consiste nella individuazione della posizione delle sorgenti virtuali stesse, e nella discriminazione tra le sorgenti effettivamente "viste" dal punto di ascolto e quelle che risultano schermate da altre superfici. L' individuazione delle sorgenti virtuali è estremamente facile solo nel caso di ambienti parallelepipedi, poiché in questo caso può essere creata una griglia spaziale costituita da tante

celle uguali all' ambiente originale, ed in ciascuna delle quali la sorgente virtuale viene collocata mediante semplici regole di ribaltamento attorno ai piani di simmetria del parallelepipedo.

In fig. 3.5 é visibile una griglia bidimensionale, ottenuta mediante la costruzione geometrica descritta: si osserva che il numero delle sorgenti virtuali K cresce rapidamente con l' ordine N delle riflessioni, essendo infatti in questo caso $K=(N+1)^2$. Nel caso tridimensionale, il numero K é ovviamente uguale al cubo di $(N+1)$.

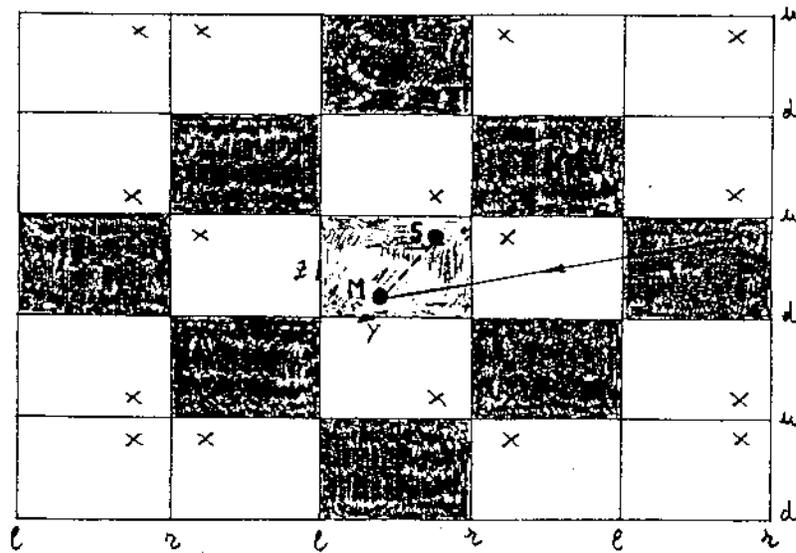


Fig. 3.5: Sorgenti virtuali generate da una camera rettangolare.

La possibilità di effettuare studi con elevato ordine delle riflessioni ($N > 30$) è dunque subordinata alla disponibilità di un calcolatore di dimensioni perlomeno rispettabili, che consenta di immagazzinare notevoli moli di dati e che sviluppi i calcoli necessari ad alta velocità. Nel caso però sia possibile ricorrere ad una schematizzazione bidimensionale, essendo due pareti molto lontane tra loro (ambiente a forma di tunnel), ovvero molto assorbenti, il problema diviene affrontabile con mezzi estremamente limitati.

L'estensione del metodo allo studio di ambienti non parallelepipedi ha avuto successo solo in casi geometrici particolarmente favorevoli, quali le coperture a falde inclinate. La applicazione del metodo delle sorgenti virtuali allo studio di ambienti di forma complessa è per ora del tutto sconsigliabile, perché occorre di fatto realizzare un programma di calcolo apposito per ogni diversa geometria studiata.

I risultati ottenibili dalla tecnica delle sorgenti virtuali sono abbastanza esaurienti, poiché in ogni punto dell'ambiente viene calcolata l'intensità complessiva ricevuta, è possibile conoscere il tempo di ritardo, la singola intensità e la direzione d'arrivo delle riflessioni; può pertanto essere ricostruita la risposta all'impulso fra sorgente ed ascoltatore, e possono essere

valutati i principali parametri fisici che descrivono la chiarezza del suono (ad es. la Deutlichkeit di Thiele) e la spazialità del campo acustico.

Utilizzando la tecnica della integrazione allo indietro della risposta all' impulso, illustrata nel par. 2.4.1, è infine possibile determinare il tempo di riverberazione dell' ambiente studiato.

In considerazione della sua applicabilità ad ambienti di forma parallelepipedica, la tecnica delle sorgenti virtuali ha avuto interessanti applicazioni nello studio dei problemi di rumorosità in edifici industriali, ma non è risultata molto proficua in campo teatrale, a causa delle complesse forme assunte dagli ambienti oggi progettati.

3.3.2 Tecnica del "Ray Tracing"

Questa tecnica deve il suo nome ad una schematizzazione ancora più semplificata del fenomeno della propagazione dell'energia sonora: nel metodo delle sorgenti virtuali, i "raggi sonori" sono pensati unicamente in funzione della determinazione delle sorgenti virtuali stesse, ciascuna delle quali irradia poi fronti d'onda sferici; nel caso del "ray tracing" si ammette che l'energia viaggi effettivamente convogliata sui raggi stessi, e non si disperda sfericamente.

La potenza W emessa dalla sorgente viene suddivisa in un certo numero p di raggi, la cui distribuzione angolare nello spazio può essere regolare ovvero dettata da un algoritmo casuale. Si ammette che ogni raggio parta con una potenza W/p , e che questa potenza si attenui del fattore $(1-a)$ ad ogni riflessione subita dal raggio; per il resto la propagazione avviene senza divergenza del raggio stesso, per cui non si ha attenuazione in base alla distanza percorsa. Il raggio viene riflesso dalle pareti incontrate o specularmente, o in una direzione casuale, generata al momento dell'impatto conformemente ad una certa distribuzione di probabilità assegnata.

L'ascoltatore è stavolta schematizzato con una

superficie finita, di area S : se il raggio, dopo un certo numero n di riflessioni, colpisce la superficie ricevente, comunica ad essa la potenza posseduta, pari ovviamente a $W/p \cdot (1-a)^n$. Non tutti i raggi giungono a colpire la superficie d' ascolto, e, per di piú, dopo un elevato numero di riflessioni la potenza di quelli che la colpiscono si é ridotta talmente che diviene trascurabile.

Dopo che l' elaboratore ha seguito la storia di tutti i raggi, é possibile calcolare l' intensitá ricevuta semplicemente come rapporto fra la potenza totale accumulata e l' area della superficie S (usualmente sferica).

Anziché prefissare il numero p di raggi, é anche possibile, se si utilizza la generazione casuale delle direzioni di partenza, arrestare l' elaborazione solo quando viene soddisfatto un criterio di convergenza o di stabilitá del risultato.

I vantaggi di questo metodo sono la possibilitá di studiare ambienti di forma irregolare, di introdurre superfici a riflessione non speculare (ció aumenta però la varianza del sistema, rendendo necessario aumentare notevolmente p), e di ottenere come risultato praticamente le stesse informazioni del metodo delle sorgenti virtuali, poiché anche qui é possibile ricostruire le risposte all' impulso, e sono note le direzioni d' arrivo delle onde

riflesse.

La tecnica del "ray tracing" ha però anche alcuni inconvenienti: innanzi tutto l'ascoltatore non è puntiforme, e pertanto i risultati dipendono dalla estensione della superficie ricevente S. La scelta della dimensione e forma più opportune per questa superficie va perciò fatta di volta in volta, e spesso procedendo per tentativi.

Altro inconveniente è poi il tempo di calcolo, che è direttamente proporzionale al numero p di raggi tracciati: questo numero deve essere molto elevato, se si vuole che il risultato sia attendibile. L'occupazione di memoria richiesta non è elevata, e l'utilizzo di grandi calcolatori è usualmente antieconomico, poiché essi sono particolarmente efficienti nella trattazione simultanea di grosse moli di dati, e non nella ripetizione iterativa di procedure concatenate. Ciò ha portato alla realizzazione di elaboratori dedicati alle tecniche numeriche di questo tipo, globalmente riconducibili nella casistica dei cosiddetti Metodi di Montecarlo.

Infine va segnalata la notevole difficoltà della rappresentazione numerica di ambienti complessi, poiché le superfici vanno suddivise in elementi piani che ricostruiscano il più possibile la forma complessiva, ed occorre assegnare di ogni elemento i confini, la

giacitura, ed il modello di riflessione.

Nonostante i difetti segnalati, la tecnica del "ray tracing" é oggi l' unica in grado di fornire tutte le risposte cercate al progettista teatrale, e sono addirittura presenti sul mercato figure professionali che eseguono previsioni con questa tecnica dietro compenso. La spesa per ottenere queste previsioni é spesso assai piú contenuta dei costi necessari a correggere a posteriori i difetti acustici che con la stessa vengono evitati.

3.3.3 Elementi acustici di superficie

La teoria degli elementi acustici di superficie rappresenta l'applicazione al campo acustico di un procedimento ben noto per il calcolo della distribuzione di temperatura in una cavità, a sua volta riconducibile alla soluzione di una rete elettrica equivalente.

Nonostante i precedenti indicati, verrà qui illustrata la formulazione della teoria direttamente in veste acustica, cosa che rappresenta un contributo originale nel campo delle tecniche di previsione numerica del campo sonoro.

Si consideri, in un ambiente chiuso o anche solo parzialmente chiuso, una sorgente sonora di potenza W ed un punto di ascolto R . La superficie di contorno della cavità è supposta suddivisa in un certo numero N di elementi, ciascuno dei quali abbastanza piccolo da potersi considerare uniforme il campo acustico incidente e reirradiato dall'elemento.

La potenza W giungerà anzitutto al ricevitore R tramite l'onda diretta, comunicandogli una intensità I pari, come nel caso delle sorgenti virtuali, a $W \cdot Q / (4\pi r^2)$. Analogamente, sull' i -esimo elemento giungerà una intensità espressa sempre allo stesso modo, ma con la

distanza r_{i1} fra sorgente ed elemento i . Sempre sullo stesso elemento giungeranno poi le intensità riemesse da tutti gli altri elementi, per cui si può valutare la intensità totale ricevuta dall' elemento i come:

$$I_i = \frac{W \cdot Q}{4 \pi r_{si}^2} + \sum_{j=1}^N \frac{W_{ej} \cdot F_{ji}}{2 \pi r_{ji}^2} \quad (3.8)$$

dove W_{ej} sono le potenze emesse dagli altri elementi (elementi j), r_{ji} sono le distanze fra gli elementi j e l' elemento i , e F_{ji} sono i fattori di vista fra gli elementi j e l' elemento i . Il fattore di vista é definito semplicemente come la frazione della potenza emessa dallo elemento j che va ad incidere sull' elemento i .

Come si vede, l' introduzione dei fattori di vista segue la stessa tecnica utilizzata nello scambio termico per irraggiamento: l' ipotesi che rende possibile questa schematizzazione é che la potenza emessa dagli elementi j venga emessa con una legge di diffusione indipendente dalla direzione di provenienza della potenza ricevuta, funzione al piú della sola direzione di emissione tramite una specie di "curva di emissione". La piú semplice ipotesi a questo riguardo é quella di diffusione uniforme,

anche se sono applicabili altre forme di diffusione (ad es. quella di Lambert, che prevede una intensità di emissione proporzionale al coseno dell' angolo fra la direzione di emissione e la normale alla superficie).

Il legame fra la intensità ricevuta e la potenza emessa, a regime, dall' elemento i-esimo è del tipo:

$$W_{ei} = I_i \cdot S_i \cdot (1-a) \quad (3.9)$$

Nella quale a è il coeff. di assorbimento apparente della superficie ed S_i è la area della superficie stessa. E' possibile affinare ulteriormente la simulazione, ammettendo che il coeff. a dipenda dalla direzione di arrivo della potenza incidente, e sia dunque un a_{ji} per la potenza ricevuta dagli altri elementi, ed un a_{oi} per la potenza ricevuta direttamente dalla sorgente. Con questa posizione, si ottiene:

$$W_{ei} = \frac{W_o}{4 \pi r_{si}^2} (1-a_{oi}) + \sum_{j=1}^N \frac{W_{ej} \cdot F_{ji}}{2 \pi r_{ji}^2} (1-a_{ji})$$

Questa equazione permette di legare la potenza emessa da un elemento con quella emessa dalla sorgente e da tutti gli altri elementi. Siccome é possibile scrivere una di queste equazioni per ciascun elemento di superficie, si ottiene un sistema di N equazioni in N incognite, lineare, che può essere facilmente risolto.

La soluzione del sistema può anche essere aggirata, mediante un procedimento iterativo di bilanciamento fra la potenza ricevuta e la potenza emessa, ripetuto per tutti gli elementi finché la potenza stessa si stabilizza.

La scelta dell' uno o dell' altro tipo di soluzione dipende dall' elaboratore a disposizione, poiché la soluzione matriciale comporta una grossa occupazione di memoria ed un ridotto tempo di calcolo, mentre la soluzione iterativa richiede ovviamente meno memoria, ma un tempo di calcolo ben più lungo.

Una volta risolto il sistema di equazioni, é nota la potenza emessa da tutte le superficie dell' ambiente, e si può quindi facilmente calcolare la intensità ricevuta in qualsiasi punto dello stesso. La soluzione é dunque valida simultaneamente per tutti i possibili ascoltatori, al contrario di quello che accadeva nel caso del "ray tracing", e si ottiene una drastica riduzione nel tempo di calcolo necessario per valutare l' intensità sonora in un

rilevante numero di punti dell' ambiente.

La tecnica degli elementi acustici di superficie consente la trattazione di ambienti di forma irregolare, con valori variabili del coeff. di assorbimento apparente, e con leggi di riflessione pure variabili (sempre nelle ipotesi, però, di diffusione: non è possibile considerare riflessioni speculari).

Il difetto consiste innanzitutto nel minor contenuto di informazioni ottenuto dalla simulazione, poiché si determina solo la distribuzione a regime del campo sonoro, ma non si conoscono direzioni, ampiezze e tempi di ritardo delle singole riflessioni. Inoltre usualmente la realtà fisica è più vicina alle riflessioni speculari che a quelle diffuse, e dunque è lecito aspettarsi una minore attendibilità che con i metodi prima descritti.

Nonostante i difetti accennati, è stato effettuato il confronto con la soluzione mediante sorgenti virtuali di un ambiente parallelepipedo, che ha mostrato una corretta previsione dei livelli sonori nei punti d' ascolto. E' attualmente in corso di ultimazione la messa a punto del metodo per lo studio di un ambiente reale, costituito dalla Aula Magna già illustrata nel par. 3.2, della quale esistono già i risultati sperimentali e quelli forniti dal modello fisico in scala. Se la verifica darà esito positivo, la nuova tecnica degli elementi acustici di

superficie potrà essere impiegata in tutti quei casi nei quali é sufficiente determinare la distribuzione del livello sonoro nell' ambiente, e non sono richieste dettagliate informazioni sulla struttura temporale e direzionale del campo sonoro.

In base a quanto illustrato, é lecito attendersi che la tecnica proposta troverá interessanti applicazioni nello studio del rumore in ambiente industriale, mentre potrà venire utilizzata in campo teatrale solo per la verifica della uniforme distribuzione del livello sonoro.

3.4 Modelli misti fisico-numeric

In questo paragrafo vengono illustrate le tecniche di ricostruzione del campo acustico effettivo tramite modelli: si tratta di produrre, in tempo reale o tramite registrazioni, gli stessi segnali sonori che sarebbero stati registrati nell' ambiente reale in seguito alla esecuzione di un brano musicale.

La procedura inizialmente utilizzata per produrre questo risultato [67] è basata su tecniche puramente fisiche: si tratta di realizzare un modello fisico dello ambiente da studiare, ed eseguire all' interno del modello la riproduzione del brano musicale tramite un registratore magnetico la cui velocità di trascinamento viene aumentata dello stesso fattore del rapporto di scala, registrando contemporaneamente mediante un altro registratore i segnali ricevuti nei voluti punti d' ascolto. Le registrazioni così ottenute vengono poi riascoltate a velocità ridotta, in modo da riportare il dominio delle frequenze alla sua scala originale.

Tramite questa tecnica sono state ottenute simulazioni giudicate molto soddisfacenti, sebbene in questo modo si introducano notevoli distorsioni dovute ai piccoli altoparlanti e microfoni impiegati, che non sono mai molto

fedeli.

Una procedura notevolmente piú raffinata é stata recentemente sviluppata [69], facente uso di moderne tecniche digitali di trattamento dei segnali. La base della simulazione é ancora un modello fisico in scala dell' ambiente, che viene utilizzato per la determinazione della risposta all' impulso fra la sorgente sonora (una scintilla) e le orecchie di una minuscola testa artificiale.

Le risposte all' impulso cosí ottenute vengono depurate dall' effetto di distorsione prodotto dai microfoni, mediante una tecnica di deconvoluzione denominata decomposizione a valore singolo: si tratta in pratica di effettuare un filtraggio digitale del segnale registrato, moltiplicando lo spettro $S(f)$ del segnale stesso per una funzione di filtro $K(f)$, definita come il reciproco dello spettro del segnale emesso dalla sorgente, se esso é maggiore di un certo delta, oppure zero, se lo spettro del segnale emesso é inferiore al delta prefissato. Ciò fa sí che vengano evitate le condizioni di singolaritá del filtro, poiché non accade mai che il valore di $K(f)$ possa andare all' infinito a certe frequenze.

Il segnale emesso dalla sorgente viene ottenuto semplicemente dall' onda diretta ricevuta, poiché la

durata del segnale stesso è inferiore al tempo di ritardo della prima riflessione. In questo modo il filtraggio inverso elimina non solo l'effetto della sorgente sonora, ma anche quello del microfono usato per la registrazione, e di tutta la catena elettrica di misura.

Una volta ottenute le risposte all'impulso pulite, esse vengono riconvolute con il segnale musicale anecoico digitalizzato del brano musicale voluto. La convoluzione viene effettuata moltiplicando gli spettri di una serie di segmenti del segnale anecoico per lo spettro della risposta all'impulso dell'orecchio voluto: scegliendo una opportuna sovrapposizione temporale dei segmenti temporali consecutivi, ed operando in modo da elidere gli effetti di bordo della finestra temporale adottata, si ricostruisce il segnale complessivo mediante trasformata di Fourier inversa dei prodotti degli spettri così ottenuti [70].

Allo stato attuale, la strumentazione non è così veloce da consentire una riconvoluzione in tempo reale: è pertanto necessario processare a bassa velocità i segnali musicali, registrando su un disco magnetico i risultati. E' poi possibile riconvertire ad alta velocità i segnali digitali in segnali analogici, trasferendoli su un registratore magnetico stereofonico per il successivo ascolto.

I risultati ottenuti da questa tecnica sono molto buoni, e consentono di "sentire" come si comporterà una sala ancor prima che venga costruita, ovvero di saggiare gli effetti di modifiche proposte in sale esistenti.

Sebbene non vengano quantificati descrittori fisici in forma numerica, è possibile operare confronti soggettivi con le registrazioni ottenute, e pertanto stabilire direttamente quale soluzione sarà più gradita.

Una ulteriore estensione del metodo illustrato potrebbe essere l' utilizzo di un modello numerico, anziché fisico, per il calcolo delle risposte all' impulso; si eviterebbe così di dover costruire modelli estremamente dettagliati e costosi, come la tecnica riportata richiede. A tutt' oggi questa ultima proposta non ha ancora visto realizzazioni pratiche, sebbene esse siano da attendersi entro breve tempo.

4° CAPITOLO

VALUTAZIONI SOGGETTIVE

4.1 Indagini statistiche

L'uso di indagini statistiche per lo studio della qualità acustica è da molto tempo lo strumento principale utilizzato per la comprensione dei complessi fenomeni di valutazione soggettiva. Sabine, ad esempio, si servì di un ristretto numero di musicisti per decidere il valore ottimale del tempo di riverberazione di una sala del conservatorio [1], sebbene a rigore egli non valutasse statisticamente le risposte dei soggetti, ma richiedesse al gruppo una risposta collegiale.

Ovviamente le indagini sulla qualità acustica delle sale furono inizialmente basate sulla reputazione delle sale stesse, attraverso ricerche che richiedevano la formulazione di giudizi sulle esperienze avute in sale conosciute. In tal modo vengono operati confronti fra eventi estremamente lontani nel tempo e nello spazio, ed è difficile che i risultati ottenuti da simili procedure forniscano validi risultati. In questo campo rimane classico l'esempio di Parkin [71], che nel 1952 pubblicò il risultato dell'analisi statistica di un questionario inviato a 170 esperti musicali, dei quali la maggior parte non erano musicisti, poiché l'autore riteneva che i giudizi degli esecutori di un brano fossero tendenzialmente discrepanti da quelli degli spettatori.

Solo 42 questionari furono analizzati statisticamente, poiché gli altri esperti o non risposero alle domande o risultarono privi di una sufficiente conoscenza comparativa delle sale in esame (12 vecchie sale da concerto inglesi). Veniva chiesto semplicemente, per ogni sala, di esprimere uno dei tre possibili giudizi di qualità: buono, mediocre, cattivo. I risultati furono abbastanza coerenti, ma non evidenziarono un legame evidente con il tempo di riverberazione, poiché le prime tre sale classificate presentavano un T pari rispettivamente a 1.6 , 1.1 e 2.2 s.

Anche Beranek [15] utilizzò questionari per valutare la reputazione delle 52 sale da lui studiate, ma non utilizzò esplicitamente una trattazione statistica dei risultati, riconducendo le risposte a categorie di giudizio predefinite in base a criteri del tutto estranei all'analisi stessa dei dati.

Va notato comunque che fu subito chiara una differenza metodologica sostanziale fra due tipi contrapposti di formulazione dei giudizi: da un lato viene chiesta unicamente una valutazione di qualità complessiva, o per meglio dire di preferenza, mentre dall'altro si cerca di evidenziare numerosi, distinti aspetti soggettivi della percezione del suono, cui di volta in volta sono stati assegnati svariate denominazioni quali intimità,

chiarezza, calore, pienezza, etc. . Il secondo approccio consente sicuramente un maggior dettaglio nei giudizi, ancor più se per ogni aspetto soggettivo viene chiesto di assegnare un punteggio; purtroppo ciò rende estremamente più complessa la trattazione successiva dei dati, e per di più è stato provato che la scelta delle denominazioni degli aspetti studiati ed il loro numero influenzano notevolmente i risultati, i quali divengono perciò scarsamente confrontabili.

Ai di là della scelta del tipo di questionario, è evidente che le statistiche soggettive sono tanto più valide quanto minori sono i fattori esterni che intervengono sul giudizio: è inevitabile infatti che i soggetti giudichino non solo quanto sentono, ma anche quanto vedono, e che siano influenzati da svariati fattori quali la comodità dei sedili di sale diverse, il confort termoigrometrico, le condizioni psicofisiche, etc. . Sarebbe necessario evitare tutte queste interferenze, rendendo possibili in rapida successione confronti di sale diverse.

La soluzione a questo problema è stata ottenuta grazie alla tecnica della presentazione in camera anecoica di brani musicali registrati con tecnica binaurale in sale diverse, o in diversi posti della stessa sala. Questa tecnica, sviluppata contemporaneamente dai gruppi di

Göttingen [20] e di Berlino [21], consiste nella creazione di spezzoni musicali di prova, ottenuti irradiando nello ambiente in esame musica anecoica attraverso un altoparlante (questa è la procedura usata dal gruppo di Göttingen), ovvero facendo eseguire nelle diverse sale dalla stessa orchestra lo stesso brano musicale (come invece è stato fatto dal gruppo di Berlino): teste artificiali, piazzate nei punti di misura, consentono poi la registrazione stereofonica dei segnali di prova.

Le registrazioni vengono in seguito fatte ascoltare ai gruppi di ascolto tutte in uno stesso ambiente, in rapida successione: in questo modo è possibile effettuare confronti comparati, in assenza di tutti i fenomeni di disturbo su riportati. I risultati migliori si ottengono se i soggetti non conoscono la provenienza delle registrazioni ascoltate, poiché altrimenti i giudizi vengono influenzati, anche inconsciamente, dalla reputazione delle varie sale.

La tecnica di riproduzione adottata dal gruppo di Göttingen prevede l' utilizzo, in camera anecoica, di due altoparlanti alimentati con i segnali registrati tramite i microfoni aurali, filtrati in modo da eliminare l' ascolto incrociato del suono proveniente dall' altoparlante opposto all' orecchio voluto. Viceversa il gruppo di Berlino ha utilizzato la riproduzione tramite cuffia

stereofonica, cosa che consente di eseguire contemporaneamente il test su un elevato numero di persone, ma che produce alcuni problemi di localizzazione della sorgente (confusione antero-posteriore) e rende esagerata l' impressione spaziale.

Dal punto di vista della tecnica di indagine, le procedure di confronto di brani registrati danno le più ampie garanzie di obbiettività e ripetibilità: la corretta deduzione di risultati significativi da questi tests dipende dunque solo da una appropriata trattazione statistica dei dati così ottenuti.

4.2 Analisi dei dati

Una corretta procedura di indagine statistica consente di ottenere dati significativi sui giudizi espressi da un numero elevato di soggetti. Per estrarre da questi giudizi le informazioni che interessano, in particolare l'influenza delle caratteristiche oggettive del campo acustico sui giudizi stessi, è stata sviluppata una teoria di analisi statistica denominata **analisi dei fattori** [72]: in questo contesto con il termine "fattore" si intende esclusivamente un aspetto indipendente (fisico o no) che influenza significativamente i giudizi.

L'analisi dei fattori è un metodo del tutto generale di trattazione statistica, che può essere applicato allo studio sia delle variabili oggettive, che di quelle soggettive: in entrambi i casi i dati di partenza sono raggruppati in una matrice. Si consideri prima l'analisi di dati oggettivi; la matrice ha per righe i valori di parametri oggettivi diversi (ad es. tempo di riverberazione, livello, IACC, etc.), mentre ogni colonna si riferisce ad un diverso punto di misura (anche in sale diverse). Nel caso dell'analisi di dati soggettivi, ogni riga corrisponde ad un diverso aspetto del giudizio, ed ancora ogni colonna corrisponde ad un diverso punto di misura (o diverso brano musicale). Nel primo caso gli

elementi della matrice sono i valori dei parametri fisici misurati nei vari punti, mentre nel secondo caso sono i punteggi complessivi assegnati a ciascun aspetto del giudizio soggettivo per il campo acustico presentato.

Lo scopo della analisi dei fattori è quello di esprimere la matrice [x], formata dalle n righe ed N colonne dei dati di partenza con il prodotto di altre due matrici, [w] e [f], dette rispettivamente matrice dei pesi e matrice dei fattori:

$$\begin{bmatrix} x_{i1} & \dots & x_{iN} \\ \vdots & & \vdots \\ x_{ni} & \dots & x_{nN} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} w_{11} & \dots & w_{1m} \\ \vdots & & \vdots \\ w_{ni} & \dots & w_{nm} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} f_{11} & \dots & f_{1N} \\ \vdots & & \vdots \\ f_{m1} & \dots & f_{mN} \end{bmatrix} \quad (4.1)$$

la seconda è costituita da un numero m di righe pari al numero di fattori indipendenti, e da un numero N di colonne (rappresenta dunque il valore dei fattori in ogni punto di misura), mentre la prima è costituita di un numero n di righe e da un numero m di colonne (ogni colonna rappresenta dunque il peso assegnato ai fattori sull'aspetto corrispondente dei dati).

Un esempio pratico chiarisce meglio la trattazione: si consideri l'analisi di dati oggettivi, costituita dalla

determinazione del livello d' ascolto, del tempo di riverberazione e del tempo di ritardo della prima riflessione in 7 diverse sale. Il numero di aspetti oggettivi è dunque $n=3$, mentre il numero di punti di misura è $N=7$; dall' analisi fattoriale, si evidenzia che due soli fattori sono in grado di spiegare i risultati ($m=2$), ciascuno dei quali ha un peso diverso sul valore complessivo di ciascuno dei 3 aspetti oggettivi. I dati iniziali, contenuti in una matrice 3×7 , vengono espressi dal prodotto della matrice dei pesi 3×2 e della matrice dei fattori 2×7 .

Essendo i due fattori indipendenti (per definizione), è possibile rappresentare tutti i dati ottenuti su un diagramma cartesiano, aventi per assi i due fattori stessi. In base al valore dei pesi assegnati al legame fra ciascun fattore e ciascun aspetto oggettivo, è anche possibile disegnare un punto corrispondente a ciascuno dei parametri oggettivi di partenza; questo punto è tanto più vicino all' asse di un fattore, quanto più esso pesa su quel parametro oggettivo. E' altresì possibile calcolare il grado di correlazione fra i valori dei parametri fisici stessi, in base alla distanza fra i loro punti rappresentativi.

La trattazione analitica che porta all' ottenimento delle due matrici cercate può essere vista come l' analogo

della soluzione di un problema matematico degli autovalori, o come la ricerca degli assi principali di inerzia di un corpo rigido. Esistono ormai procedure standardizzate per la soluzione di questi problemi. Se comunque $m < n$, in generale non è possibile individuare una soluzione esatta al problema, e si cerca dunque una soluzione approssimata servendosi del metodo dei minimi quadrati. Il grado di approssimazione ottenuto può essere valutato dalla varianza normalizzata dei fattori stessi; essa rappresenta la frazione della varianza complessiva dei dati di partenza che viene "spiegata" dal fattore in questione. La somma delle varianze normalizzate dei fattori non raggiunge mai l'unità, a meno che il numero di fattori sia uguale a quello degli aspetti fisici studiati; il grado di approssimazione ottenuto è tanto migliore quanto più bassa è la "varianza non spiegata".

L'approccio comunemente seguito è quello di effettuare anzitutto una soluzione analitica esatta con $n=m$, valutare l'importanza relativa dei fattori ottenuti, e poi scartare quelli poco significativi in modo da ridurre il grado di complessità del problema (si cerca usualmente di portarsi con $m=2$, in modo da poter ottenere rappresentazioni grafiche sul piano).

Anche senza ridurre il numero di fattori rispetto al numero di aspetti fisici si ottiene un risultato utile

dall' analisi dei fattori, poiché si hanno a disposizione parametri **indipendenti** al posto di quelli di partenza, tutti più o meno correlati.

Classiche analisi di questo tipo hanno consentito lo studio dei principali aspetti soggettivi della percezione sonora: si riportano qui, a titolo di esempio, i risultati ottenuti da Wilkens [73], che studiò i punteggi ottenuti da un questionario che prevedeva una scala di valutazione di 6 punti relativa a queste coppie contrapposte di aspetti soggettivi (il punteggio 6 viene assegnato al termine di destra, 1 a quello di sinistra):

1 small	...	large
2 pleasant	...	unpleasant
3 unclear	...	clear
4 soft	...	hard
5 brilliant	...	dull
6 rounded	...	pointed
7 vigorous	...	muted
8 appealing	...	unappealing
9 blunt	...	sharp
10 diffuse	...	concentrated
11 overbearing	...	reticent
12 light	...	dark
13 muddy	...	transparent
14 dry	...	reverberant
15 weak	...	strong
16 emphasized	...	treble
treble		not emphasized
17 emphasized	...	bass
bass		not emphasized
18 beautiful	...	ugly
19 soft	...	loud

Le coppie sono state riportate in inglese, poiché la traduzione in italiano porta ad un appiattimento della terminologia.

L'analisi operata da Wilkens considera dunque 19 aspetti soggettivi, mentre considera come "punti di misura" i singoli questionari riempiti, indipendentemente dal fatto che fossero prodotti da persone diverse o con riferimento a brani musicali o punti d'ascolto diversi.

Il numero N di questionari è molto grande, per cui la analisi statistica ha consentito di approssimare bene la soluzione esatta con un ridotto numero di fattori (si consideri anche che molti aspetti soggettivi sono fortemente correlati).

In fig. 4.1 sono visibili i risultati in forma grafica: sono stati individuati 3 fattori, per cui è stato necessario proiettare su 2 piani coordinati i punti disegnati nello spazio tridimensionale. La distanza fra i punti rappresentativi degli aspetti soggettivi è un indice del grado di correlazione fra gli stessi; alcuni aspetti sono sinonimi di buona qualità (pleasant, beautiful), per cui è possibile valutare l'influenza degli altri aspetti sulla qualità complessiva.

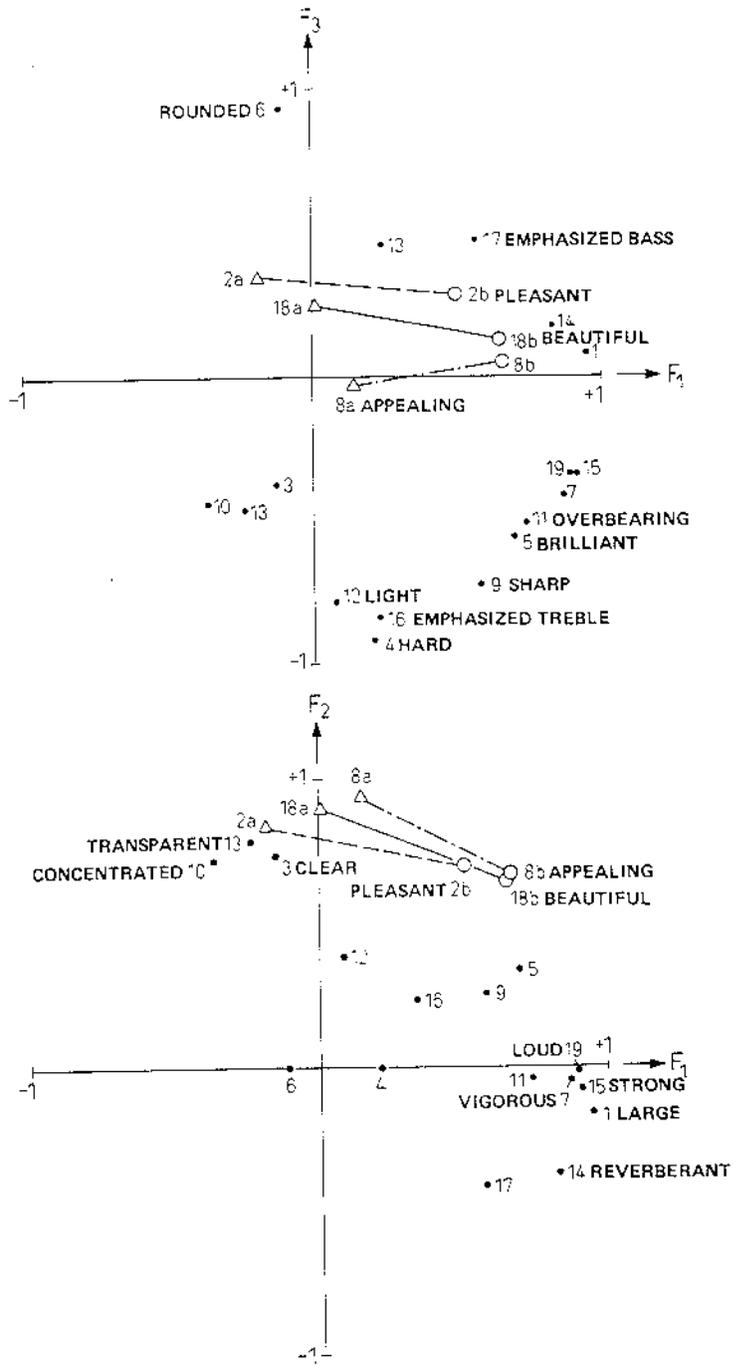


Fig. 4.1: Proiezioni su due piani dello "spazio delle preferenze" ottenuto da Wilkens.

I limiti dell' analisi dei fattori degli aspetti soggettivi discendono però dalla difficile utilizzabilità operativa dei risultati, poiché la conoscenza della importanza di alcuni aspetti invece che di altri non fornisce immediatamente i valori ottimali da imporre, e non consente di evidenziare i legami fra aspetti soggettivi ed oggettivi del campo acustico. Inoltre è stato accertato che la scelta dei parametri soggettivi, dei loro nomi, del loro numero, ed infine dei brani musicali adottati, influenzano in modo rilevante i risultati dell' analisi, e rendono tutto sommato poco convincente la apparente quasi-cerchezza di tipo statistico indicata da una elevata percentuale spiegata della varianza.

Per ottenere le informazioni volute, si è rivelata molto più proficua l' analisi dei giudizi comparativi, che ha fornito al gruppo di Gottingen i risultati più proficui.

4.3 Giudizi comparativi

La tecnica dei giudizi comparativi non è semplicemente un diverso modo di estrarre informazione dai risultati statistici, ma piuttosto una differente impostazione del concetto di valutazione soggettiva. Anziché richiedere ai soggetti una valutazione assoluta della qualità acustica o di particolari sensazioni uditive, si chiede semplicemente di scegliere la presentazione musicale preferita fra una coppia di presentazioni, ottenute dallo stesso brano musicale registrato in punti diversi.

In questo modo il giudizio non è influenzato da numerosi fattori contemporaneamente, ma solo dalle effettive **differenze** fra i due brani presentati. Sottoponendo un elevato numero di presentazioni ad un elevato numero di soggetti, si può ottenere un punteggio per ciascuna presentazione semplicemente sommando il numero di volte che essa è stata preferita da un soggetto. Si ricostruisce così una matrice dei giudizi di preferenza, avente tante righe quante le presentazioni musicali e tante colonne quanti i soggetti.

Una analisi di questo tipo è stata effettuata da Siebrasse [74], che ha studiato i giudizi di 13 soggetti su 25 sale da concerto (molte delle quali con più di un punto di misura). Le varianze normalizzate dei primi

7 fattori spiegano già il 99% della varianza complessiva, come è mostrato dalla fig. 4.2. E' stata adottata poi la ulteriore semplificazione di considerare solo i primi 4 fattori, che spiegano il 91% della varianza. La rappresentazione grafica è quadridimensionale, per cui è stato necessario effettuare tre proiezioni su tre piani coordinati, sulle quali sono rappresentati sia il valore dei fattori in corrispondenza ai punti di misura, sia i pesi assegnati da ciascun soggetto a ciascun fattore.

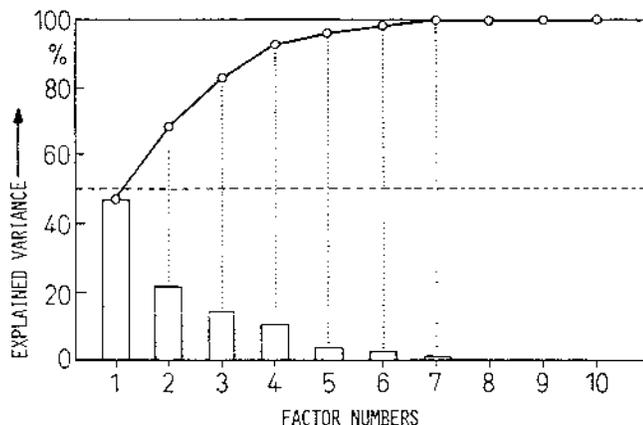
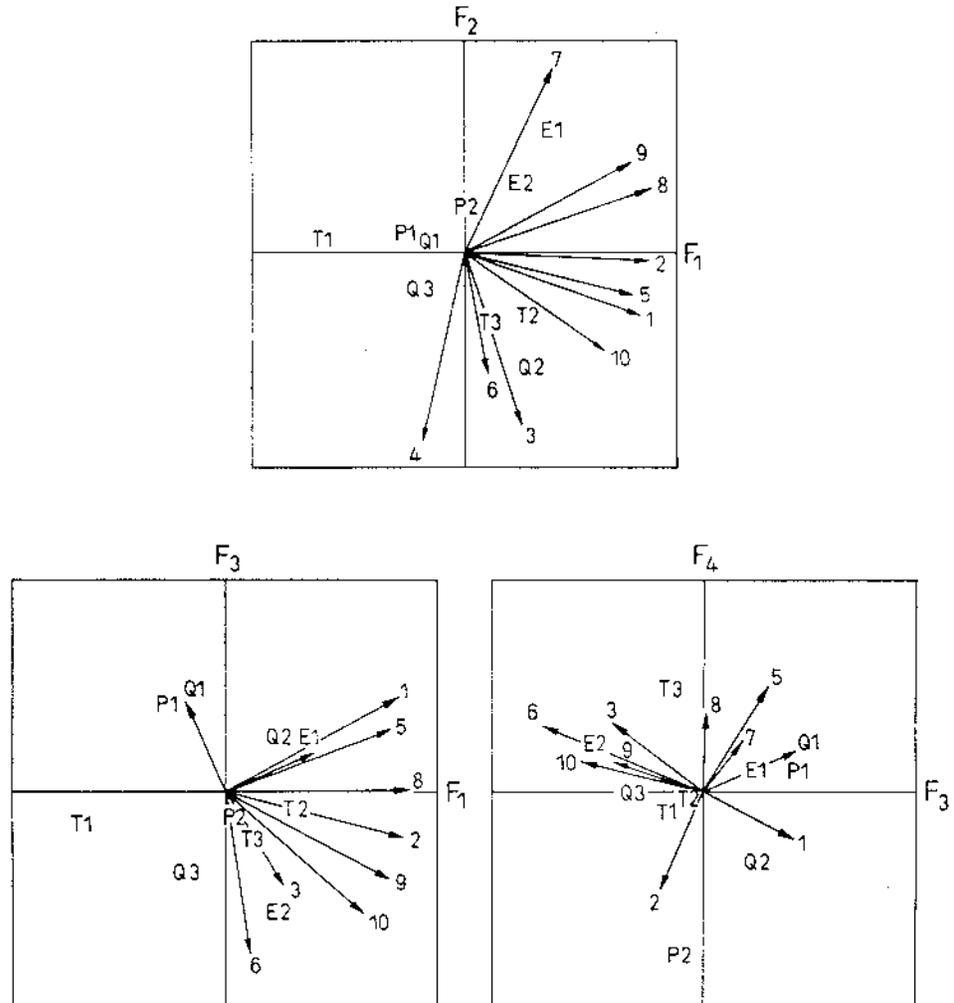


Fig. 4.2: Percentuali della varianza complessiva spiegate dai fattori ottenuti da Siebrasse.



Representation of a four-dimensional factor space by three factor-planes. The letters denote different halls, their indices denote different seats in them, and the straight lines with numbers correspond to different test persons. (After Siebrasse.)

Fig. 4.3: Proiezioni su tre piani dello "spazio delle preferenze" ottenuto da Siebrasse "didascalia originale).

In fig. 4.3 si possono osservare le tre proiezioni suddette: in particolare si nota che tutti i soggetti, tranne uno, danno peso positivo al fattore F_1 , che può dunque essere considerato il "fattore di consenso". Viceversa per gli altri fattori i soggetti considerati danno pesi estremamente variabili, non mostrando neppure una qualche tendenza al raggruppamento in gruppi dai gusti simili.

La qualità acustica delle varie sale può essere pertanto ritenuta elevata se il punto rappresentativo della sala stessa si trova ad avere un alto valore di F_1 , ed è così possibile realizzare una scala di qualità (o meglio di preferenza) che consenta di affermare se uno degli ambienti studiati è migliore di un altro e di quanto.

L'analisi eseguita secondo la tecnica di Siebrasse è priva degli effetti negativi legati all'uso di categorie di giudizio mal definite ed in parte interdipendenti, e consente in linea di principio di valutare **comparativamente** la qualità acustica di tutte le sale da concerto del mondo. È anche possibile raffrontare fra loro i risultati di analisi comparative diverse, tramite artifici matematici che rendono sovrapponibili le scale di qualità, purché le analisi diverse comprendano un certo numero di sale in comune.

Nonostante che la tecnica delle indagini comparative rimuova molti dei vincoli presenti nella analisi dei fattori di giudizio assoluti, è stata sentita l'esigenza di correlare i risultati soggettivi al valore numerico dei parametri oggettivi usati per descrivere le caratteristiche fisiche del campo acustico. Ciò è stato reso possibile dall'introduzione dei parametri oggettivi stessi quali variabili dipendenti dei fattori ottenuti: in pratica, dopo l'analisi dei tests di preferenza e la determinazione dei valori dei fattori per ogni presentazione musicale, si cerca la relazione matriciale che collega i fattori stessi ai parametri oggettivi corrispondenti a ciascuna presentazione. Ciò corrisponde a considerare la matrice dei fattori come il risultato del prodotto di una matrice dei pesi per la matrice dei valori dei parametri oggettivi nelle varie presentazioni:

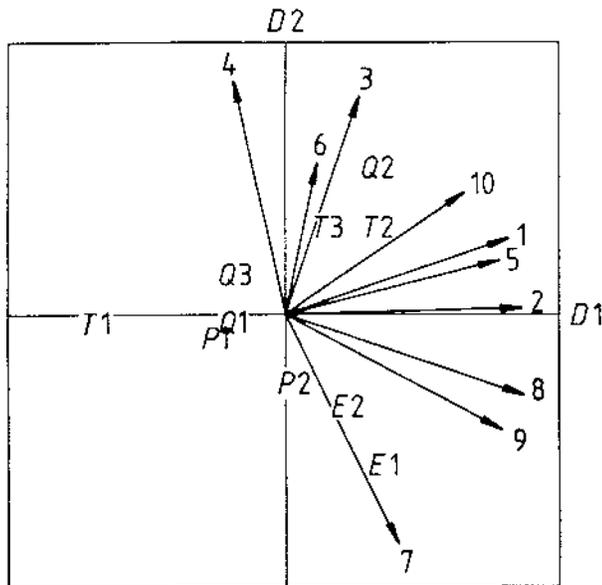
$$\begin{bmatrix} f_{11} & \dots & f_{1N} \\ \vdots & & \vdots \\ f_{m1} & \dots & f_{mN} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} c_{11} & \dots & c_{1q} \\ \vdots & & \vdots \\ c_{m1} & \dots & c_{mq} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} p_{11} & \dots & p_{1N} \\ \vdots & & \vdots \\ p_{q1} & \dots & p_{qN} \end{bmatrix} \quad (4.2)$$

in cui q è il numero di parametri oggettivi considerati, m è il numero di fattori significativi e N è il numero di

diverse presentazioni musicali (ottenute da diversi posti in diverse sale).

Apparentemente si tratta ancora della soluzione di un problema agli autovalori come nel caso della individuazione dei fattori, ma in effetti in questo caso sono già determinate sia la matrice $[f]$, sia la matrice $[P]$, per cui si tratta semplicemente di risolvere un sistema lineare di equazioni per determinare la matrice dei coefficienti $[c]$; dall'analisi statistica del legame funzionale indiretto fra i parametri oggettivi ed i fattori indipendenti può poi venire calcolato il coefficiente di correlazione fra i parametri oggettivi ed i fattori indipendenti. Spesso si ottiene una miglior correlazione utilizzando, come variabili P nella matrice dei parametri oggettivi, non direttamente i valori numerici dei parametri, ma loro funzioni esplicite (ad esempio il logaritmo del valore).

Una analisi di questo tipo è stata svolta da Gottlob, Schroeder e Siebrasse [75]: essi hanno utilizzato 10 presentazioni musicali, provenienti da sedili situati in 4 sale dal tempo di riverberazione piuttosto breve, e 10 soggetti. Nella figura 4.4 è visibile il risultato della analisi dei fattori dei giudizi comparativi ottenuti: sono stati ottenuti 3 soli fattori, dei quali il terzo ben poco influente rispetto ai primi due, e dotato di una vasta

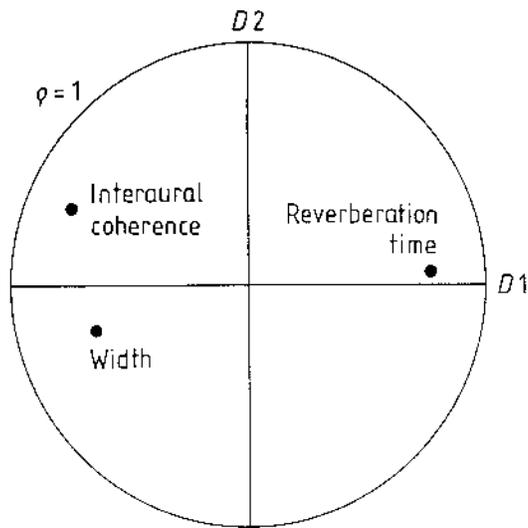


Preference space for 10 seats in 4 concert halls with reverberation time less than 2.2s. Dimension D1 is called "consensus preference", and D2 reflects individual preference differences (10 sound fields and 10 German subjects) E, P, Q, T denote sound fields from corresponding concert halls; numbers 1-10 denote subjects

Fig. 4.4: Proiezione su un piano dello spazio delle preferenze ottenuto da Gottlob, Schroeder e Siebrasse (didascalia originale).

dispersione dei coeff. di peso dei soggetti; è stata quindi considerata la sola proiezione dello "spazio delle preferenze" sul piano definito dai primi due fattori. Anche in questo caso il primo fattore (qui chiamato D1) mostra peso positivo per tutti i soggetti tranne uno, per cui è stato considerato come indice del consenso ("consensus preference"), mentre il secondo fattore viene considerato un indice delle differenze individuali di gusto.

Sono stati calcolati i coefficienti di correlazione fra alcuni parametri oggettivi ed i due fattori più



Correlation of three objective parameters with dimensions D1 and D2

The IACC has the highest negative correlation with D₁, "consensus preference"

Fig. 4.5: Correlazione fra parametri oggettivi e fattore F₁ (didascalia originale).

significativi citati: in fig. 4.5 è rappresentata graficamente la correlazione fra 3 parametri ed i fattori. Va notato che in questa analisi sono stati considerati i valori assoluti dei parametri fisici, e che tutte le presentazioni musicali venivano eseguite allo stesso livello d'ascolto (80 dB(A)). Si nota una forte correlazione positiva tra il consenso ed il tempo di riverberazione, mentre la correlazione è negativa per la IACC e la larghezza della sala: ciò significa che un tempo di riverberazione troppo breve è sgradito, mentre sono gradite sale strette (forti riflessioni laterali) e dotate

di bassa coerenza inter-aurale.

Il significato di analisi combinate oggettive-soggettive quale quella qui citata è evidentemente molto più comprensibile dei risultati ottenuti dai giudizi di qualità per categorie. E' bene però tenere conto che le particolari sale analizzate influenzano i coefficienti di correlazione ottenuti, e non è pertanto possibile generalizzare i risultati a situazioni diverse da quelle studiate; se ad esempio si analizzano solo sale con tempo di riverberazione eccessivo, si ottiene una correlazione **negativa** fra questo parametro oggettivo ed il consenso.

E' tuttavia possibile normalizzare il valore dei parametri oggettivi tramite opportuni legami funzionali, in modo che i risultati dell'analisi di sale diverse, con soggetti diversi, siano del tutto consistenti; ciò è lecito però solo nell'ipotesi che i parametri oggettivi considerati siano tra loro statisticamente indipendenti.

4.4 Scale di valutazione della preferenza

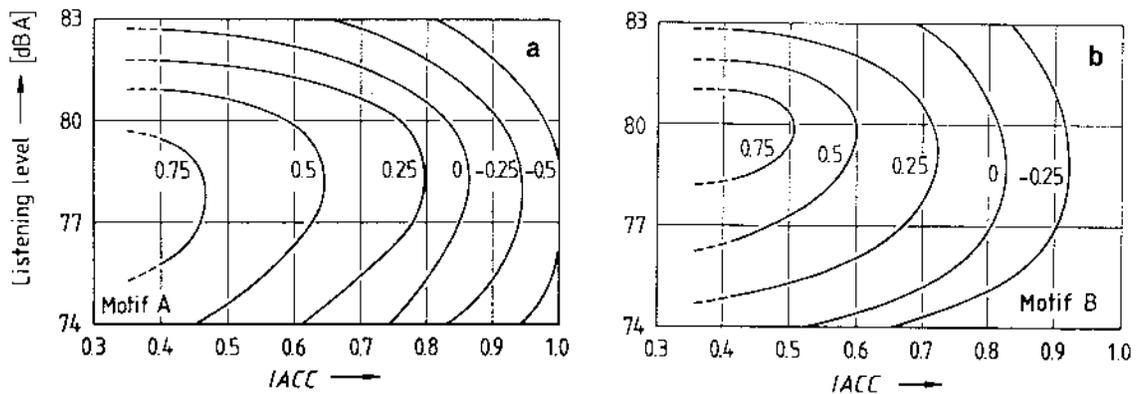
Nella ipotesi che esista un certo numero di parametri oggettivi **indipendenti** che influenzano il giudizio di preferenza, è possibile ottenere per ciascuno di essi una scala di valutazione lineare della preferenza, e si può quindi valutare la preferenza complessiva di un campo acustico qualsiasi sommando i valori di preferenza parziale ottenuti dalle scale dei parametri indipendenti. Ciò costituisce l' applicazione del principio di sovrapponibilità degli effetti, insito nelle ipotesi di linearità delle scale di preferenza e di indipendenza dei parametri di partenza.

In base ai risultati ottenuti da Ando e coll. riguardo le condizioni d' ascolto preferite (già citati nel cap. 1) [32,34,35,36], si può ipotizzare che quattro parametri fisici influenzino indipendentemente la qualità acustica: livello di ascolto, tempo di riverberazione, tempo di ritardo della prima riflessione (ITDG), coerenza inter-aurale (IACC).

Rielaborando i dati ottenuti dall' analisi dei fattori dei giudizi di preferenza, secondo le diverse combinazioni di variabilità di due parametri, con gli altri due mantenuti costanti al valore preferito, Ando è riuscito a

definire il legame funzionale fra i parametri oggettivi stessi ed il "fattore di consenso" F_1 ; questo legame è stato riportato in forma grafica per ciascuna coppia di parametri variabili.

Nella fig. 4.6 è visibile ad esempio il legame fra il fattore di consenso e la coppia livello d'ascolto-IACC, per due diversi brani musicali [39]: le curve rappresentano il luogo dei punti di uguale preferenza. Si nota che i due parametri non sono effettivamente del tutto indipendenti, poiché il valore del livello che rende massima la preferenza varia leggermente al variare della IACC.

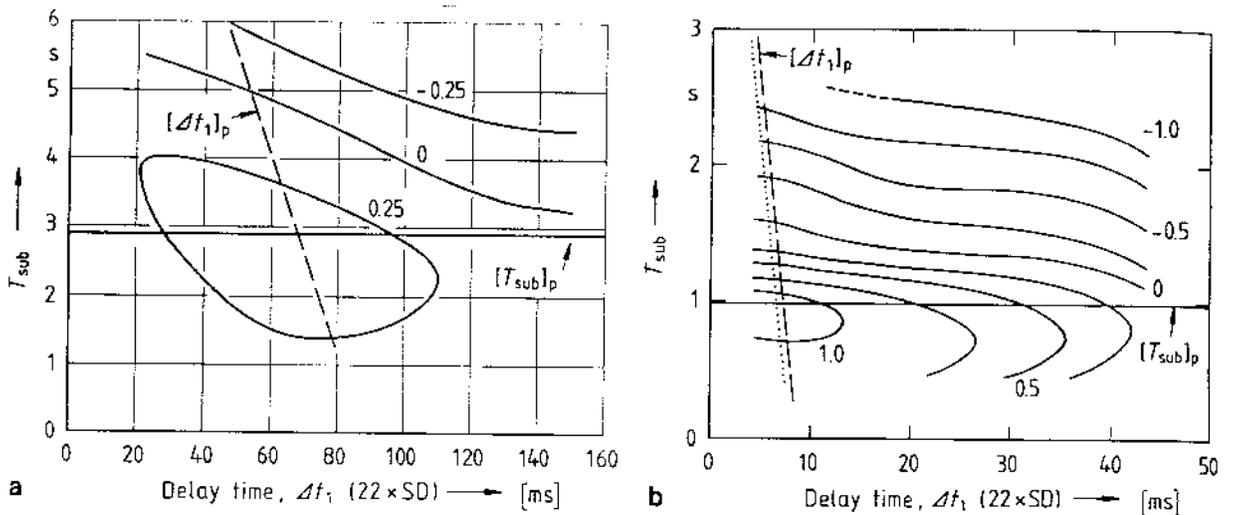


Contour lines of equal preference for the sound fields vs IACC and listening level (12 sound fields) (a) Music motif A (Gibbons), (16 Japanese subjects); (b) music motif B (Arnold), (16 Japanese subjects)

Fig. 4.6: Fattore di consenso F_1 in funzione del livello d' ascolto e della IACC (didasc. orig.).

Questo effetto è comunque poco pronunciato, ed è possibile accettare l'ipotesi di mutua indipendenza. Anche l'influenza del brano musicale appare trascurabile.

Nella fig. 4.7 è invece visibile il legame fra il consenso e la coppia di parametri tempo di riverberazione soggettivo (T_{sub}) e ITDG, per gli stessi due brani musicali [38]. Sui diagrammi è anche riportato il luogo dei punti che rendono massima la preferenza per ciascuno dei due parametri, e si nota che mentre il valore preferito del tempo di riverberazione non dipende dallo ITDG, il valore preferito di quest'ultimo dipende



Contour lines of equal preference for the sound fields vs Δt_1 (or SD) and T_{sub} . The dashed line is the preferred value of the initial time-delay gap between the direct sound and the first reflection, The solid line is the preferred value of the subsequent reverberation time, (a) Music motif A (Gibbons), (9 Japanese subjects); (b) music motif B (Arnold), (14 Japanese subjects)

Fig. 4.7: Fattore di consenso F_i in funzione del tempo di ritardo della prima riflessione e del tempo di riverberazione (didasc. orig.).

leggermente dal primo (i valori preferiti si trovano su una retta non perfettamente verticale); anche in questo caso i due parametri possono essere considerati con sufficiente approssimazione indipendenti.

Osservando le differenze fra i due diagrammi, si nota che stavolta i valori del fattore di consenso dipendono fortemente dal tipo di brano musicale; se però si normalizzano i parametri oggettivi rapportandone il valore effettivo al valore preferito (che dipende, come è stato visto nel cap. 1, dalla durata effettiva della funzione di autocorrelazione del brano musicale), si ottiene un legame funzionale fra il fattore di consenso e la coppia tempo di riverberazione - ITDG praticamente indipendente dal brano musicale stesso.

Utilizzando la stessa tecnica di normalizzazione per il livello di ascolto, ma in termini di differenza fra il livello effettivo e quello preferito per il brano musicale adottato, viene ulteriormente migliorata la similitudine fra le curve riportate nella precedente figura 4.6.

Infine è stata studiata la coppia tempo di riverberazione - IACC, della quale purtroppo non è stato pubblicato il diagramma funzionale [40]; comunque lo utilizzo del tempo di riverberazione normalizzato al valore preferito consente anche in questo caso di rendere il legame funzionale indipendente dal brano musicale

adottato.

Le indagini psicofisiche suddette sono state eseguite con soggetti e campi acustici diversi, pertanto non è possibile sovrapporre direttamente i valori dei fattori di consenso ottenuti da esse. In particolare, estraendo il legame funzionale fra ogni singolo parametro ed il fattore di consenso, esso differisce in generale per una costante moltiplicativa ed una costante additiva dal legame funzionale dello stesso parametro determinato in una diversa indagine. Si può cioè ammettere che esista una funzione $g(x_i)$ del parametro x_i (normalizzato, per quanto detto sopra) indipendente dalla particolare analisi svolta, funzione che è legata al fattore di consenso effettivamente ottenuto dalla:

$$F_i = A + g(x_i) \cdot B \quad (4.3)$$

Nella quale le costanti A e B dipendono dalla particolare analisi svolta.

E' quindi possibile ridurre i legami funzionali ottenuti graficamente ad una unica scala di preferenza, mediante l'applicazione agli stessi di un fattore di scala (1/B) e di uno slittamento dell'origine (-A/B). La

indipendenza dei parametri consente poi di imporre uno slittamento dell'origine arbitrario, dal momento che la scala della preferenza non fornisce una indicazione assoluta ma solo relativa della qualità acustica; è stato pertanto scelto di annullare il valore dell'indice di consenso nella condizione preferita, imponendo per ogni parametro l'uguaglianza della costante A al valore del fattore F_1 massimo corrispondente alla condizione preferita.

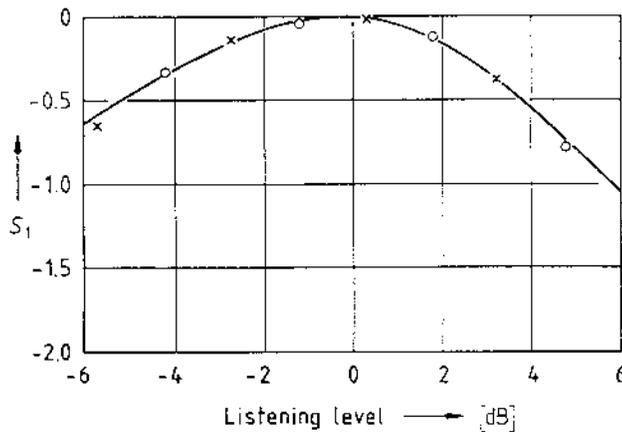
Per riportare alla stessa scala i risultati di tre analisi diverse è necessario mettere in scala due di esse rispetto alla terza: ciò si ottiene facilmente imponendo che i parametri comuni a due delle tre analisi su riportate siano legati al valore di F_1 dalla stessa funzione $g(x_1)$. Per determinare i fattori di scala sono dunque disponibili due equazioni: tramite queste due equazioni sono stati calcolati i valori dei parametri B . In questo modo è possibile definire una scala di preferenza per ciascun parametro oggettivo, avente zero come valore massimo ed unità consistenti fra le varie scale; sommando i valori numerici delle scale si ottiene lo indice di preferenza complessivo.

In base alle ipotesi di linearità di questa trattazione, l'indice di preferenza ottenuto va pensato come un indicatore della distanza del campo acustico dalle

condizioni ideali per il particolare brano musicale adottato.

L' influenza dei parametri oggettivi sull' indice complessivo non è uguale per i vari parametri, anche se le singole scale di preferenza S_1 hanno unità consistenti, poiché sono diversi i legami funzionali $g(x_1)$ che legano i valori dei parametri oggettivi ai valori S_1 degli indici di preferenza.

Nella fig. 4.8 viene riportato il diagramma dello indice di preferenza del livello d' ascolto S_1 , in funzione del parametro normalizzato tramite sottrazione del valore preferito ($x_1 = L - L_{pref}$).



Scale values of preference as a function of listening level.

(o) Music motif A; (x) music motif B. The smoothed curve is drawn through the plot and the scale value at the most preferred listening level is adjusted to zero

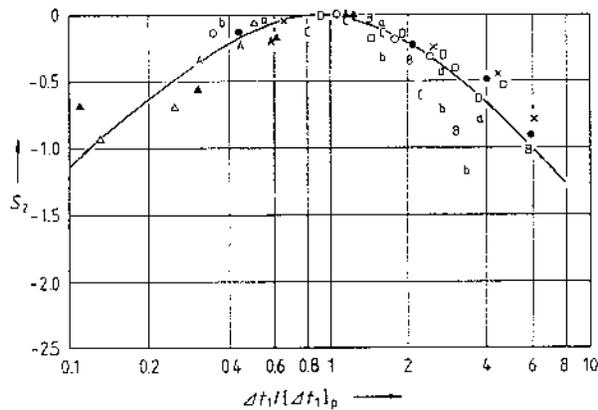
Fig. 4.8: Indice di preferenza del livello d' ascolto (didasc. orig.).

Ando ha proposto di approssimare la distribuzione dei dati sperimentali con la relazione:

$$S_1 = -w_1 \cdot \left| x_1 \right|^{3/2} \quad w_1 = \begin{cases} 0.07 & (x_1 > 0) \\ 0.04 & (x_1 < 0) \end{cases} \quad (4.4)$$

In cui il coeff. w_1 assume i valori indicati a seconda del segno del parametro normalizzato.

In fig. 4.9 viene riportato il diagramma dell' indice di preferenza S_2 relativo all' ITDG; in questo caso il diagramma è disegnato in funzione del logaritmo del rapporto del valore attuale di ITDG con il PRvalore ottimale ($x_2 = \log(\text{ITDG}/\text{ITDG}_{\text{pref}})$).



Scale values of preference as a function of the initial time-delay gap Δt_1 . Different symbols indicate the scale values obtained by different test series.

Music motif A; (x, b, B, ▲) music motif B; (C, D) music motifs C and D; (□) music motif E; (●) speech S. The scale value at the most preferred delay time is adjusted to zero

Fig. 4.9: Indice di preferenza del tempo di ritardo della prima riflessione (didasc. orig.).

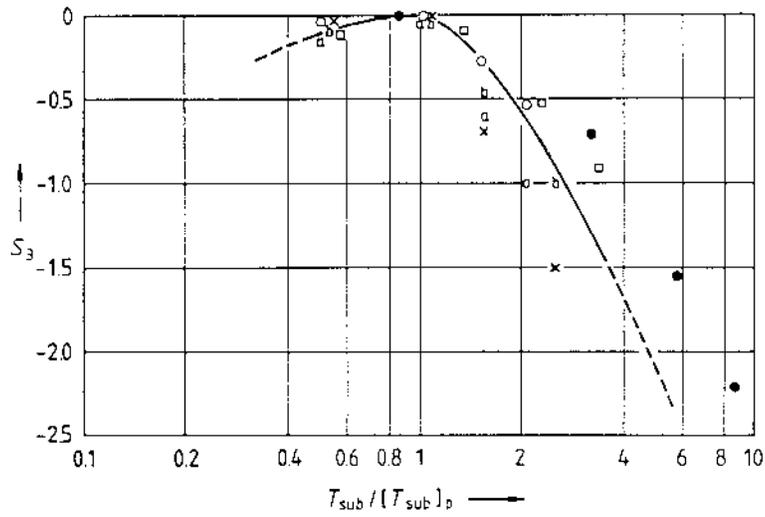
La relazione proposta da Ando per rappresentare i dati sperimentali é costituita dalla:

$$S_2 = -w_2 \cdot \left| x_2 \right|^{3/2} \quad w_2 = \begin{cases} 1.42 & (x_2 > 0) \\ 1.11 & (x_2 < 0) \end{cases} \quad (4.5)$$

Anche in questo caso si ha la dipendenza del coeff. w_2 dal segno del parametro normalizzato x_2 .

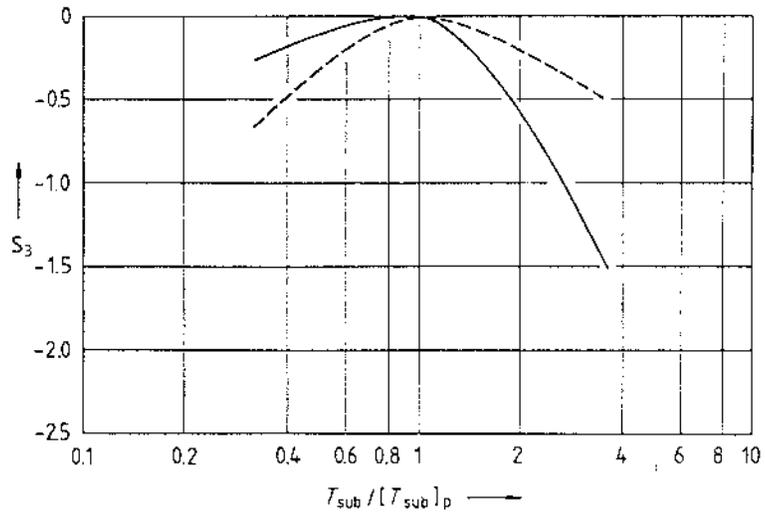
In fig. 4.10 sono riportati due diagrammi che mostrano il legame fra l' indice di preferenza S_2 ed il tempo di riverberazione soggettivo T_{sub} , quest' ultimo normalizzato allo stesso modo dell' ITDG, facendo cioè il logaritmo del rapporto con il tempo di riverberazione ottimale ($x_2 = \log(T_{sub}/T_{sub\ pref})$).

Il primo diagramma mostra un tentativo di rappresentare i dati secondo una relazione simile a quelle già introdotte per il livello e l' ITDG; i dati sono però dispersi attorno alla curva proposta; una approssimazione molto migliore si ottiene assegnando valori del coeff. w_2 dipendenti non solo dal segno del parametro normalizzato, ma anche dal rapporto A fra la ampiezza fittizia della prima riflessione e l' onda diretta. Questa grandezza viene definita da Ando con il seguente rapporto:



Scale values of preference as a function of the subsequent reverberation time.

(○, a) music motif A; (×, b) music motif B; (□) music motif E; (●) speech S. The scale values at the most preferred reverberation time are adjusted to zero



Average scale values of preference as a parameter of the total amplitude of reflections A .
 (—) $A = 4.1$;
 (---) $A = 1.1$

Fig. 4.10: Indice di preferenza del tempo di riverberazione (didasc. orig.).

$$A = \left[\frac{\int_{5 \text{ ms}}^{\infty} g^2(t) dt}{\int_0^{5 \text{ ms}} g^2(t) dt} \right]^{1/2} \quad (4.6)$$

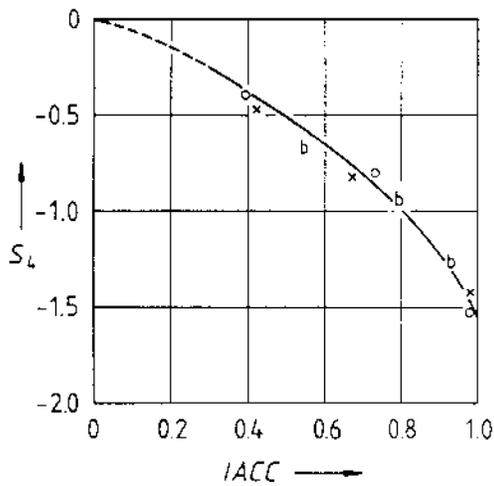
Ove $g(t)$ è la risposta all'impulso fra la sorgente sonora ed il punto di ascolto.

Nel secondo diagramma sono mostrati due casi estremi, ottenuti rispettivamente per $A=1.1$ e $A=4.1$; ciò corrisponde a valutare l'indice di preferenza S_3 in questo modo:

$$S_3 = -w_3 \cdot \left| x_3 \right|^{3/2} \quad w_3 = \begin{cases} 0.45+0.74A & (x_3 > 0) \\ 2.36-0.42A & (x_3 < 0) \end{cases} \quad (4.7)$$

La dipendenza del coefficiente w_3 da A è molto marcata solo per valori positivi del parametro normalizzato, come d'altronde appare anche dal primo dei due diagrammi di fig. 4.10.

Infine in fig. 4.11 è riportato il legame funzionale fra l'indice di preferenza S_4 ed il valore della IACC, senza alcuna normalizzazione ($x_4 = IACC$).



Scale values of preference as a function of the IACC.

(○) Music motif A; (×, b) music motif B. The maximum value of interaural cross correlation must be maintained at $\tau = 0$ to ensure frontal localization of the sound source

Fig. 4.11: Indice di preferenza della IACC (didaec. orig.).

Al contrario dei casi precedenti, appare un costante incremento della preferenza al calare della IACC, cosicché i dati possono essere rappresentati bene da un unico legame funzionale:

$$S_4 = -w_4 \cdot \left| x_4 \right|^{3/2} \quad (w_4 = 1.45) \quad (4.8)$$

Utilizzando le scale di preferenza ottenute da Ando e dai suoi collaboratori è dunque possibile valutare la

qualità acustica di una sala da concerto attraverso la determinazione dell' indice di preferenza complessiva, ottenuto dalla somma dei quattro indici S_1 , S_2 , S_3 e S_4 .

Lo stesso Ando ha poi mostrato come sia facile ricavare indicazioni progettuali dalla condizione di massimo dell' indice di preferenza, e come sia possibile valutare i parametri oggettivi di una sala con mezzi analitici, quando la stessa é ancora in fase di progettazione [44,45].

Nel presente lavoro sono state utilizzate le scale di preferenza per la valutazione oggettiva della qualità di sale esistenti, in seguito a misure sperimentali dei parametri oggettivi, e per la individuazione degli interventi correttivi da effettuare sulle sale stesse per migliorare le condizioni d' ascolto.

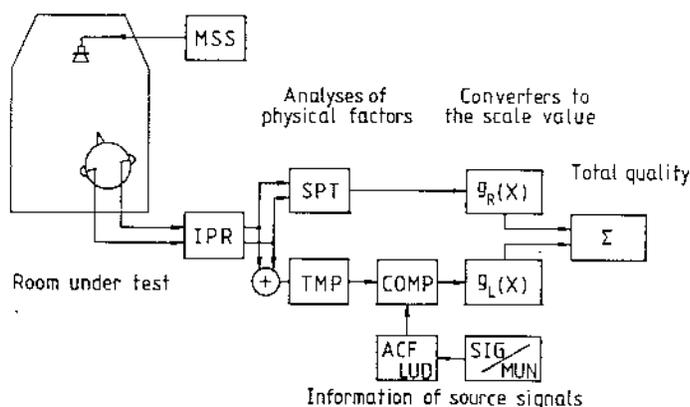
In seguito alla valutazione dei singoli indici di preferenza in tutti i punti di un ambiente, sono stati calcolati i valori medi di ciascuno di essi. Rapportando ciascuno di questi valori medi al valor medio dell' indice di preferenza complessivo, si definisce la incidenza percentuale del parametro fisico considerato sulla qualità complessiva. Osservando le diverse incidenze percentuali dei quattro parametri, é poi facile stabilire su quali di essi convenga intervenire per migliorare globalmente la acustica della sala.

5° CAPITOLO

**PROCEDURA DI MISURA
E VALUTAZIONE**

5.1 Schema concettuale

Nel presente capitolo viene illustrata una procedura per la misura dei principali parametri fisici, e per la valutazione in base ad essi di una scala di preferenza soggettiva; ciò rappresenta la realizzazione pratica dello schema concettuale proposto da Ando [45], illustrato nella fig. 5.1 .



A diagnostic system analyzing the four physical factors and evaluating the sound quality at each seat in a existing room. MSS: M-Sequence signal; IPR: Impulse response analyzers; SPT: Spatial factor (IACC); TMP: Temporal factors (LL , Δt , T_{sub} ; A); $g_R(X)$: Spatial factor to scale-value converter; $g_L(X)$: Temporal factors to scale-value converters; Σ : Total quality calculator; COMP: Comparators; ACF, LUD: Autocorrelation function or τ_e , Loudness information from musical note; SIG/MUN: Source signals and/or musical notes

Fig. 5.1: Schema del sistema d' analisi della qualità acustica proposto da Ando.

Riprendendo in esame la proposta citata, si possono osservare le seguenti particolarità riguardanti le tecniche di misura:

- 1) Generazione di un segnale sonoro di prova mediante la tecnica del rumore pseudo-casuale prodotto da un registro di scorrimento con sequenza di massima lunghezza (si tratta di un segnale dalle caratteristiche simili al rumore bianco, ma avente struttura deterministica anziché casuale: ciò consente di estrarre la risposta all' impulso dell' ambiente mediante un processo di deconvoluzione semplificato, inventato da Alrutz [55], che richiede solo operazioni di somma e sottrazione).
- 2) Ricezione del segnale di test attraverso due microfoni collocati al posto dei timpani di una testa artificiale, rivolta verso la sorgente sonora, e collocabile in svariati posti della sala. I microfoni incorporano un filtro di pesatura "A", corrispondente alla sensibilità media dell' orecchio umano.
- 3) Elaborazione delle risposte all' impulso sinistra e destra ($g_L(t)$ e $g_R(t)$) mediante un microcomputer, utilizzando l' algoritmo di Alrutz.
- 4) Valutazione del tempo di riverberazione soggettivo mediante la tecnica della integrazione all' indietro di Schroeder delle risposte all' impulso (vedi par.

2.4.1).

- 5) Valutazione del livello sonoro relativo, supponendo che il livello sonoro preferito venga raggiunto in un punto situato sull'asse di simmetria della sala, ad una distanza fissa (20 m) dalla sorgente sonora (non è infatti nota la potenza sonora delle sorgenti vere).
- 6) Valutazione automatica del tempo di ritardo della prima riflessione, la cui ampiezza fittizia A viene determinata dalla relazione 4.6.
- 7) Valutazione della Correlazione Mutua Inter-Aurale, definita come il valore max della correlazione mutua delle due risposte all'impulso misurate dalle orecchie nell'intervallo $(-1..+1)$ ms di sfasamento fra i due segnali.
- 8) Introduzione dall'esterno dei dati riguardanti il tipo di musica, ed eventualmente della potenza sonora della sorgente; in particolare è richiesta la durata effettiva della funzione di autocorrelazione t'_p .
- 9) Valutazione per i parametri fisici di tipo monofonico-temporale del logaritmo del rapporto del valore attuale col valore massimo preferito.
- 10) Calcolo per ciascun parametro fisico normalizzato del corrispondente valore dell'indice di preferenza, e calcolo dell'indice di preferenza globale come somma dei 4 indici di preferenza parziali.

La realizzazione pratica della procedura è stata resa possibile da un complessa strumentazione digitale controllata da un microcomputer: l'intera strumentazione è portatile, cosicché è possibile eseguire direttamente nella sala oggetto di misura tutte le fasi della elaborazione primaria dei dati, e volendo anche la fase di restituzione dei risultati.

La strumentazione adottata non ha consentito di utilizzare esattamente lo stesso schema proposto da Ando, come verrà meglio illustrato in seguito; tuttavia i parametri fisici ottenuti sono gli stessi, pertanto sono state applicate le stesse relazioni per il calcolo degli indici di preferenza. Il sistema realizzato è aperto ad ulteriori sviluppi, in particolare non appena saranno disponibili le scale di valutazione soggettiva di altri parametri fisici oggettivi, quali ad esempio lo spettro della funzione di trasferimento tra sorgente ed ascoltatore, sarà sufficiente sommare il corrispondente indice di preferenza agli altri 4 già determinati, in base alle leggi della teoria della preferenza.

In effetti già oggi il sistema di acquisizione memorizza su disco per ogni punto di misura molte informazioni in più rispetto a quelle utilizzate per la valutazione dell'indice di preferenza, quali appunto lo spettro della funzione di trasferimento, i tempi di

riverberazione in bande d' ottava, e le risposte allo impulso delle due orecchie; sarà dunque possibile sfruttare in un secondo tempo questi dati, e le misure eseguite oggi non sono pertanto destinate a diventare obsolete in breve tempo. Ulteriori indagini nel campo psicosoggettivo permetteranno di interpretare meglio tutti i dati oggettivi raccolti.

5.2 Hardware

In questo paragrafo vengono descritte dettagliatamente le apparecchiature utilizzate, lo schema di collegamento delle stesse ed i problemi incontrati riguardo al funzionamento del sistema

La strumentazione é costituita essenzialmente da 4 diversi strumenti: la sorgente sonora, la testa artificiale, l' analizzatore di Fourier ed il microcomputer; essi sono connessi fra loro da un sistema di cavi e da una unità di commutazione automatica delle connessioni gestita dal microcomputer.

La restituzione grafica dei risultati é affidata ad un plotter-printer collegabile sia all' analizzatore di Fourier che al computer, e ad una stampante grafica a matrice di punti collegabile soltanto al computer.

5.2.1 La sorgente sonora

E' stata utilizzata una sorgente sonora Bruel & Kjaer tipo 4234, dotata di un unico altoparlante frontale di grosse dimensioni con tweeter concentrico, visibile in fig. 5.2.

Lo spettro tipico di questa sorgente, alimentata con rumore bianco, é visibile nella fig. 5.3, ottenuta da una analisi effettuata in campo libero: come si vede é tutto altro che piatto, per cui é necessaria una equalizzazione del segnale emesso. Si nota anche una scarsa potenza emessa alle basse frequenze, che ha consigliato lo utilizzo di rumore rosa, onde incrementare il rapporto segnale/disturbo appunto alle frequenze piú basse. La caratteristica direttiva della sorgente é invece piuttosto vicina alla omnidirezionalitá.

L' equalizzazione viene ottenuta nel corso della misura stessa, tramite un microfono di riferimento collocato in stretta vicinanza del cono dello altoparlante, come si vede appunto nella fig. 5.2.

Il supporto del microfono é studiato in modo che il livello di pressione sonora misurato sia uguale al livello di potenza della sorgente; infatti, nella zona prossima alla sorgente, ove il campo riverberante é ininfluyente, si ha:

$$L_p = L_w + 10 \log \frac{Q}{4\pi r^2} \quad (5.2)$$

ed è stato scelto r in modo che sia $r^2 = Q/4\pi$, per cui si ha $L_p = L_w$.

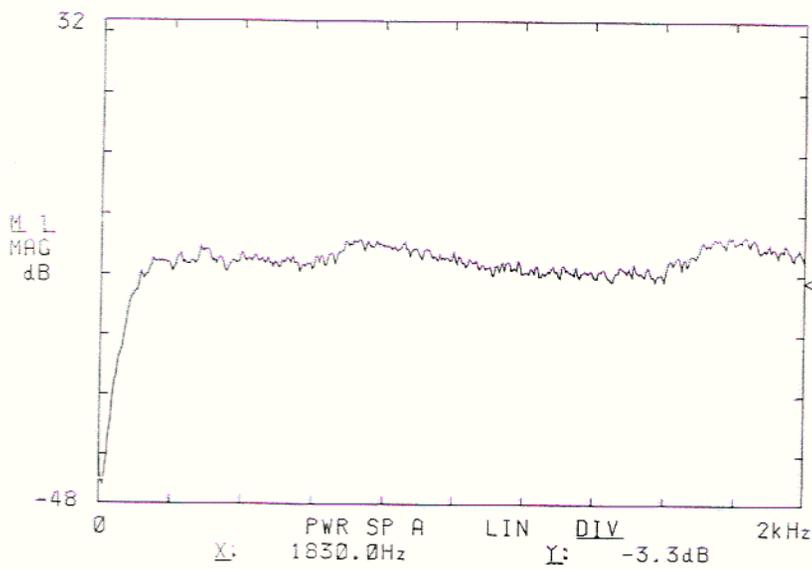
Il microfono di riferimento è esattamente identico a quelli collocati nella testa artificiale, pertanto esso serve anche ad equalizzare il sistema microfonico di acquisizione dati.

La sorgente è dotata di alimentazione interna, e non richiede pertanto la connessione alla rete elettrica; quest'ultima è peraltro sempre consigliabile, poiché la capacità delle batterie non consente una lunga autonomia di funzionamento alla massima potenza, potenza richiesta proprio nelle sale più grandi, ove maggiore è il numero di punti di misura da campionare.

Pur essendo la sorgente dotata di un generatore interno di rumore rosa, si è preferito pilotarla tramite un segnale esterno proveniente o dall'analizzatore di Fourier, o dal microcomputer stesso: in questo modo è possibile regolare a piacimento la potenza sonora emessa,



CURVA DI RISPOSTA DELLA SORGENTE B&K 4234
2kHz A:AC/0.5V B:AC/50V S.SUM 64/64 DUAL 1k



Figg. 5.2 e 5.3: Sorgente sonora B&K 4234 e curva di risposta in frequenza.

senza doversi avvicinare alla sorgente mentre essa è in funzione; inoltre la sorgente viene spenta improvvisamente per la misura del tempo di riverberazione, e rimane spenta fino alla successiva collocazione della testa artificiale in un nuovo punto di misura.

La sorgente ed il microfono di riferimento sono connessi alla restante strumentazione tramite un apposito doppio cavo schermato con terminali BNC, lungo circa 70 m onde consentire l'installazione della apparecchiatura lontano dal palcoscenico, in un luogo ove il mutuo disturbo con la misura in corso sia ridotto al minimo.

5.2.2 La testa artificiale

La testa artificiale utilizzata é visibile in figura 5.4, installata sul cavalletto necessario a mantenerla nella corretta posizione sui sedili oggetto di misura: essa é in materiale plastico morbido, ed é riempita internamente di schiuma poliuretana, nella quale sono scavati i passaggi per i fili ed i microfoni.



Fig. 5.4: Testa artificiale.

La testa fu ideata come manichino per la prova di acconciature, ed è pertanto dotata di sembianze tipicamente femminili (al contrario di quelle usate dagli altri gruppi di ricerca nel mondo), che le hanno valso il soprannome di Sabina, in omaggio evidentemente al fondatore dell'acustica degli spazi chiusi.

Nonostante l'esemplare utilizzato non sia dotato di un apparato auricolare riprodotto con grande dettaglio, come sono viceversa altre teste artificiali già usate per questo tipo di ricerche, le funzioni di trasferimento ottenute fra una sorgente sonora lontana ed i microfoni auricolari sono sufficientemente prossime a quelle ottenute da misure su teste umane, considerata la discreta variabilità di queste ultime.

I microfoni usati sono del tipo a condensatore, con transistor di preamplificazione FET incorporato: essi richiedono pertanto una semplice alimentazione con corrente continua ad 1.5 V, ottenuta da una pila alcalina contenuta nel contenitore d'alluminio collocato sotto la testa stessa; esso contiene anche i condensatori per il disaccoppiamento della componente continua del segnale prodotto, nonché i trimmer di calibrazione della preamplificazione dei microfoni.

La calibrazione è stata effettuata collocando i tre microfoni (i due della testa e quello di riferimento) allo

interno di una piccola cavità, assieme ad un piccolo altoparlante per cuffie stereo di alta qualità, e regolando le amplificazioni fino ad ottenere una uguale funzione di trasferimento fra il microfono di riferimento ed i due microfoni della testa. E' stato comunque necessario provare numerosi microfoni, prima di trovarne tre perfettamente identici. In fig. 5.5 sono visibili le curve di calibrazione così ottenute.

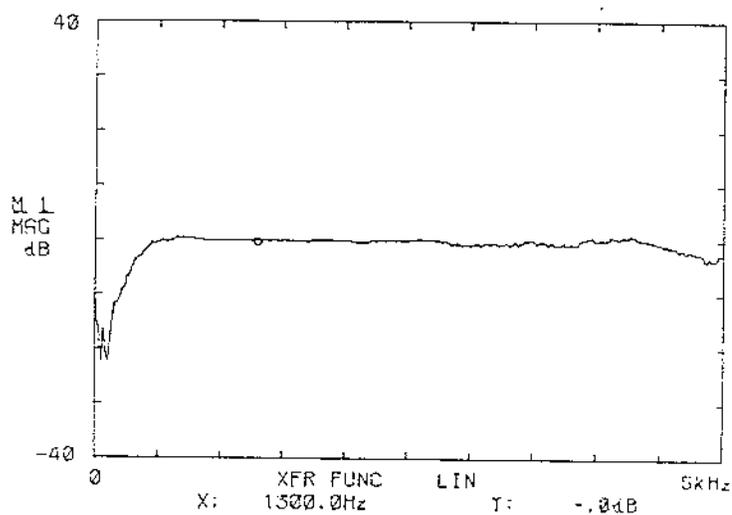
Sul contenitore d'alluminio sottostante la testa è anche collocato un piccolo pulsante, che connette a massa uno dei due segnali in uscita dai microfoni: ciò serve a comunicare al sistema di acquisizione che la testa è stata collocata in nuovo punto di misura, e pertanto a far partire la nuova acquisizione.

La testa artificiale è connessa all'analizzatore di Fourier tramite un commutatore a relais, controllato dal microcomputer, che consente di selezionare il segnale microfonici da porre a confronto con il segnale di riferimento proveniente dal microfono situato vicino alla sorgente. All'interno della unità di commutazione un secondo relais consente al computer di rilevare la pressione del pulsante situato sulla testa, come detto sopra.

Il cavo di connessione è identico a quello utilizzato per la sorgente, e consente grande libertà di movimento

all' interno della sala, essendo recuperabile su un apposito avvolgitore.

CURVA DI RISPOSTA DEL MICROFONO SINISTRO 00:29
5kHz A:AC/0.2V B:AC/0.2V S.SUM 64/64 DUAL 1K



CURVA DI RISPOSTA DEL MICROFONO DESTRO 00:33
5kHz A:AC/0.2V B:AC/0.2V S.SUM 64/64 DUAL 1K

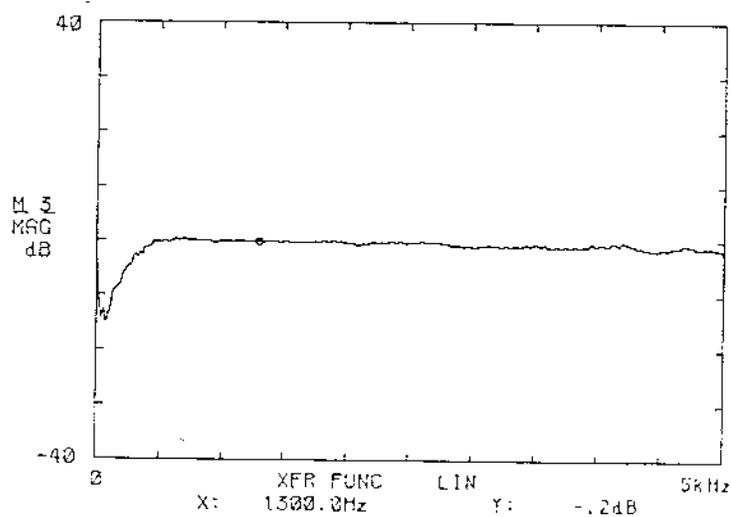


Fig. 5.5: Curve di calibrazione dei microfoni.

5.2.3 L' analizzatore di Fourier

E' stato utilizzato un analizzatore bicanale Ono Sokki mod. CF 920, visibile in fig. 2.15; si tratta di uno strumento dotato di numerose possibilità, fra le quali vanno citate la unità a microdisco interna, sulla quale possono essere registrati i risultati delle misure, la interfaccia GPIB - IEEE 488 per la connessione con computers esterni, e funzioni avanzate per lo studio dei sistemi lineari, in particolare è presente il software necessario al calcolo della Risposta all' Impulso $g(t)$ mediante la trasformata di Fourier inversa della funzione di trasferimento fra i due canali dello strumento (secondo il procedimento illustrato nel par. 2.4).

L' analizzatore è il cuore del sistema di acquisizione, ma viene utilizzato intensamente anche nel corso della successiva elaborazione dei dati, poiché è in grado di calcolare la funzione di cross-correlazione e di auto-correlazione, può agire come processore FFT (Fast Fourier Transform) per il computer esterno, e può stampare autonomamente i dati tramite un apposito plotter a colori.

Nel corso della acquisizione vengono calcolate la risposta all' impulso e la funzione di trasferimento fra il microfono di riferimento ed il microfono situato nello

orecchio selezionato dal computer. Le due misure vengono poi ripetute per l'altro orecchio, ed i 4 risultati così ottenuti vengono memorizzati sul microdisco incorporato.

Viene infine calcolato il tempo di riverberazione, acquisendo nella memoria transiente il decadimento sonoro conseguente allo spegnimento della sorgente; questo transiente viene analizzato in ottave (anche se è possibile pure l'analisi in terzi d'ottava), ed i livelli sonori così ottenuti vengono inviati al computer con un passo di scansione di 20 ms. E' dunque il computer a calcolare la pendenza media delle curve di decadimento, e ad estrapolare dai primi 15 dB di esse il tempo di riverberazione di ogni banda d'ottava (oltre ovviamente a quello complessivo).

Contrariamente alla procedura di Ando, il tempo di riverberazione non viene dunque calcolato sulla base della risposta all'impulso, mediante l'integrazione allo indietro di Schroeder: infatti la durata della risposta all'impulso ottenuta, variante da 50 a 150 ms, non consente di ottenere buoni risultati con quella tecnica. La durata della risposta all'impulso potrebbe essere aumentata riducendo la frequenza massima dell'analisi di Fourier, ma già il valore adottato di 2 kHz appare troppo basso in relazione all'estensione della scala musicale. Inoltre questa procedura più classica produce risultati

molto ben sovrapponibili a quelli ottenuti per confronto con strumentazioni di tipo analogico, mentre la tecnica di Schroeder dá risultati diversi se il decadimento non é perfettamente esponenziale.

Le misure della funzione di trasferimento e della risposta all' impulso avvengono dunque in regime stazionario, con la sorgente che irradia una potenza costante: ciò consente di mediare i risultati, ed é stato scelto un numero N di analisi mediate pari a 64, come miglior compromesso fra la riduzione dell' effetto del rumore di fondo e la durata della misura stessa. La misura del tempo di riverberazione avviene viceversa in base ad un unico evento transitorio, e per di piú attraverso un solo orecchio (il sinistro): ciononostante prove successive hanno mostrato una sufficiente ripetibilitá dei valori del tempo di riverberazione cosí ottenuti.

L' analizzatore é in grado di provvedere il rumore rosa per il pilotaggio della sorgente sonora, interrompendo poi il segnale al momento opportuno, al ricevimento dell' apposito comando da parte del computer.

E' anche possibile modificare il segnale emesso, facendogli attraversare il circuito di filtraggio e miscelazione audio presente nel computer.

Sono stati fatti esperimenti di filtraggio "A" del segnale proveniente dalla testa artificiale, in accordo

con lo schema di Ando; il filtraggio ha però peggiorato il rapporto segnale/disturbo e la dinamica del segnale, e pertanto si è preferito eliminarlo, ricorrendo in sostituzione ad un filtraggio digitale del segnale allo interno dell' analizzatore, che ha effetto soltanto sul calcolo del livello di ascolto, e non sulla determinazione della risposta all' impulso.

Riguardo la successiva elaborazione dei dati, sono sorti alcuni problemi dovuti a rigidità del software interno all' analizzatore, che non consentiva di effettuare la cross-correlazione di due risposte allo impulso: il problema è stato risolto con un artificio, leggendo le risposte all' impulso tramite il computer esterno e rinviandole all' analizzatore sotto forma di segnali temporali. Analoga procedura è stata seguita per visualizzare la risposta allo impulso quadrata, utile per la individuazione delle riflessioni: la ricerca della prima riflessione non è stata infatti automatizzata, ma viene eseguita manualmente posizionando il cursore sul primo forte picco seguente l' onda diretta.

L' interfaccia con il computer ha dato alcuni problemi di incompatibilità, che hanno richiesto la modifica del cavo di collegamento; inoltre ogni tanto si verifica una condizione d' errore sul bus dati, della quale non è stata individuata alcuna causa apparente, ed alla quale si è

ovviato con opportuni accorgimenti software per il controllo sistematico del funzionamento dell' interfaccia. E' probabile che questi problemi dipendano solo per il 50% dall' analizzatore, essendo il computer responsabile della altra parte.

Va infine segnalata la notevole rumorosità della ventola di raffreddamento dell' analizzatore, che spesso diviene la principale fonte di disturbo durante le misure. Si pensa di provvedere alla sostituzione della stessa con altra meno rumorosa, oppure al suo spegnimento tramite un relais controllato dal computer al momento del decadimento sonoro per la misura del tempo di riverberazione.

5.2.4 Il microcomputer

Per l' interfacciamento con l' analizzatore di Fourier è stato utilizzato un personal computer Commodore SX64, visibile in fig. 5.6: si tratta della serie professionale del diffuso C64, prodotta in versione portatile con unità a disco e monitor a colori incorporati.



Fig. 5.6: Microcomputer Commodore SX64

La connessione con il bus d' interfaccia GPIB - IEEE 488 è stata possibile grazie ad una interfaccia prodotta dalla ditta inglese DAMS, che consente l' accesso agli strumenti collegati direttamente attraverso le istruzioni di controllo delle periferiche già presenti nel linguaggio BASIC standard del C64. Essendo questa interfaccia destinata alla connessione di periferiche Commodore, e non di strumenti di altre marche, è stato necessario modificare leggermente le connessioni del cavo di collegamento. Si è evidenziata anche una lieve incompatibilità software, che ha impedito di effettuare trasferimenti di dati in forma binaria sotto il controllo dell' interprete Basic; il problema è stato risolto scrivendo nuove routines in linguaggio macchina che gestiscono il trasferimento veloce di dati in forma binaria.

Sono stati realizzati complessi programmi per il controllo dell' intera strumentazione in fase di acquisizione e di elaborazione dei dati: è stata inoltre utilizzata una estensione del linguaggio Basic standard, denominata Simons' Basic, per realizzare la restituzione grafica dei risultati ottenuti.

La portabilità dello strumento si è rivelata preziosa per l' utilizzo al di fuori del laboratorio: nonostante i maltrattamenti subiti, non si sono riscontrati

inconvenienti di alcun tipo.

Il C64 é dotato di alcune particolaritá molto interessanti per la realizzazione di controlli a distanza: é infatti dotato di una porta di controllo con 9 linee di input/output completamente programmabili. Due di queste linee sono state utilizzate come uscite, per il controllo dei relais della unitá di commutazione automatica; una terza linea é stata utilizzata come ingresso per il segnale di chiusura del pulsante situato sulla testa, consentendo cosí il controllo a distanza di tutta la strumentazione.

Il controllo della sorgente sonora é possibile secondo tre diverse tecniche: la prima consiste nell' inviare allo analizzatore di Fourier i comandi di accensione e spegnimento del generatore di rumore rosa incorporato in quello strumento; la seconda tecnica consiste nel fare attraversare al segnale proveniente dall' analizzatore il circuito di gestione audio del C64 (chiamato SID, Sound Interface Device), che ne puó regolare il volume in 15 passi e puó filtrare il segnale attraverso un filtro programmabile. La terza tecnica consente di fare a meno del generatore di rumore dell' analizzatore di Fourier, poiché la sorgente viene alimentata direttamente dal segnale proveniente dal generatore di suoni complessi del C64, che puó produrre rumori bianchi, rosa e forme d'onda

triangolari, a dente di sega e rettangolari.

Per quanto riguarda la restituzione grafica dei risultati, sono state collegate al computer due stampanti grafiche a matrice di punti: una Commodore MPS 1000, collegata tramite l'interfaccia seriale standard, ed una Hewlett-Packard ThinkJet, connessa sul bus IEEE 488. E' stato anche sperimentato il plotter WX 4731 in dotazione all'analizzatore di Fourier, ma la complessità del software necessario al suo controllo ne ha reso difficoltoso l'utilizzo.

Il monitor a colori incorporato ha dato qualche problema di nitidezza, poiché le piccole dimensioni non consentono una buona leggibilità dei caratteri.

Va infine segnalato che la disponibilità di manuali molto esaurienti, del disassemblato del Sistema Operativo, e di numeroso software di supporto alla programmazione hanno consentito di operare con facilità in linguaggio macchina, per la velocizzazione delle parti più critiche dei programmi.

5.2.5 Apparecchi ausiliari e schema complessivo

E' stato necessario costruire alcune specifiche apparecchiature per consentire il collegamento di tutte le componenti del sistema. In particolare é stata realizzata la unità di commutazione a relais, visibile in fig. 5.7; in fig. 5.8 é riportato uno schema del suo funzionamento. Scopo di questa unità é connettere alternativamente uno dei due microfoni situati nella testa artificiale al canale "B" dell' analizzatore di Fourier, essendo già il canale "A" connesso permanentemente con il microfono di riferimento. Ciò é ottenuto con un relais, avente la funzione di deviatore, la cui commutazione viene comandata da un transistor, eccitato dal segnale digitale proveniente dalla porta di controllo del calcolatore. Sebbene l' alimentazione al circuito sia fornita dallo stesso calcolatore, é stata evitata ogni connessione elettrica fra la circuiteria dei microfoni e quella dei relais, onde evitare la trasmissione di disturbi durante le misure. La connessione diviene però indispensabile per la rilevazione della pressione del pulsante di controllo sulla testa, ed é stato pertanto installato un secondo relais, che connette una linea microfonica all' ingresso del computer solo nella fase in cui non é in corso la

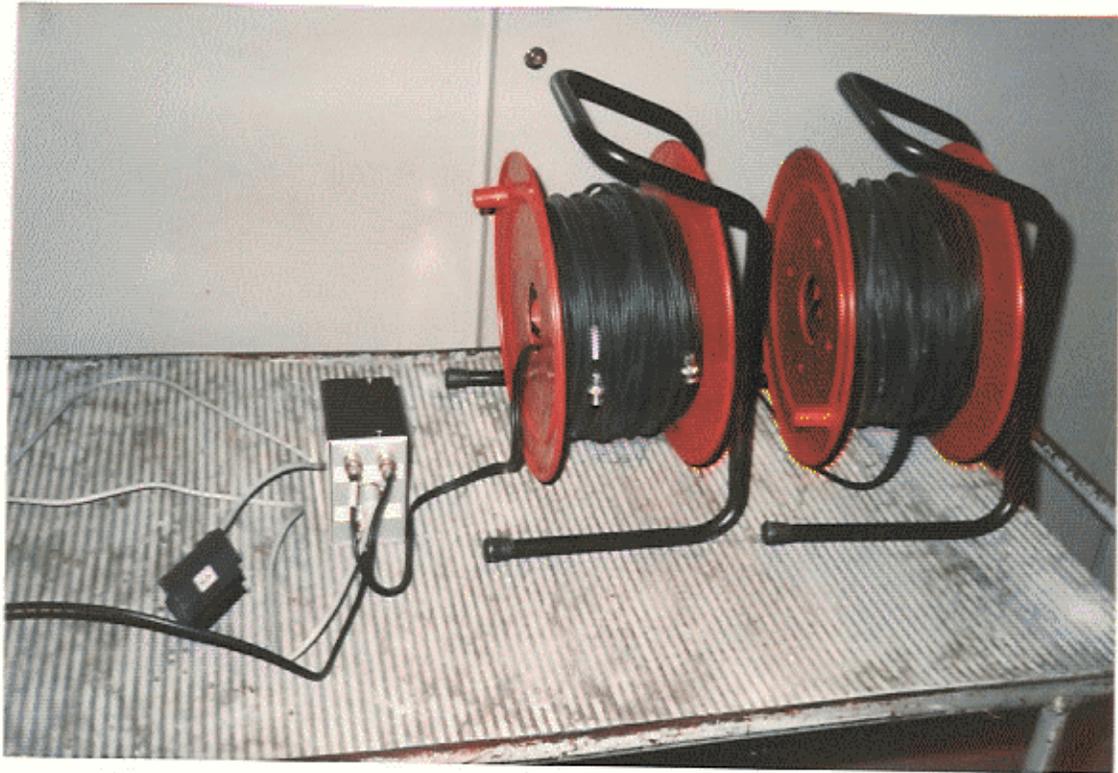


Fig. 5.7: Apparato di connessione e cavi.

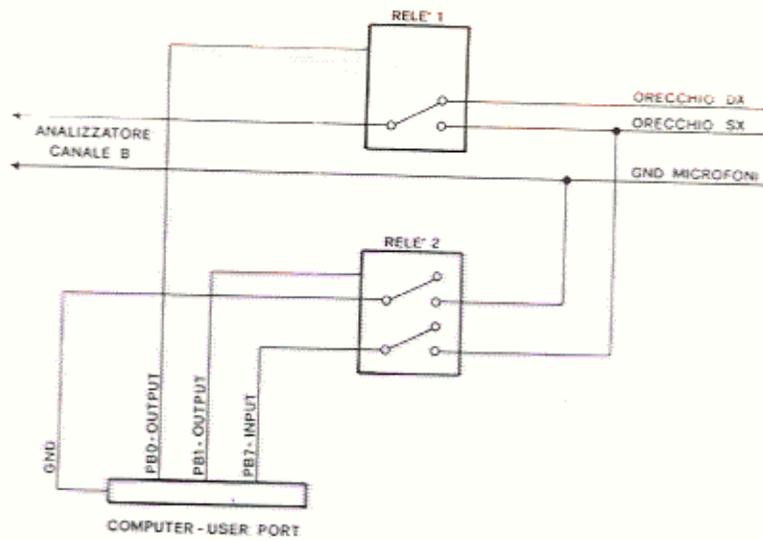


Fig. 5.8: Schema del commutatore a relé.

acquisizione, ed il sistema aspetta il segnale per ripartire.

Sono poi stati realizzati due lunghi cavi doppi con terminali BNC, per il collegamento alla strumentazione principale della sorgente sonora e della testa artificiale; essi sono visibili in fig. 5.7, recuperati sui rispettivi avvolgitori.

In fig. 5.9 è visibile uno schema complessivo dei collegamenti fra i vari strumenti, depurato dei cavi di alimentazione. Tutti i terminali dei cavi sono siglati, in modo da rendere impossibile sbagli durante la installazione degli strumenti nella sala da studiare.

Gli unici seri problemi sono sorti a causa dei cavi di alimentazione, poiché in ogni sala esistono prese di tipo diverso, ed il mancato collegamento a terra del filo di massa rende impossibili le misure a causa dei disturbi di rete. In alcuni casi è stato necessario provvedere con masse volanti esterne, connesse ad armature metalliche facenti parte della struttura del teatro.

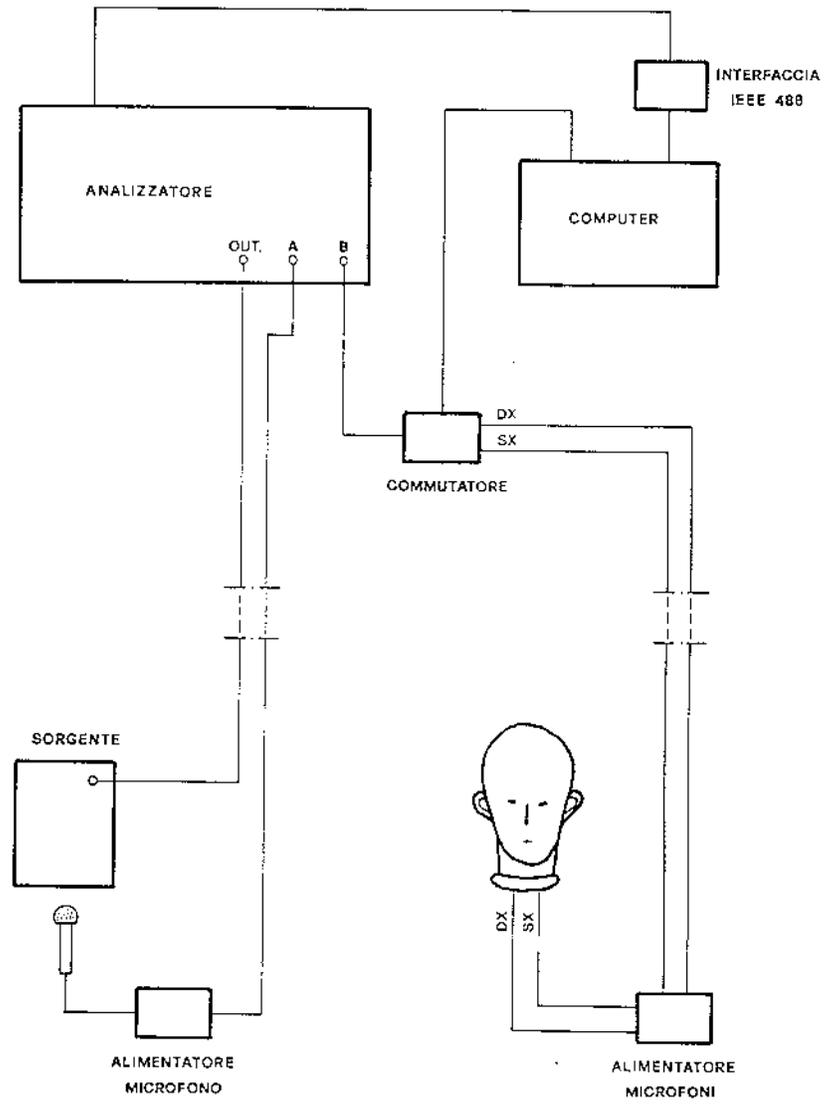


Fig. 5.9: Schema complessivo dei collegamenti.

5.3 Software

E' stato necessario produrre numerosi programmi per il calcolatore, destinati alla gestione dell' acquisizione dati, alla successiva elaborazione degli stessi ed alla presentazione finale dei risultati in forma grafica. I programmi sono stati realizzati in linguaggio Basic, facendo uso di una serie comune di sottoprogrammi per la gestione del video e per l' ingresso controllato dei dati da tastiera.

La filosofia di programmazione adottata è stata quella, molto diffusa, dei menu in cascata: in ogni istante ci si trova dinanzi ad una serie di scelte possibili, nessuna delle quali è mai incongruente con la situazione della strumentazione.

La fase di messa a punto degli algoritmi è stata piuttosto rapida; è stato invece necessario spendere molto più tempo per rendere i programmi, già funzionanti, utilizzabili da chiunque, anche in assenza di una adeguata conoscenza della procedura di misura: lo scopo dichiarato era quello di realizzare un sistema "fool proof" (trad. letterale "a prova di sciocco"), tale cioè che non sia comunque possibile perdere dati o rovinare le misure sbagliando ad usare i programmi.

La scelta fatta è stata dettata dalla volontà di

disporre di una strumentazione pratica, di uso semplice ed immediato, in grado di fornire rapidamente ed efficacemente le informazioni necessarie alla correzione acustica di un locale destinato alla musica.

Le moderne teorie, ed in particolare quella di Ando, sono certamente applicabili nel corso della progettazione di un nuovo teatro, quando è possibile intervenire in svariati modi sulla forma ed i materiali dell' ambiente. Quando viceversa ci si trova a dover correggere una situazione esistente, a tutt' oggi l' unica cosa che si possa fare con sicurezza è misurare i tempi di riverberazione, ed eventualmente introdurre o togliere una certa quantità di materiale fonoassorbente per adattare questo parametro al valore ritenuto ottimale.

La procedura messa a punto consente viceversa di misurare in breve tempo i principali parametri fisici dell' ambiente studiato, in un elevato numero di punti, ottenendo mappature tridimensionali molto facili da interpretare. Di ogni parametro fisico viene anche automaticamente calcolata l' influenza sulla qualità acustica del locale, cosicché appare evidente su quali aspetti conviene intervenire per ottenere il miglior risultato con la minima spesa.

Senza entrare troppo nei dettagli dei programmi realizzati, verranno qui illustrate le principali funzioni

degli stessi, e saranno fornite le informazioni necessarie a far funzionare correttamente il sistema. I sottoparagrafi seguenti costituiscono dunque anche una specie di sintetico manuale d'uso della strumentazione.

5.3.1 Software di sistema

Lo scopo del software di sistema è quello di guidare l'utente nell'utilizzo dei vari programmi, rendendone automatico il caricamento in memoria e l'esecuzione, e suggerendo la configurazione hardware necessaria per lo espletamento del lavoro scelto.

Si supponga inizialmente di installare la strumentazione: il microcomputer andrà alimentato opportunamente, e verrà connesso all'analizzatore di Fourier tramite l'interfaccia IEEE 488 già descritta. A questo punto, accendendo il computer, appare la scritta "ready", che indica che il sistema è pronto. E' dunque possibile caricare il software.

Tutto il software prodotto è stato raccolto su un unico disco, indicato d'ora innanzi come "**disco programmi**"; ad esso si accompagnano altri tre dischi, uno destinato a raccogliere i dati durante l'acquisizione (**disco acquisizioni**), il secondo destinato alla elaborazione intermedia dei dati (**disco elaborazioni**), ed il terzo destinato all'immagazzinamento dei grafici tridimensionali prodotti (**disco pagine grafiche**).

All'inizio occorre introdurre nel computer il disco programmi, mentre in seguito il cambio dei dischi verrà automaticamente richiesto quando opportuno. Una volta

introdotta il disco programmi, è sufficiente premere il tasto "run" ("commodore" + "run/stop") per ottenere il caricamento e l'avvio automatico del software di sistema.

La prima operazione eseguita è il controllo delle opzioni installate nel sistema: viene poi presentato il menu principale, che consiste nella scelta fra 6 diversi programmi:

- 1) acquisizione dati
- 2) elaborazione dati
- 3) elaborazione grafici tridimensionali
- 4) preparazione nuovi dischi
- 5) modifica delle impostazioni standard
- 6) copia dei dischi per sicurezza.

I primi tre programmi verranno descritti separatamente nei prossimi sottoparagrafi, mentre i successivi tre fanno parte del software di sistema. Il programma iniziale provvede a caricare in memoria ed eseguire il software scelto, se ciò è compatibile con la configurazione hardware presente. In caso di mancata compatibilità, vengono indicate le modifiche da apportare per poter eseguire il programma scelto.

Nel caso del programma n° 3, è necessario che nel sistema sia installata una estensione del linguaggio Basic standard, denominata Simons' Basic: essa può essere costituita da una cartuccia inserita nella porta di

espansione del computer, oppure da una estensione software, che però per essere utilizzata richiede una ulteriore cartuccia di caricamento veloce, denominata Turbodos. Qualora nessuna delle due cartucce sia presente all'accensione, il sistema ne richiede l'inserimento per proseguire nella esecuzione del programma n° 3, mentre se è presente la seconda, viene dapprima caricata la versione software del Simons' Basic, ed in seguito il programma stesso.

Il programma n° 4 consente la preparazione di nuovi dischi acquisizione, elaborazione e pagine grafiche, per iniziare una nuova serie di misure. Esso chiede quale disco si vuole preparare, dopodiché invita allo inserimento di un dischetto vergine e scrive su di esso tutte le informazioni necessarie ai successivi programmi. Alla fine è possibile tornare al menu principale.

Il programma n° 5 serve a definire le caratteristiche standard del sistema, quali colore dello schermo e dei caratteri, massimo numero di punti di misura nella sala, stampante utilizzata, etc. : la scelta si attua in forma numerica, per cui è necessario conoscere quale colore corrisponde, ad esempio, al numero 4, o quale stampante corrisponde al n° 1. L'uso di questo programma è pertanto riservato all'utente esperto, che disponga delle informazioni necessarie.

Infine il programma n° 6 é un usuale programma di copiatura dischi, utile per duplicare i dischi contenenti le informazioni elaborate, onde non rischiare che un accidentale danneggiamento distrugga il frutto di un lungo lavoro.

5.3.2 Programma di acquisizione

Il programma di acquisizione viene caricato in memoria solo se è presente l' interfaccia IEEE 488, poiché il solo scopo di questo programma è la gestione dell' analizzatore di Fourier Ono Sokki durante la fase di acquisizione dati, nella sala in esame.

Il programma chiede anzitutto di inserire il disco acquisizioni dal quale viene letto un indice delle acquisizioni già eseguite (al massimo 9 per disco); è possibile proseguire una acquisizione già presente sul disco, oppure definirne una nuova. Nel secondo caso vengono richiesti dati quali nome e localizzazione della sala, data della misura, e viene chiesto di specificare il numero di punti di misura previsti; è sottintesa una suddivisione del locale in file di sedili, per cui vengono richiesti il numero di file ed il numero di punti di misura per fila. Non è ovviamente obbligatorio eseguire una misura in ogni sedile del teatro, ma si può decidere di intervallare opportunamente i punti e le file di misura. Viene infine richiesto se i tempi di riverberazione debbono essere calcolati in ottave o in terzi d' ottava.

Si procede poi al controllo della corretta connessione

della testa artificiale, che si ottiene verificando che la pressione del tasto di partenza acquisizione sulla testa stessa venga rilevata dal computer. Viene poi eseguita la procedura di acquisizione vera e propria, che consiste anzitutto nel ripristino alle condizioni di accensione dell' analizzatore di Fourier.

La procedura può iniziare l' acquisizione da qualunque punto, per cui viene richiesto il numero del punto di inizio; ciò consente di riprendere una serie di misure dopo una interruzione forzata, o di rifare la misura in un singolo punto. Viene infine chiesto quale generatore di rumore si vuole usare, intendendosi con generatore interno l' apposito circuito contenuto nel microcomputer, e con generatore esterno quello incorporato nell' analizzatore di Fourier. La sorgente sonora deve ovviamente essere connessa con il generatore scelto. La regolazione del livello sonoro emesso dalla sorgente viene richiesta prima dell' acquisizione del primo punto di misura: si tratta di ottenere un elevato rapporto segnale/disturbo, per cui usualmente conviene regolare la sorgente stessa sulla potenza massima. L' analizzatore di Fourier provvede ad autoregolare l' amplificazione dei microfoni. Terminata la regolazione, è sufficiente premere qualunque tasto: il computer spegne automaticamente la sorgente, e chiede di posizionare la testa nel punto prescelto.

Qui inizia una procedura ripetitiva, che viene avviata dalla pressione di un tasto qualsiasi o del pulsante situato sotto la testa artificiale. Il computer accende innanzitutto la sorgente, visualizza progressivamente quale acquisizione è in corso, provvede alla commutazione della unità a relais per la scelta dell' orecchio destro o sinistro, fa memorizzare allo analizzatore di Fourier le risposte all' impulso e gli spettri sonori misurati sulla apposita incorporata unità a microdisco, ed infine spegne la sorgente sonora, registrando contemporaneamente il decadimento susseguente nella memoria volatile dello analizzatore. A questo punto lo schermo lampeggia, viene emesso un segnale acustico, e si può procedere allo spostamento della testa nel punto di misura successivo.

Nel frattempo il computer elabora i dati contenuti nella memoria volatile, e calcola da essi i tempi di riverberazione alle varie frequenze, che vengono memorizzati sul disco acquisizioni, assieme ai dati di definizione della sala.

Quando il computer è nuovamente pronto per acquisire il punto successivo, lo schermo lampeggia nuovamente e viene emesso il segnale acustico, segnalando che è possibile far partire nuovamente la procedura di acquisizione premendo il pulsante sotto la testa o un tasto del computer. E' anche possibile interrompere la

acquisizione, premendo il tasto di funzione F2.

Se nel corso dell'acquisizione il microdisco dello analizzatore di Fourier si riempie, il computer interrompe la procedura ed invita all'introduzione di un nuovo microdisco; su ciascuno di essi possono essere memorizzate le risposte all'impulso e gli spettri sonori di 21 punti di misura, per cui usualmente due microdischi, o al massimo tre, sono sufficienti alla memorizzazione dei dati di una sala anche grande.

In alcuni casi, durante la elaborazione dei tempi di riverberazione, l'interfaccia IEEE 488 può finire in una condizione d'errore, che viene ripristinata con la pressione del pulsante "local" sull'analizzatore di Fourier: ciò viene richiesto, se necessario, tramite una scritta lampeggiante sullo schermo accompagnata da una serie di suoni.

Essendo estremamente limitati gli interventi umani durante la fase di acquisizione, è difficile che si verifichino errori: l'unico problema è il corretto posizionamento della testa nei punti prestabiliti, che può essere facilitato dalla disponibilità di una pianta sulla quale marcare con una crocetta i punti già acquisiti.

Il software di calcolo del tempo di riverberazione si basa sulle seguenti ipotesi: viene campionato il livello sonoro, a partire dall'istante di spegnimento della

sorgente, con un intervallo di campionamento di 40 ms, finché il livello non decade di oltre 3 dB sotto il valore di regime. A questo punto il campionamento viene infittito ad intervalli di 20 ms, e vengono memorizzati i valori del livello finché esso non si è ridotto di ulteriori 15 dB, ovvero finché non si raggiunge un limite fissato a 3 dB sopra il rumore di fondo ancora presente a fine decadimento. Il tempo di riverberazione viene ottenuto dalla pendenza media del tratto di decadimento memorizzato, attraverso la tecnica dei minimi quadrati. Se il decadimento è stato interrotto dal raggiungimento dei 15 dB, ciò viene segnalato dalla comparsa sullo schermo della scritta "T15", accanto al valore numerico misurato. La misura viene eseguita contemporaneamente su 5 bande di ottava o su 15 bande di 1/3 di ottava, oltre che sul livello complessivo. Solo il dato ottenuto da questo ultimo viene utilizzato in seguito per il calcolo dello indice di qualità acustica.

5.3.3 Programma di elaborazione dati

Scopo del programma di elaborazione é il calcolo dei quattro parametri fisici previsti dalla teoria di Ando, e precisamente Livello Sonoro, Tempo di Ritardo della Prima Riflessione, Tempo di Riverberazione e Correlazione Mutua Inter-Aurale. Da questi quattro parametri vengono poi calcolati gli indici di preferenza (s_1 , s_2 , s_3 e s_4), la cui somma fornisce l'indice complessivo di qualità acustica della sala: per fare questo é necessario fornire i dati di riscontro relativi al tipo di musica ed alla potenza sonora della sorgente effettiva.

Il programma consente altresí di gestire archivi dei dati misurati, consentendo di correggerli manualmente e di stamparli in forma tabellare.

All'inizio il programma carica dal disco programmi alcune routines in linguaggio macchina necessarie alle elaborazioni, dopodiché richiede l'inserimento del **disco elaborazioni**: su di esso si trova un indice degli archivi di dati elaborati, che può contenere al massimo 9 archivi. E' possibile elaborare i dati di un archivio già definito, oppure introdurne uno nuovo. In questo caso, viene offerta la possibilità di definire automaticamente un archivio grazie ai dati già registrati sul disco acquisizioni:

seguendo questa possibilità, è sufficiente introdurre il disco acquisizioni e scegliere la misura voluta fra quelle presenti. In caso contrario, è necessario introdurre da tastiera gli stessi dati visti prima, cioè nome della sala, etc. . In entrambi i casi occorre poi aggiungere le coordinate x,y e z di tutti i punti di misura, tramite un sottoprogramma di ingresso controllato comune ad altre gestioni di dati.

Il sottoprogramma di ingresso controllato consente di battere direttamente i valori opportuni, di correggerli spostandosi avanti e indietro con i tasti cursore, di avanzare di una fila premendo il tasto F1 e di retrocedere con F3; è infine possibile abbandonare il sottoprogramma, anche senza avere introdotto tutti i dati, mediante la pressione del tasto F7.

Appare poi il menu centrale del programma di elaborazione, che prevede queste possibilità:

- 0) ritorno al menu principale
- 1) modifica dei dati relativi alla sala
- 2) visualizzazione e modifica dei dati elaborati
- 3) elaborazione di nuovi dati
- 4) stampa dei dati elaborati
- 5) cambio del teatro oggetto di elaborazione

La opzione 0 non richiede commenti; le opzioni 1 e 2 utilizzano il sottoprogramma già illustrato per la

visualizzazione e la modifica dei dati memorizzati.

La opzione 3 conduce ad un successivo menu, così come la opzione 4; infine la quinta opzione consente di ripartire, con la scelta di un diverso archivio.

Il sottomenu cui si accede tramite l' opzione 3 è detto "menu elaborazioni", e presenta queste possibilità:

- 0) ritorna al menu precedente
- 1) elaborazione livelli sonori
- 2) elaborazione tempo di riverberazione
- 3) elaborazione prima riflessione
- 4) elaborazione C.C.I.A.
- 5) elaborazione della preferenza totale
- 6) conversione file.

La elaborazione gestita dal punto 1 procede automaticamente, visualizzando sullo schermo la mappa dei livelli sonori man mano che essi vengono letti dallo analizzatore di Fourier.

La elaborazione del tempo di riverberazione consiste in pratica nella semplice rilettura dal **disco acquisizioni** dei dati già ivi memorizzati; selezionando il punto 2 si viene pertanto invitati ad introdurre il **disco acquisizioni**, dopodiché a scegliere quale acquisizione leggere. Se essa è incongruente con le caratteristiche impostate per la sala in corso di elaborazione, si può optare di leggere ugualmente i dati. In effetti viene

letto solo il tempo di riverberazione complessivo, mentre i dati ottenuti dalle varie bande di frequenza non vengono presi in considerazione. Al termine viene richiesto di reintrodurre il **disco elaborazioni**, sul quale vengono memorizzati i dati.

Selezionando il punto 3 del menu elaborazioni, si attiva un sottoprogramma che consente di ricavare dalle risposte all' impulso $g(t)$ il tempo di ritardo della prima riflessione e l' ampiezza relativa A della riflessione equivalente. Riguardo questa seconda grandezza, va notato che essa viene calcolata da Ando con la seguente espressione:

$$A = \left[\frac{\int_{5 \text{ ms}}^T g^2(t) dt}{\int_0^{5 \text{ ms}} g^2(t) dt} \right]^{1/2} \quad (5.3)$$

nella quale il limite di integrazione T viene considerato tendente all' infinito, mentre il limite di 5 ms rappresenta la durata massima dell' onda diretta.

Non essendo possibile estendere il limite T al valore richiesto da Ando, poiché la durata utile della risposta all' impulso varia da 50 a 150 ms , si è scelto di limitare

comunque a 50 ms il limite superiore di integrazione: in questo modo il parametro A assume un significato più preciso, poiché rappresenta l'ampiezza equivalente delle sole **riflessioni utili**, e non comprende dunque l'energia del campo riverberante successivo. Il valore ottenuto da questa integrazione sulle risposte all'impulso effettive tende a dare risultati maggiori del valore teorico calcolato da Ando con la tecnica delle sorgenti virtuali, poiché nella misura è sempre presente un po' di rumore. Il risultato viene depurato dall'effetto del rumore semplicemente sottraendo al numeratore l'integrale tra -50 ms e -5 ms del quadrato della risposta all'impulso: in teoria questo termine dovrebbe essere nullo, poiché non arriva alcuna energia prima dell'onda diretta; pertanto in realtà in questo intervallo temporale si registra solo rumore, che viene supposto uguale a quello sovrapposto alla parte utile del segnale.

Il programma procede nell'elaborazione di un punto per volta, registrando di volta in volta i risultati sul **disco elaborazioni** sotto forma di settori di un "file relativo", in modo che sia possibile elaborare a piacimento i punti in qualsiasi ordine, interrompendo la elaborazione o rifacendo alcuni punti.

Le risposte all'impulso del punto considerato vengono caricate nella memoria del computer, dove una routine in

linguaggio macchina provvede a quadrarle, a calcolare gli integrali suddetti e a rinviarle all' analizzatore per essere visualizzate sovrapposte. La visualizzazione sovrapposta delle risposte all' impulso quadrate é molto utile per l' individuazione manuale della prima forte riflessione; per di piú il computer provvede automaticamente al calcolo geometrico del tempo di ritardo, poiché conosce le dimensioni della sala e le coordinate del punto di misura. Esso posiziona pertanto il cursore di ricerca (un punto luminoso) nella posizione stimata della prima riflessione, e l' operatore deve semplicemente spostarlo leggermente se esso non si trova già esattamente sul picco; é sufficiente poi premere il tasto "return" del computer per far sí che esso legga lo effettivo tempo di ritardo e lo visualizzi sul monitor assieme a quello teorico, all' errore di posizione commesso in cm e alla ampiezza equivalente A, ottenuta dal valor medio delle due A calcolate dalle due orecchie.

Viene infine proposta l' elaborazione del punto immediatamente successivo, ma l' operatore può sceglierne un altro oppure interrompere l' elaborazione.

L' opzione 4 serve al calcolo della Correlazione Mutua Inter-Aurale (IACC nella notazione di Ando), che può avvenire in modo continuo o un punto alla volta in analogia a quanto visto per il tempo di ritardo della

prima riflessione. Scegliendo la seconda possibilità, i dati vengono memorizzati nello stesso file relativo di prima, cancellando quanto vi si trovava: è pertanto buona norma effettuare subito la conversione file relativo (opzione 6), non appena terminata l'elaborazione del punto 3 o 4.

La correlazione mutua inter-aurale viene calcolata in questo modo: le risposte all'impulso vengono caricate nella memoria del computer, ove vengono traslate a sinistra in modo da iniziare con l'arrivo dell'onda diretta e vengono troncate a 50 ms dopo l'onda diretta stessa. I segnali così ottenuti sono rinviati allo analizzatore sotto forma di segnali nel tempo sui due canali "A" e "B": in questo modo l'analizzatore è in grado di valutarne la funzione di Cross-Correlazione (correlazione mutua), della quale viene letto il valore massimo nell'intervallo (-1..+1) ms. Viene anche letto il tempo di sfasamento al quale si verifica il massimo, che risulta pari a 0 ms se la testa era effettivamente rivolta verso la sorgente sonora. La presenza di tempi di sfasamento diversi da zero indica che la testa era orientata male, ovvero che la correlazione mutua inter-aurale è così bassa da rendere impossibile la localizzazione della sorgente: la osservazione del valore della IACC consente di comprendere quale dei due casi si

sia verificato (di solito il primo).

L'opzione 5 serve per il calcolo degli indici di preferenza parziali e totale: si può effettuare questo solo se sono già stati elaborati tutti i dati precedenti. Gli indici di preferenza dipendono non solo dai dati oggettivi, ma anche dai dati di riscontro relativi alla sorgente musicale: è pertanto necessario fornire la durata effettiva della funzione di autocorrelazione del brano musicale (t_{\bullet} , definita nel cap. 1) e il livello sonoro di riferimento, inteso come il livello sonoro ideale per lo ascolto del brano in esame (Ando assegna questo parametro come il livello presente sull'asse longitudinale della sala, a 20 m dalla sorgente).

Sul disco elaborazioni esiste un indice dei brani musicali, ciascuno dotato del corrispondente valore di t_{\bullet} e del livello di riferimento; è possibile scegliere una coppia di valori già definita, o introdurne una nuova per il calcolo degli indici di preferenza. Fatto questo, il calcolo procede automaticamente per tutti 4 gli indici parziali e per quello totale.

Infine l'opzione 6 consente di rileggere i dati memorizzati nel file relativo, e rimemorizzarli stabilmente sul disco elaborazioni: è possibile convertire un singolo punto o l'intero file, sia per i tempi di ritardo della prima riflessione che per le coerenze mutue

inter-aurali. E' importante ricordarsi di convertire immediatamente i punti al termine della elaborazione di queste grandezze, poiché il file relativo è una memoria di transito ove è facile che i dati vengano cancellati.

Rimane infine da considerare la opzione 4 del menu iniziale, denominata "stampe dati": essa consente di stampare sul video o su una stampante una tabella riassuntiva dei dati elaborati di ciascun tipo, tabella organizzata in righe e colonne allo stesso modo dei punti di misura nella sala. A questo scopo è importante notare che è bene numerare i punti di misura in accordo con le convenzioni interne dei programmi: la prima fila deve essere la più vicina alla sorgente, ed all' interno di ogni fila il primo punto deve essere sulla sinistra per chi guarda verso la sorgente. E' possibile scegliere tra varie stampanti o plotter per ottenere la stampa; ovviamente occorre indicare correttamente la apparecchiatura effettivamente collegata al computer.

Nella fig. 5.10 è visibile una stampa di questo tipo, relativa alla mappatura dei livelli sonori nella Aula Magna di Ingegneria, ottenuta nella ipotesi che la sorgente avesse un livello di potenza sonora $L_w = 100$ dB.

L' unico inconveniente serio presente nel programma di elaborazione dipende dalla sua notevole occupazione di memoria, che costringe il computer a soste forzate

("garbage collection") nel corso dell' elaborazione, durante le quali si arrestano tutte le attività, la tastiera é disabilitata e non resta che attendere alcuni secondi per vedere riprendere l' elaborazione.

STAMPA LIVELLI SONORI - TEATRO ASTRA

LS100	1	2	3	4	5	6
1 SX	62.8	65.4	69.3	70.4	66.4	63.2
DX	62.8	66.0	69.6	68.0	65.5	62.9
2 SX	62.5	64.1	66.7	66.9	65.2	62.6
DX	61.5	64.6	67.1	67.1	65.0	62.6
3 SX	60.2	62.8	63.8	64.7	63.1	59.8
DX	60.0	62.6	64.5	64.5	63.1	61.5
4 SX	58.9	60.2	61.1	61.8	60.4	58.7
DX	58.5	60.3	61.1	61.7	60.8	59.8
5 SX	58.7	58.4	58.6	58.2	58.6	57.7
DX	58.9	58.7	59.4	58.4	58.8	58.2
6 SX	57.5	57.1	57.6	57.3	57.5	56.9
DX	57.1	57.5	58.1	58.2	57.7	57.9
7 SX	56.4	56.4	56.9	57.6	57.0	56.2
DX	56.3	56.6	57.8	57.9	57.6	57.4

Fig. 5.10: Esempio di stampa numerica dei dati elaborati.

5.3.4 Programma di grafica tridimensionale

Il programma di elaborazione é in grado di fornire la stampa tabellare dei dati ottenuti, in una forma molto comoda per leggere i valori di ciascun punto di misura. Si é tuttavia sentita l' esigenza di visualizzare i risultati in forma grafica, per evidenziare meglio il comportamento globale della intera sala e rendere immediatamente confrontabili sale diverse.

Le usuali tecniche di presentazione grafica di risultati mappati su una superficie piana consistono nel tracciamento di linee di equal valore del parametro graficato, oppure nell' individuazione di aree del piano con gradi di annerimento crescente. Queste tecniche sono però adatte soprattutto alla rappresentazione di funzioni continue, e per applicarle ai dati ottenuti dalle misure sarebbe necessario preventivamente costruire funzioni di interpolazione per connettere fra loro i valori nei punti di misura.

Volendo invece mantenere intatta l' informazione contenuta in ciascun punto di misura, si é scelta la strada dell' istogramma tridimensionale: l' altezza di ciascun prisma a base rettangolare corrisponde dunque al valore misurato, mentre le dimensioni della base sono

scelte in modo da suddividere il rettangolo complessivo, corrispondente all'intera sala, nel numero di file e di punti per fila effettivamente analizzati.

La tecnica scelta consente di ottenere una rappresentazione facilmente comprensibile dei dati, a scapito di una certa riduzione di flessibilità nella visualizzazione di ambienti non rettangolari; peraltro le sale studiate sinora non hanno creato alcun problema di questo tipo.

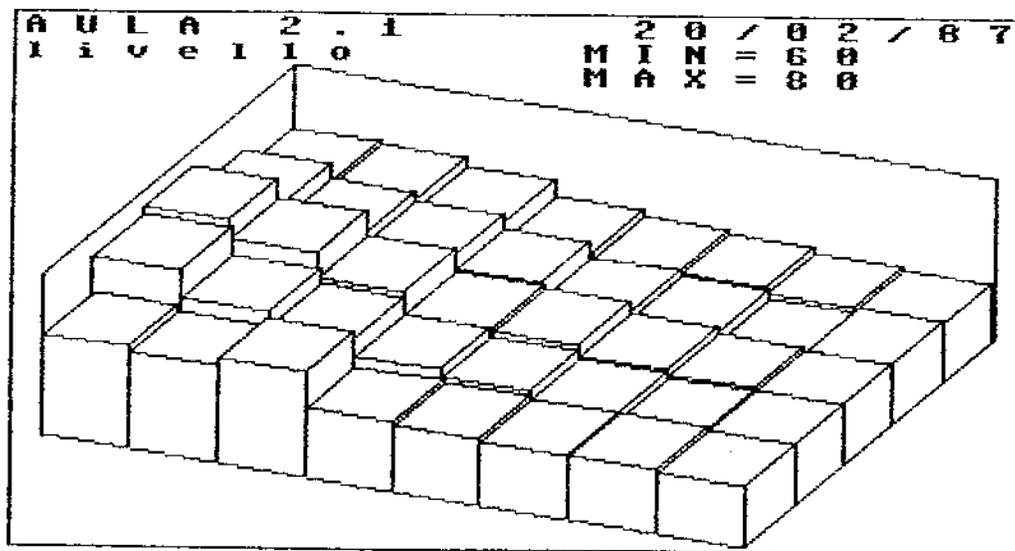


Fig. 5.11: Rappresentazione grafica dei dati elaborati.

In fig. 5.11 é visibile la rappresentazione grafica degli stessi dati riportati in forma numerica in fig. 5.10; la sorgente sonora é supposta sulla sinistra del disegno, mentre nella stampa di fig. 5.10 era situata in alto. Si nota come appaia evidente la progressiva attenuazione di livello sonoro con la crescente distanza dalla sorgente.

Il programma di elaborazione dei grafici utilizza buona parte della struttura del programma di elaborazione dati: é identica la parte generale di scelta dello archivio da elaborare, ed il menu centrale del programma prevede queste opzioni:

- 0) ritorno al menu principale
- 1) elaborazione di un nuovo grafico
- 2) visualizzazione e modifica dati elaborati
- 3) visualizzazione del grafico attualmente in memoria
- 4) salvataggio su disco del grafico in memoria
- 5) caricamento da disco di un grafico
- 6) stampa del grafico in memoria
- 7) cambio stampante
- 8) cambio teatro
- 9) modo bianconero / multicolore

La opzione 1 porta ad un successivo menu; la opzione 2 é identica a quella già vista nel programma precedente, e fa uso del solito sottoprogramma di ingresso controllato

per la eventuale modifica dei dati.

Con l'opzione 3 viene visualizzato sul monitor il grafico attualmente in memoria, finché non viene premuto il tasto "return". L'opzione 4 provoca il salvataggio su disco della pagina grafica, che viene in tal modo archiviata per uso futuro.

La opzione 5 conduce ad un sottomenu, che consente di scegliere quale grafico caricare in memoria dal disco; ovviamente possono essere caricati soltanto i grafici già precedentemente registrati sul disco, cosa che viene segnalata da un "si" presente di fianco a ciascun tipo di grafico già archiviato. Durante il caricamento viene automaticamente visualizzato il grafico stesso.

La opzione 6 consente di stampare il grafico sulla stampante attualmente selezionata; è possibile cambiare il tipo di stampante, se quella selezionata non corrisponde a quella attualmente collegata al computer. Il sistema supporta tre tipi di stampanti: Commodore, Epson e ThinkJet. La prima e l'ultima consentono un solo formato di stampa, mentre la seconda ne consente ben quattro: formato piccolo a singola densità, piccolo a doppia densità, grande a singola densità e grande a doppia densità. Le stampe a doppia densità sono più nere di quelle a singola densità, ma occorre un tempo di stampa doppio. Se si seleziona il formato piccolo, è possibile

posizionare il grafico sul foglio di carta stabilendo quanto margine bianco deve essere lasciato sulla sinistra.

La opzione 7 consente poi di cambiare la stampante attualmente selezionata, scegliendo fra le 6 possibilità su riportate.

Con l' opzione 8 si riparte dalla scelta dello archivio da elaborare, mentre l' opzione 9 consente di selezionare alternativamente il modo bianconero o quello multicolore; il primo è utile a preparare i grafici per la stampa, poiché fornisce una migliore risoluzione grafica, mentre il secondo è utile per osservare i grafici sullo schermo, che appaiono colorati in arancione e verde chiaro. Caricando un grafico dal disco occorre, per visualizzarlo correttamente, impostare l' opzione 9 nel modo corrispondente a quello della originale elaborazione di quel grafico.

Tornando alla opzione 1, essa conduce ad un sottomenu ove è possibile operare la scelta del grafico da elaborare fra le seguenti possibilità:

- 0) ritorna al menu precedente
- 1) grafico del livello sonoro
- 2) grafico della differenza di livello tra le 2 orecchie
- 3) grafico del tempo di riverberazione
- 4) grafico del tempo di ritardo della prima riflessione
- 5) grafico della ampiezza equivalente A della riflessione

6) grafico della Correlazione Mutua Inter-Aurale (IACC)

7) indici di preferenza.

Come si vede sono disponibili piú opzioni di quelle strettamente corrispondenti al numero di parametri elaborati, poiché ad esempio é possibile visualizzare sia il livello medio sonoro (ottenuto dalla media aritmetica del livello sinistro e destro), ma é anche possibile selezionare la differenza di livello fra le due orecchie.

Accanto a ciascuna possibilitá appare un "si" o un "no", indicante se i dati corrispondenti sono disponibili sul disco elaborazioni; il programma non consente ovviamente di elaborare dati non ancora presenti sul disco.

Una volta operata la scelta, i dati numerici vengono caricati dal disco, e vengono determinati il valore minimo e massimo degli stessi: questi valori servono per la corretta messa in scala del grafico. E' possibile accettare i limiti proposti, oppure imporne altri; usualmente conviene fare cosí, in modo che tutte le sale vengano rappresentate su grafici con la stessa scala verticale.

Il grafico viene visualizzato man mano che procede la elaborazione; é cosí possibile osservare in questa fase anche l' altezza di quelle bande dell' istogramma che risultassero eventualmente completamente coperte dalle

antistanti bande piú alte. E' comunque sempre possibile evitare questo inconveniente selezionando opportunamente i limiti minimo e massimo della scala verticale.

Va infine notato che l'opzione 7 del menu conduce ad un ulteriore sottomenu, che consente la scelta fra la graficazione dei 4 indici parziali di preferenza e dello indice complessivo.

La elaborazione dei grafici é piuttosto lenta, poiché vengono utilizzate unicamente le istruzioni grafiche del Simons' Basic. La stesura in linguaggio macchina dello algoritmo di graficazione renderebbe ovviamente molto piú veloce l'esecuzione dello stesso.

6° CAPITOLO

MISURE IN SALE ESISTENTI

6.1 Ambiente di prova

La procedura di valutazione della qualità acustica descritta nel capitolo precedente è stata utilizzata per lo studio di alcune sale esistenti, delle quali era necessario indicare eventuali difetti ed opportuni interventi correttivi.

Già nella fase di messa a punto della strumentazione e del software si è però sentita l' esigenza di eseguire misure di prova in un ambiente dalle caratteristiche note, e per questo scopo è stata scelta l' Aula Magna della Facoltà di Ingegneria di Bologna: si tratta di un ambiente che era già stato oggetto di numerose ricerche [67], volte alla determinazione dei parametri fisici significativi per la comprensione del parlato ed allo studio di possibili interventi per migliorarne la funzionalità quale sala per conferenze. Dalle ricerche citate era risultato che la sala soffre di eccessiva riverberazione, che rende difficile la comprensione della voce ad una certa distanza dall' oratore. Ciò corrisponde alle lamentele sollevate dagli studenti, abituali frequentatori dell' aula nel periodo delle lezioni.

Nel corso delle indagini precedentemente svolte era stato anche realizzato un modello in scala 1:25, già illustrato nel cap. 3, le cui prestazioni a riguardo della

simulazione dei tempi di riverberazione sono senza dubbio buone: in fig. 6.1 è riportato il confronto fra i tempi misurati nel modello in scala (ovviamente moltiplicati per il denominatore del rapporto di scala) e quelli effettivamente misurati nell' aula reale.

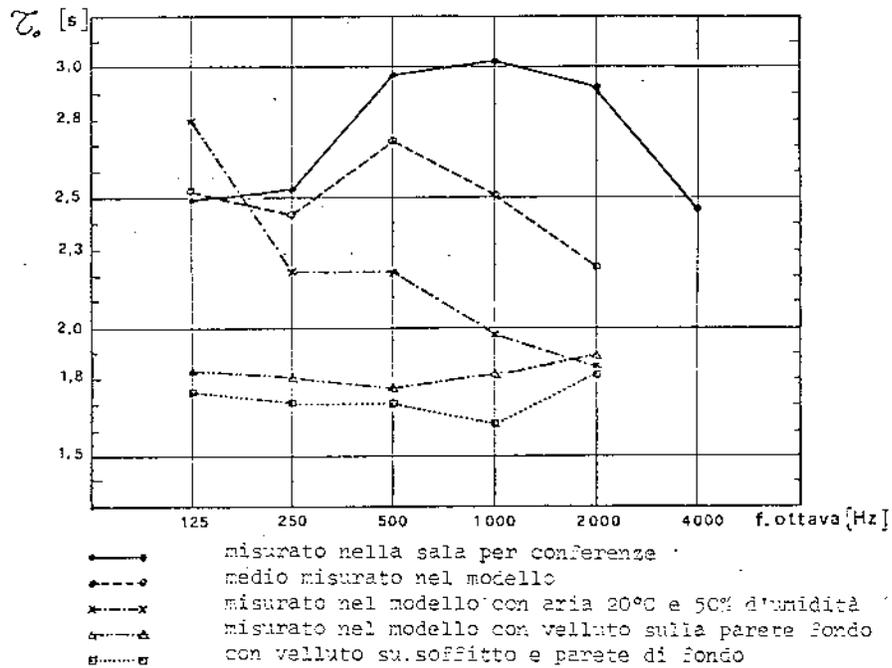
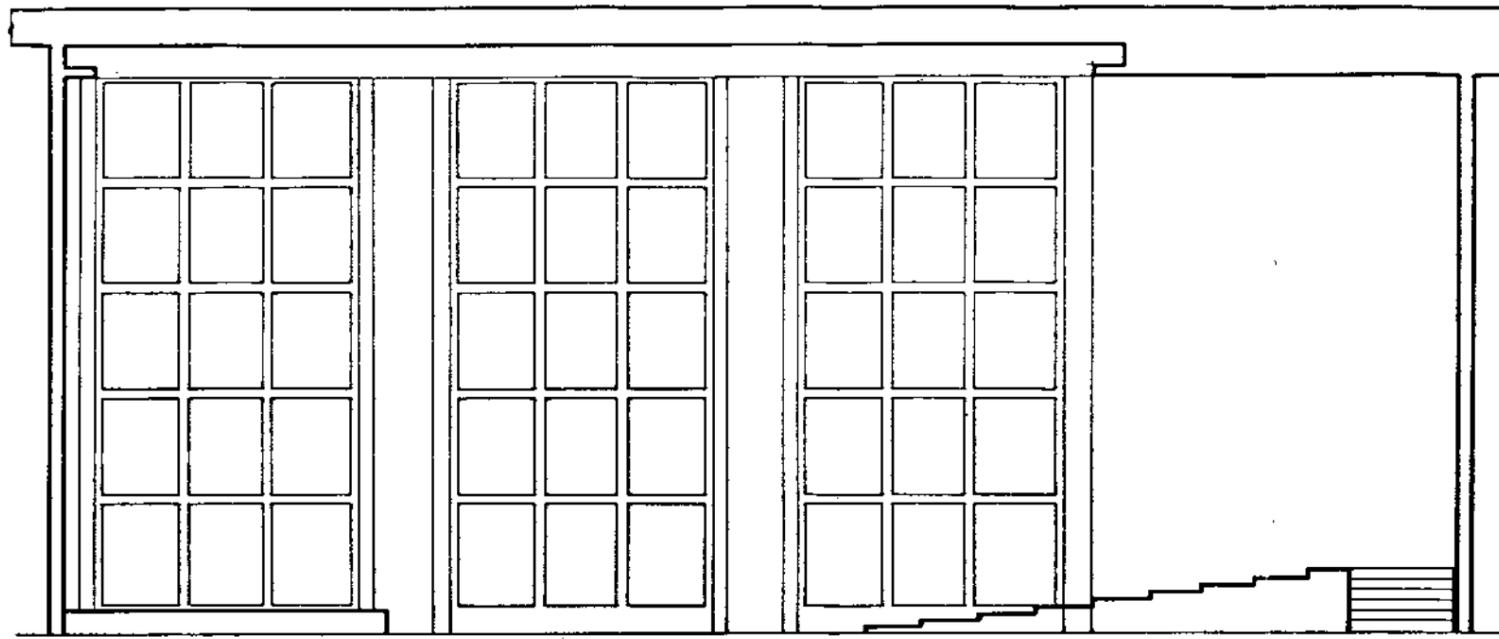


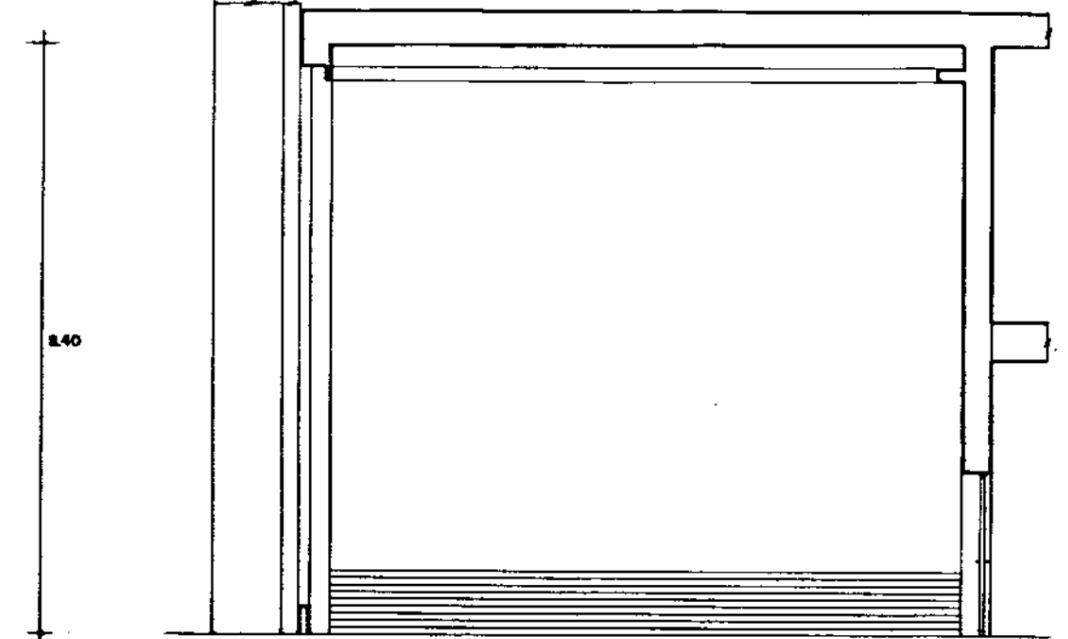
Fig. 6.1: Confronto fra i tempi di riverberazione misurati nel modello e nella Aula Magna.

La disponibilità del modello ha consentito di effettuare acquisizioni simulate nello stesso, tramite un piccolo altoparlante per alte frequenze (tweeter) ed una coppia di minuscoli microfoni a condensatore inseriti in una pallina di stucco: ovviamente ciò porta ad alcune differenze rispetto alle misure dal vero con testa artificiale, ma anche se i parametri fisici misurati in questo modo non sono risultati vicini a quelli effettivi (per colpa dei trasduttori, non del modello), queste prime acquisizioni in scala sono state molto utili per il controllo del funzionamento di tutte le componenti del sistema.

Nella fig. 6.2 è riportata la pianta dell' aula di prova, sulla quale sono indicati la posizione della sorgente sonora ed i punti di misura scelti per la mappatura dei parametri fisici: si è cercato di mantenere una distanza costante fra le file, ma non è stato possibile mantenere l' allineamento longitudinale dei punti di misura poiché i sedili sono sfalsati, onde garantire una migliore visibilità. La fig. 6.2 mostra anche una sezione longitudinale, dalla quale risulta evidente la notevole altezza dello ambiente e la insufficiente inclinazione della platea.



19.50



2.40

8.00

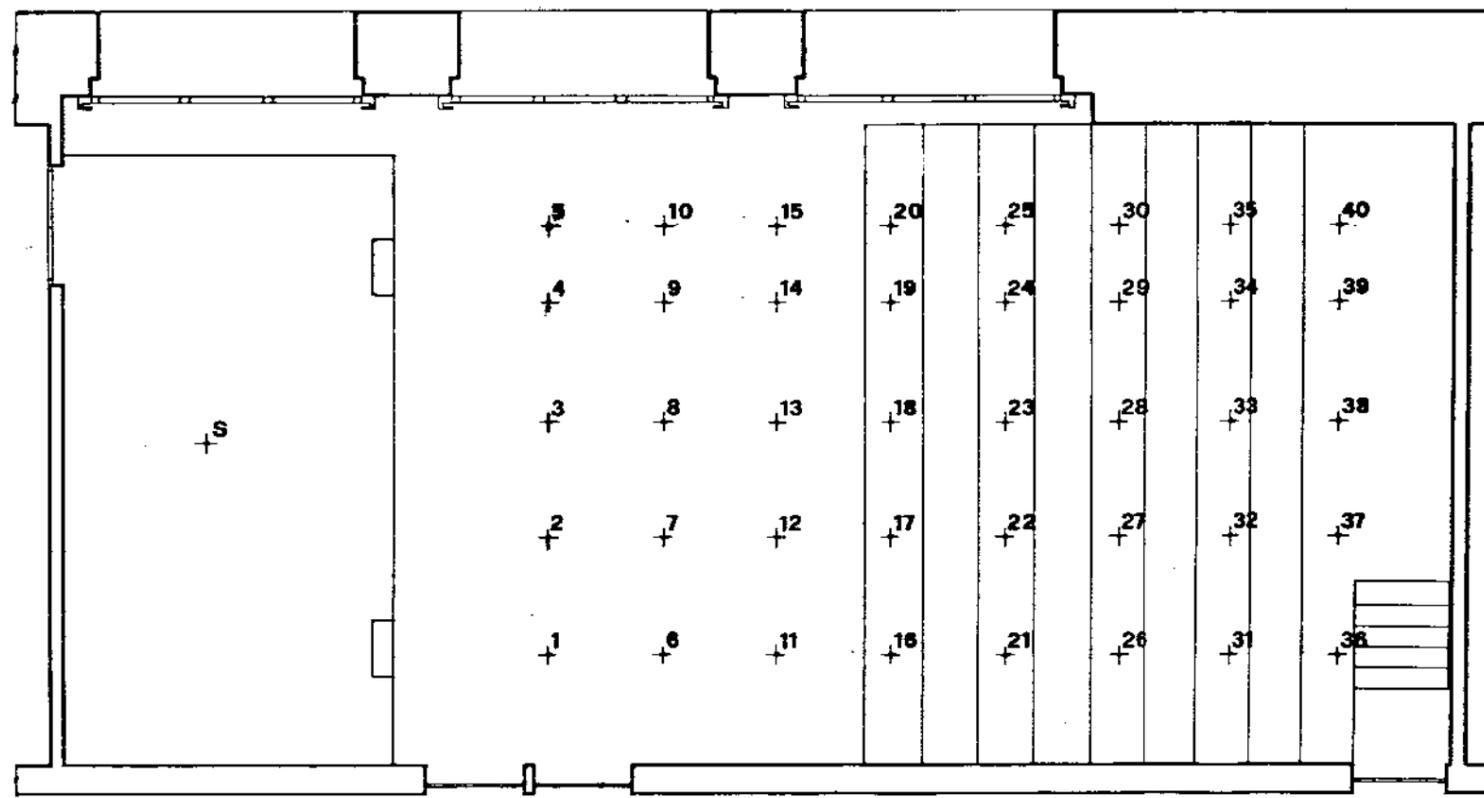


Fig. 6.2: Pianta e sezioni dell' Aula Magna (Aula 2.1).

Nelle fotografie delle fig. 6.3 e 6.4 sono visibili le grandi superfici vetrate che coprono una parete laterale della sala, ed i sedili imbottiti con piano di scrittura in legno incorporato nello schienale; la zona dedicata agli oratori è stata sopraelevata mediante un soppalco in legno, in modo da migliorare la visibilità. L'ambiente ha un volume complessivo di 1453 m³, ed ha una accoglienza di 170 posti.

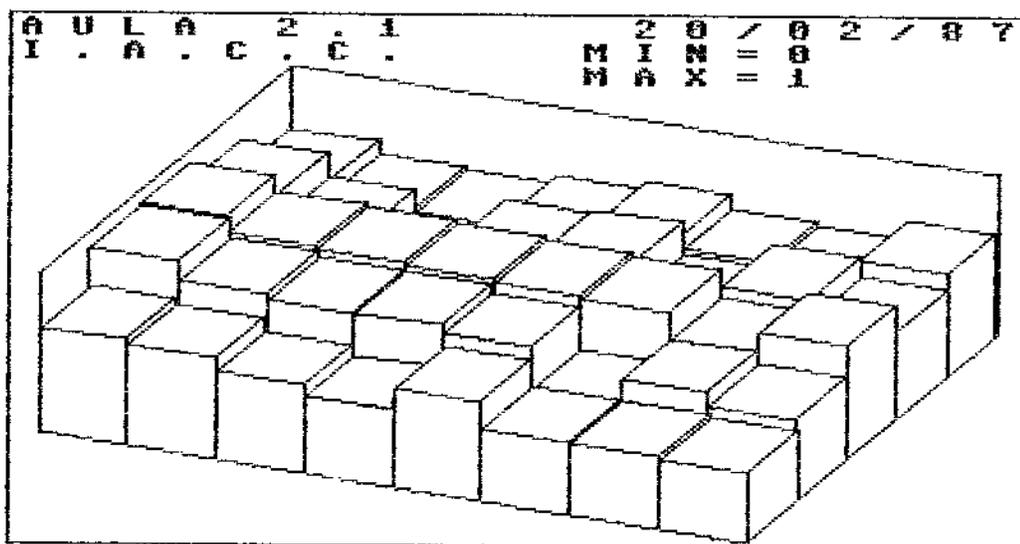
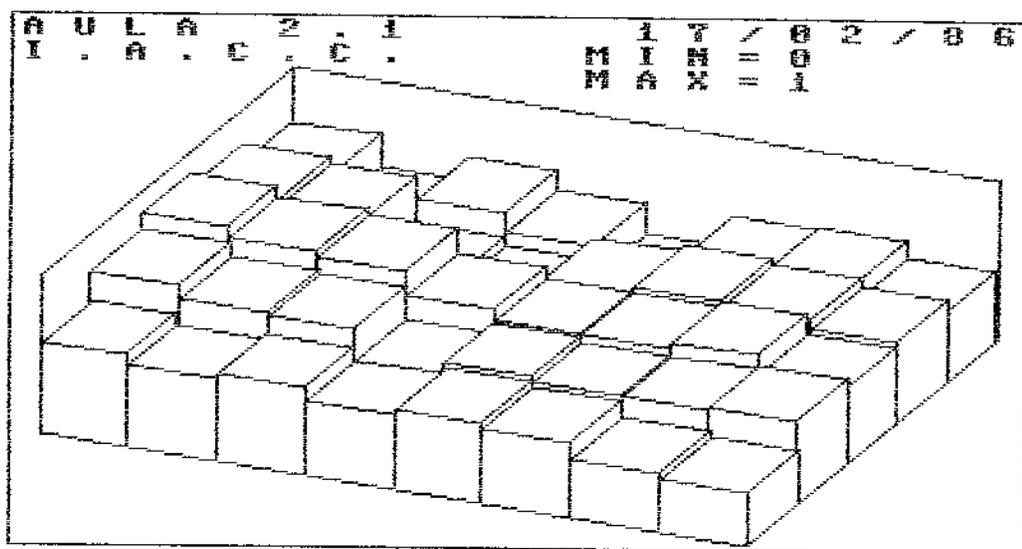


Fig. 6.3: Fotografia dell' Aula Magna.



Fig. 6.4: Fotografia dell' Aula Magna.

E' stata a piú riprese effettuata la acquisizione dei dati nell' aula di prova (indicata usualmente come Aula 2.1), raffinando di volta in volta la procedura, e constatando una sostanziale ripetibilitá dei dati ottenuti: a titolo di esempio, in fig. 6.5 é riportato il confronto fra le misure di Correlazione Mutua Inter-Aurale (IACC) effettuate a distanza di un anno. Benché si tratti di una delle prime e dell' ultima misura eseguita, si nota che le differenze sono accettabili, tenuto anche conto del fatto



g. 6.5: Confronto fra le misure effettuate a distanza di un anno.

che la prima misura è stata eseguita con la sala in parte piena di studenti, mentre la seconda invece con sala vuota e con basso valore del rumore di fondo.

Nelle successive figure 6.6, 6.7, 6.8, e 6.9 vengono presentati i valori assunti dai parametri oggettivi misurati nel corso della ultima acquisizione: dallo studio di questi grafici si comprendono alcuni tipici fenomeni, comuni in generale alle sale a pianta rettangolare.

La fig. 6.6 rappresenta la distribuzione di livello sonoro prodotto nell'aula da una (ipotetica) sorgente della potenza di 100 dB: in effetti i livelli misurati sono stati rapportati al livello di potenza effettivo della sorgente sonora utilizzata, che non è stato necessariamente mantenuto costante nel corso della acquisizione. Il livello è prossimo agli 80 dB(A) solo nella zona più vicina alla sorgente, decresce rapidamente e si stabilizza poi attorno ai 67 dB(A) nella parte centrale e posteriore dell'ambiente: è evidente che questo comportamento deriva dalle caratteristiche fortemente riverberanti dell'ambiente, per cui oltre una certa distanza il contributo del campo diretto al livello di ascolto diviene quasi ininfluenza. La zona ove il campo diretto è ancora significativo termina in pratica oltre la terza fila oggetto di misura (cioè la nona fila di sedili), e questa zona rappresenta la parte della platea

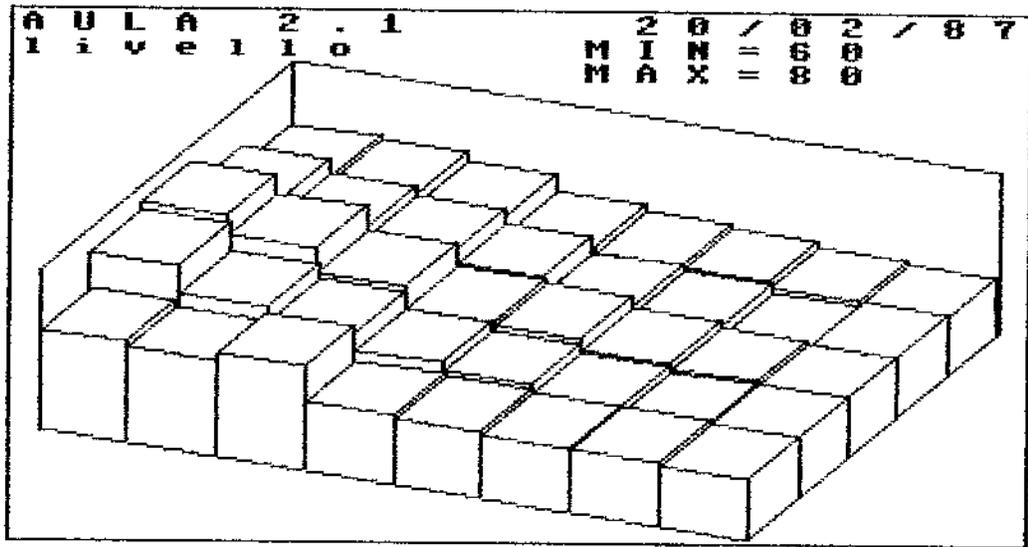


Fig. 6.6: Mappa del livello sonoro.

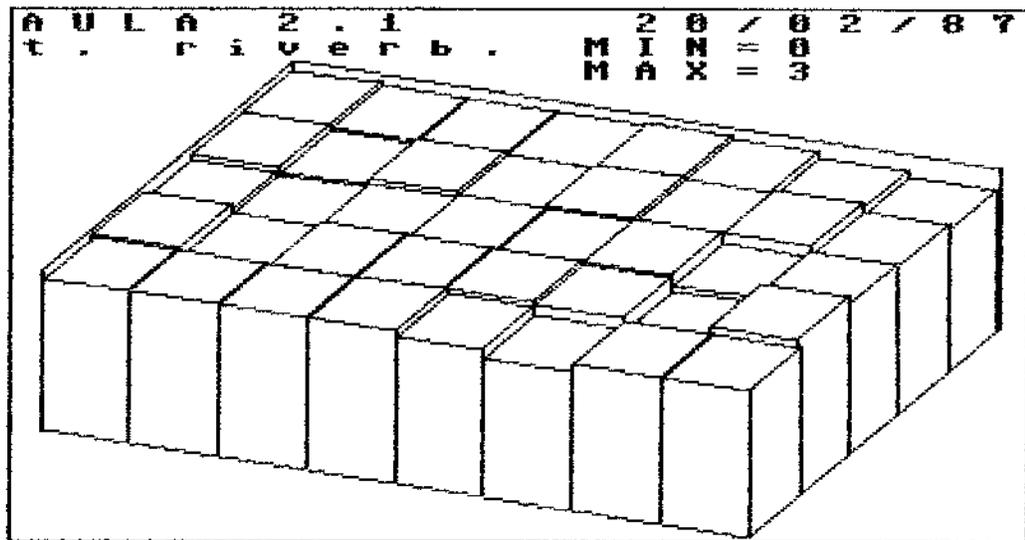


Fig. 6.7: Mappa del tempo di riverberazione.

ove é possibile comprendere abbastanza chiaramente le parole pronunciate da un oratore; nella parte retrostante il campo é perfettamente riverberante, e pertanto il parlato diviene praticamente incomprensibile.

In fig. 6.7 é riportata la mappa del tempo di riverberazione (sala vuota): si tratta del valore misurato attraverso i microfoni posti nelle orecchie della testa artificiale, ed é dovuto al decadimento complessivo di un rumore rosa fra 0 e 5000 Hz. Si nota come il valore é praticamente lo stesso in tutti i punti della sala, e vale circa 2.7 s. Anche i tempi di riverberazione misurati in bande di ottava sono pressoché gli stessi in tutti i punti, e valgono rispettivamente:

250 Hz	:	T =	2.30 s
500 Hz	:	T =	2.78 s
1000 Hz	:	T =	2.98 s
2000 Hz	:	T =	2.75 s
4000 Hz	:	T =	2.16 s

I valori sono piuttosto elevati, del tutto inadatti all'uso prevalente della sala (lezioni e conferenze); anche le occasionali rappresentazioni musicali che si svolgono nell'Aula Magna hanno usualmente il carattere della musica da camera, e richiedono tempi di riverberazione piú bassi.

Nonostante l'elevato valore del tempo di riverberazione, la sala non é però del tutto inadatta alle

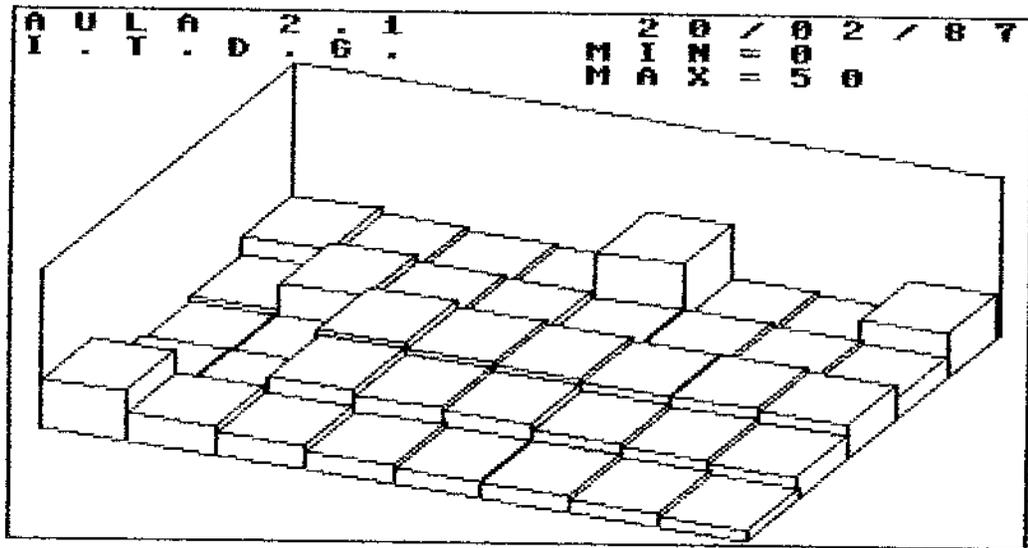


Fig. 6.8: Mappa del tempo di ritardo della prima riflessione.

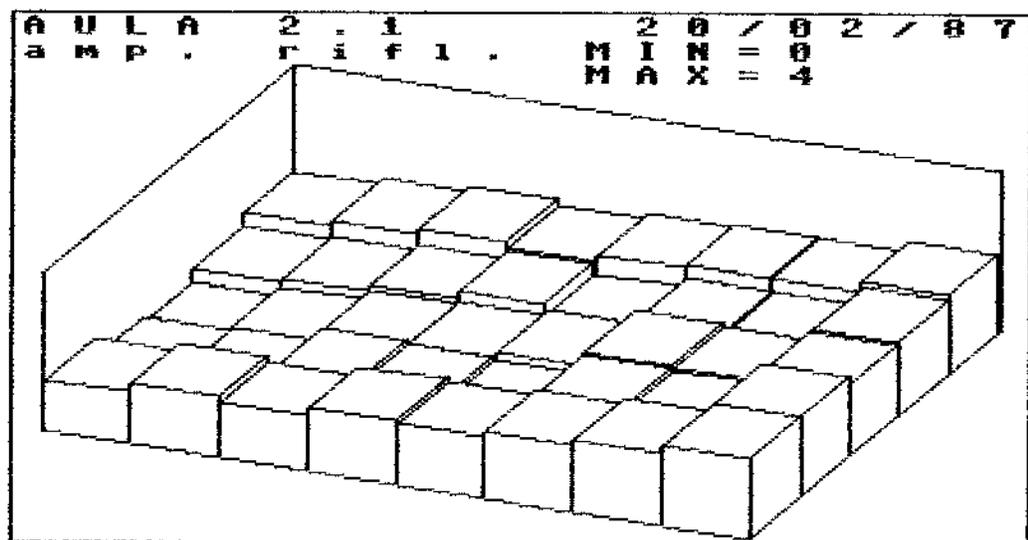


Fig. 6.9: Mappa della ampiezza equivalente delle riflessioni.

rappresentazioni musicali, poiché altri fattori positivi contribuiscono a compensare questo difetto.

Ad esempio, il tempo di ritardo della prima riflessione non è mai molto elevato, poiché la sala è stretta e con pareti laterali riflettenti: infatti in fig. 6.8 si può osservare che in quasi tutti i punti il valore di ITDG è minore di 10 ms. In due o tre punti di misura sono stati riscontrati tempi di ritardo superiori, ma questo è dovuto semplicemente alla presenza di ostacoli PRsul percorso della prima onda riflessa, per cui in effetti è stata ricevuta solo la seconda; questi casi si riscontrano solo ai lati della sala, ove usualmente il tempo di ritardo è minore per la maggiore vicinanza alla parete.

In fig. 6.9 è riportato l' andamento della ampiezza A della riflessione equivalente, che è ovviamente più elevata nella zona posteriore della sala (poiché qui è minore l' ampiezza dell' onda diretta); si nota anche che l' ampiezza è maggiore ai lati, poiché qui sono più intense le riflessioni laterali.

Infine nella parte inferiore della fig. 6.5 è rappresentata la mappa della Correlazione Mutua Inter-Aurale, che varia in modo molto meno regolare dei parametri finora considerati: nonostante ciò, è evidente che essa è minore ai lati della sala, poiché qui è

presente una forte riflessione laterale; inoltre diminuisce leggermente verso il fondo della sala, poiché risulta meno importante il contributo dell'onda diretta (sempre uguale sulle due orecchie).

Le valutazioni dell'indice di preferenza sono state eseguite in relazione a due diversi brani musicali, costituenti due situazioni estreme: il primo è infatti la Sinfonietta, opera n° 48 di Malcolm Arnold, della quale è stato considerato il IV movimento (Allegro con Brio); è un brano veloce con un valore molto basso della durata effettiva della funzione di autocorrelazione ($t_e=43$ ms). Il secondo è il Royal Pavane di Gibbons, un brano piuttosto lento con elevata ripetitività ($t_e=127$ ms). La scelta di due brani con caratteristiche così diverse consente di saggiare la rispondenza della sala ad esecuzioni musicali di genere diverso, sebbene essa sia stata utilizzata sinora unicamente per musica da camera. Gli stessi due brani vengono considerati come riferimento anche per la valutazione della qualità acustica delle altre sale analizzate, in modo da rendere più plausibili i confronti fra sale diverse.

Per valutare l'indice di preferenza del livello sonoro è necessario ipotizzare una certa potenza della sorgente. Poiché il livello ottimale è di 80 dB(A) [39], mentre il livello medio prodotto nella sala da una

sorgente con potenza di 100 dB è di soli 70 dB(A), sarà necessario utilizzare una sorgente più potente per garantire il giusto livello sonoro nel maggior numero di punti della sala. Ciò si ottiene assegnando un livello di potenza della sorgente pari a 110 dB.

In pratica, anziché ricalcolare i livelli prodotti dalla nuova sorgente, è più semplice riferire i valori precedentemente determinati ad un fittizio livello ottimale di 70 dB(A), ottenendo così lo stesso indice di preferenza, grazie alle proprietà logaritmiche della scala dei dB.

Nella realtà è possibile regolare il livello di potenza della sorgente tramite un impianto di amplificazione, utilizzato per le conferenze e le lezioni, ma non idoneo per rappresentazioni musicali. Pertanto non è detto che sia possibile garantire nel corso della esecuzione di musica solista il livello di ascolto desiderato, sebbene la forte riverberazione dell'ambiente eviti una rilevante caduta di livello nella parte posteriore della sala.

In fig. 6.10 è riportato il grafico dell'indice di preferenza del livello d'ascolto (che non dipende dal brano musicale): le condizioni ottimali sono ottenute in quasi tutta la sala, tranne la zona più prossima alla sorgente sonora, ove il livello diviene eccessivo e lo

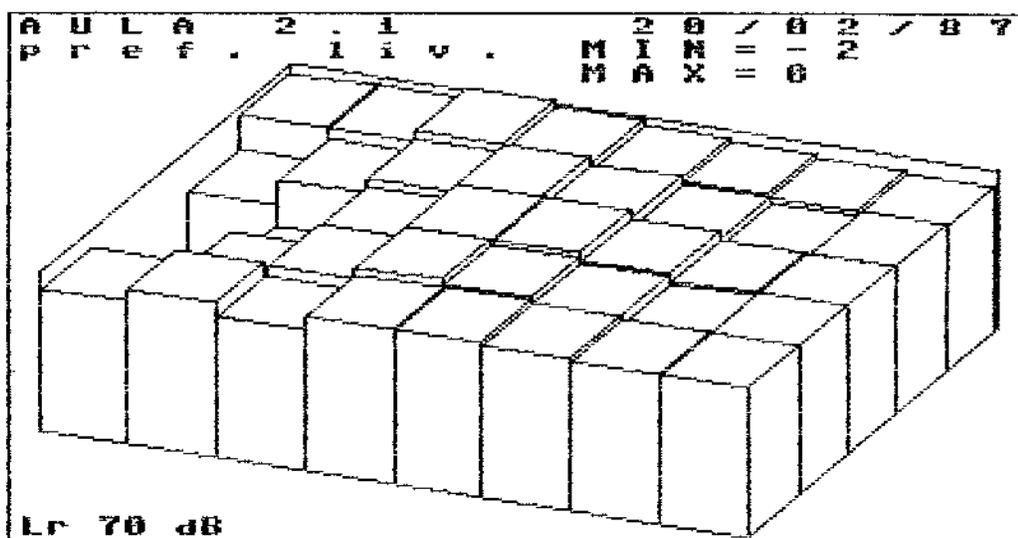


Fig. 6.10: Indice di preferenza del livello sonoro.

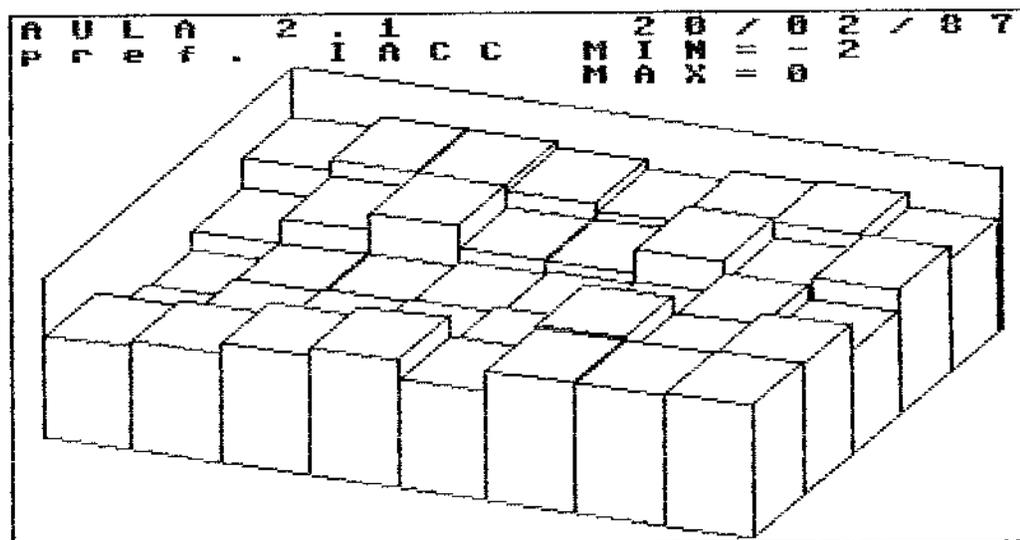


Fig. 6.11: Indice di preferenza della IACC.

indice di preferenza si riduce. Questo fenomeno si verifica peraltro anche nelle più rinomate sale da concerto, ed è uno dei motivi per cui gli spettatori non gradiscono essere in prima fila durante le esecuzioni musicali. Dal punto di vista della distribuzione del livello la sala non presenta dunque inconvenienti rilevanti per l'ascolto della musica.

L'altro parametro fisico non dipendente dal brano musicale è la Correlazione Mutua Inter-Aurale (IACC), il cui indice di preferenza è visibile in fig. 6.11.

Ovviamente l'indice di preferenza è più alto ove la IACC è più bassa, e cioè ai lati e nella parte posteriore della sala; la configurazione quasi simmetrica dello ambiente fa sì che nella zona centrale la IACC sia elevata, riducendo così la qualità acustica.

Nelle fig. 6.12 e 6.13 vengono riportati gli indici di preferenza del tempo di ritardo della prima riflessione (ITDG) e del tempo di riverberazione, riferiti al primo brano musicale, con $t_0=43$ ms. Il tempo di ritardo della prima riflessione risulta decisamente troppo corto nella zona più vicina alla sorgente (ove la riflessione proviene dal pavimento), mentre nella restante parte della sala esso è prossimo al valore ottimale, che viene raggiunto solo in quei punti ove la riflessione giunge dalla parete laterale più lontana, a causa di un ostacolo che impedisce

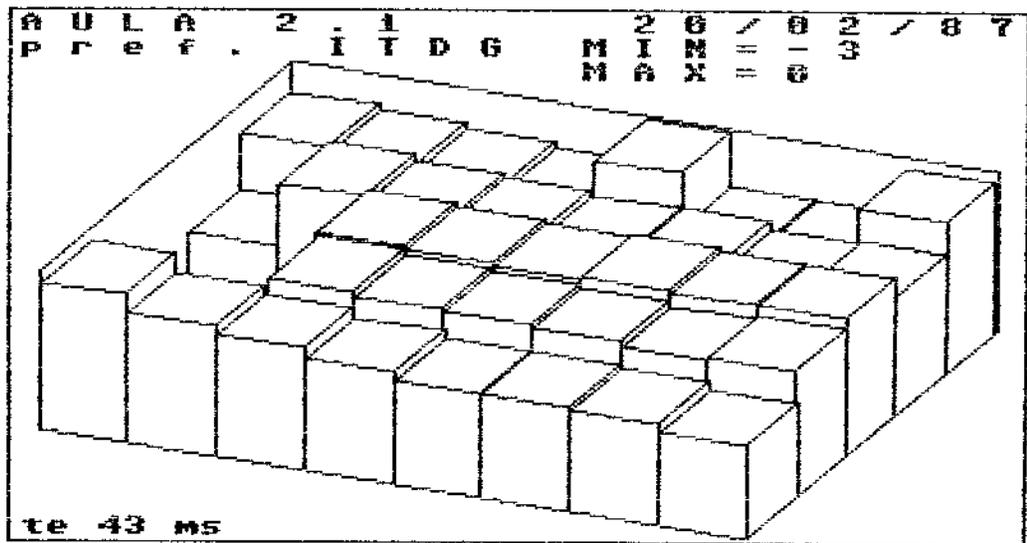


Fig. 6.12: Indice di preferenza del tempo di ritardo della prima riflessione - brano musicale 1.

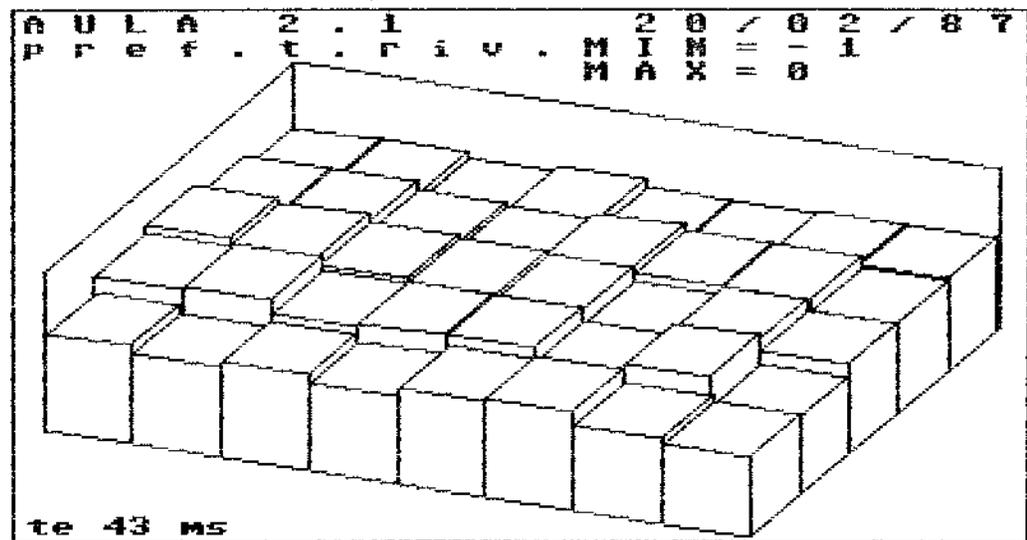


Fig. 6.13: Indice di preferenza del tempo di riverberazione - brano musicale 1.

l'arrivo della prima onda riflessa. Nella gran parte della sala si ha comunque un valore accettabile dello indice di preferenza.

Il tempo di riverberazione è invece troppo lungo per il brano musicale in questione, e pertanto si ha un valore ridotto dell'indice di preferenza; il valore è più elevato al centro della sala, poiché qui è più bassa la ampiezza A delle riflessioni. Nonostante il tempo di riverberazione di 2.7 s sia quasi il triplo del valore ottimale ($43 \times 23 = 990$ ms) l'indice di preferenza non scende mai sotto il valore -0.5; ciò dimostra che il tempo di riverberazione non è in sé molto importante sulla qualità complessiva della sala, anche quando è decisamente sbagliato come in questo caso.

Nelle fig. 6.14 e 6.15 sono riportati gli stessi due parametri (indice di preferenza di ITDG e t_r riv.) calcolati con riferimento al secondo brano musicale ($t_r = 127$ ms): si nota che il primo si è ridotto, poiché ora in tutti i punti il tempo di ritardo della prima riflessione è troppo piccolo rispetto al nuovo valore ottimale, mentre il secondo è aumentato, essendo stavolta il tempo di riverberazione praticamente coincidente con il valore ottimale. Il primo effetto è però predominante sul secondo, per cui l'indice di preferenza totale risulta leggermente più basso per il secondo brano musicale che

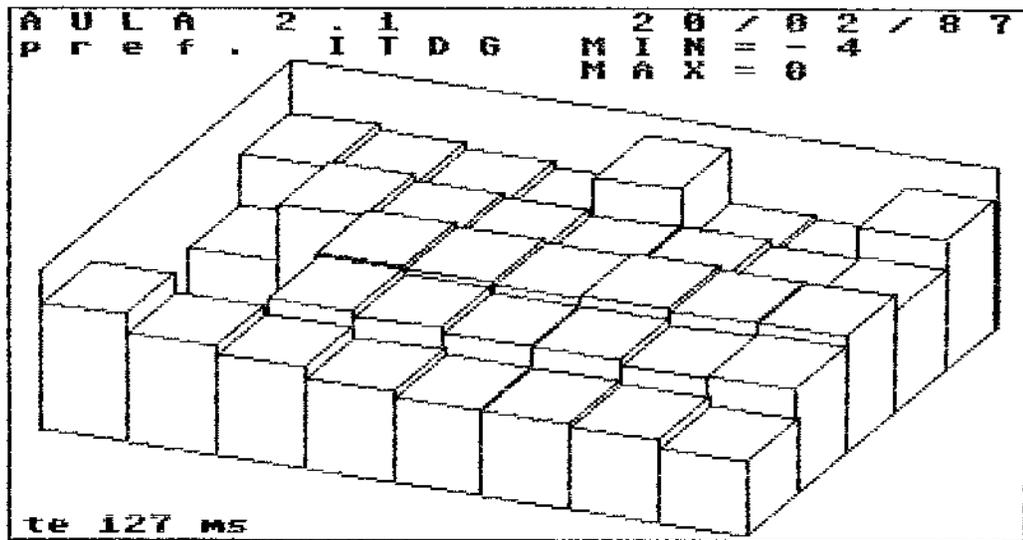


Fig. 6.14: Indice di preferenza del tempo di ritardo della prima riflessione - brano musicale 2.

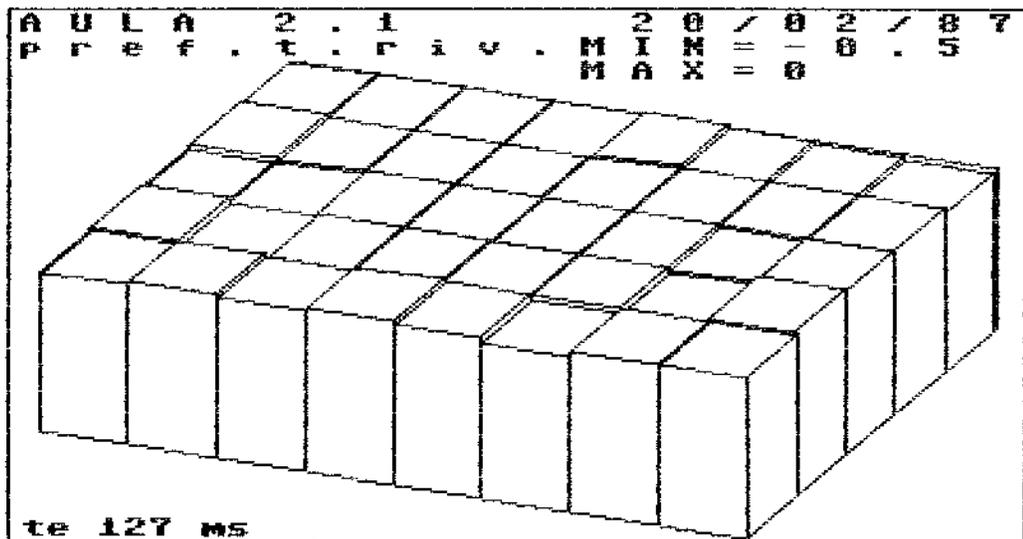


Fig. 6.15: Indice di preferenza del tempo di riverberazione - brano musicale 2.

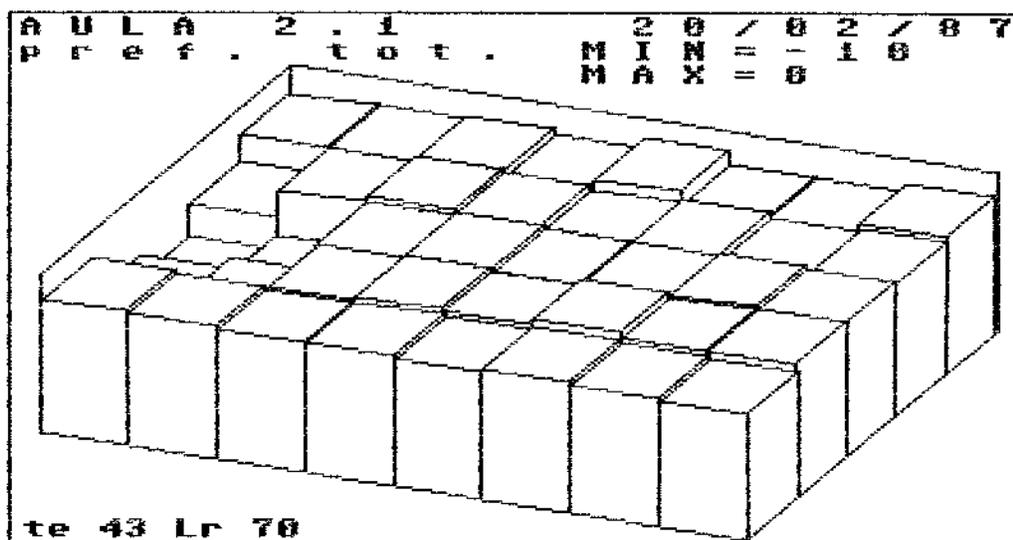


Fig. 6.16: Indice di preferenza totale - brano musicale 1.

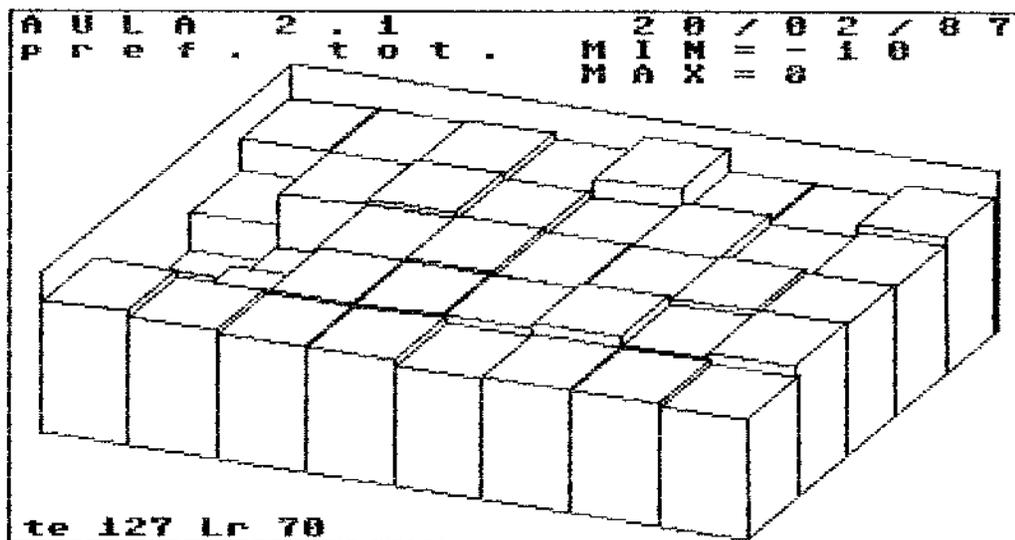


Fig. 6.17: Indice di preferenza totale - brano musicale 2.

per il primo, come si può vedere dalle fig. 6.16 e 6.17.

In entrambi i casi l'indice di preferenza totale è abbastanza livellato in gran parte della sala, e si riduce drasticamente solo in stretta prossimità della sorgente sonora; il valore medio oscilla tra -1 e -2, e non è così basso come la reputazione della sala avrebbe fatto presupporre (la reputazione deriva però in gran parte dall'uso come sala per conferenze, uso per la quale la Aula 2.1 è decisamente inadatta).

Si nota pertanto che i vari fenomeni relativi ai singoli parametri oggettivi tendono a compensarsi reciprocamente, tranne che nella zona anteriore-centrale; ciò dimostra che da una valutazione di qualità complessiva di un ambiente come questo è difficile estrarre le informazioni relative ai singoli fenomeni che hanno concorso ad ottenere la valutazione complessiva, mentre dalla procedura analitica adottata è emersa la importanza relativa dei singoli fenomeni e la loro variabilità nello ambiente.

Riguardo la possibilità di interventi per migliorare l'acustica della sala occorre ovviamente distinguere in base all'uso previsto; come è già stato sottolineato [67], per l'uso come sala da conferenze occorrerebbe un massiccio trattamento fonoassorbente, l'aumento della inclinazione della platea, ed un riflettore sopra la zona

destinata agli oratori per aumentare il livello sonoro nella parte posteriore della sala senza dover ricorrere ad impianti di amplificazione.

Per l'uso come sala da concerto, la presente ricerca indica che non c'è da attendersi un grosso miglioramento da un trattamento fonoassorbente, e che un aumento della inclinazione della platea o un riflettore centrale sopra gli esecutori porterebbero probabilmente ad un aumento della IACC con conseguente riduzione di preferenza. Sarebbe invece auspicabile l'installazione di riflettori laterali, e la movimentazione delle pareti in modo da aumentare la diffusione dell'energia sonora.

Trattandosi sostanzialmente di un ambiente scelto per la messa a punto del procedimento, piuttosto che come obiettivo delle ricerche svolte, non è stata sviluppata una ipotesi dettagliata di intervento sull'ambiente stesso, in considerazione anche del fatto che essa ben difficilmente sarebbe poi stata posta in essere.

6.2 Teatro del Convitto Nazionale Maria Luigia di Parma

Dopo l' aula di prova, la prima sala della quale è stata eseguita la valutazione della qualità acustica è stata quella del Convitto Nazionale Maria Luigia di Parma. Quest' ultimo è un complesso edificato agli inizi dello '800, tramite una profonda ristrutturazione dello esistente Palazzo dell' Arena. Maria Luisa d' Austria affidò la progettazione all' architetto di corte Nicola Bettoli, al quale si deve anche il teatro di cui lo edificio è dotato.

La costruzione del teatro ebbe inizio nel 1821 e si concluse nel 1829. Quattro anni dopo, Maria Luisa decretò la fusione del Collegio dei Nobili e del Collegio Lalatta nel Convitto Nazionale Maria Luigia, che fu installato nella sede ormai ultimata. Il Convitto è rimasto in attività da allora sino ad oggi, fornendo alla cittadinanza la possibilità di ottenere una educazione di qualità elevata dalle scuole elementari a quelle superiori (Liceo Classico e Scientifico). Nei programmi didattici del Convitto hanno sempre avuto parte rilevante le attività sportive e quelle culturali extra scolastiche, rese possibili grazie alle notevoli strutture di cui era

stato dotato dalla sua fondatrice (maneggio coperto, sala di schermo, palestra).

Nel quadro delle attività culturali, il teatro ha mantenuto un ruolo di primo piano, ed anche oggi viene intensamente utilizzato per prosa, musica e proiezioni cinematografiche. Il calendario è così fitto che è stato necessario attendere alcune settimane prima di avere a disposizione la sala per le prove acustiche.

La sala è molto interessante dal punto di vista architettonico soprattutto per le decorazioni pittoriche: il soffitto è decorato da Giovanni Gaibazzi, che ha raffigurato le arti maggiori fra putti e ghirlande floreali, le pareti laterali hanno visto anche il contributo di Macedonio Melloni e Paolo Zucchi, mentre il pregevole sipario è opera di Girolamo Magnani, autore anche delle ben più famose scenografie del teatro Regio di Parma [78].

Nelle fig. 6.18 e 6.19 sono visibili fotografie scattate nel corso delle prove acustiche: si notano i sedili interamente in legno, la balconata che corre attorno alla sala, sostenuta da fregi marmorei, le finestre coperte da pesanti tende di velluto ed il proscenio con il sipario abbassato. La capienza della sala è di 250 posti, adeguata alle esigenze degli allievi del Convitto.



Figg. 6.18 e 6.19: Fotografie del teatro del Convitto Nazionale Maria Luigia.

Essendo la sala piuttosto larga in relazione alle altre dimensioni, è stato adottato un elevato numero di punti di misura per fila (7), mentre è stato sufficiente considerare solo 6 file di punti di misura, circa equispaziate. Nella fig. 6.20 è visibile la pianta del locale, che è stato necessario disegnare, vista la totale mancanza di rilievi grafici preesistenti. Sulla pianta è riportato il posizionamento dei punti di misura, nonché la posizione della sorgente sonora.

Nella fig. 6.20 è rappresentata una sezione longitudinale dell' ambiente, dalla quale si nota la mancanza di pendenza della platea e la altezza non elevata del soffitto.

Le misure sono state eseguite quando ancora la procedura di misura del tempo di riverberazione non era divenuta operativa con sicurezza, per cui si è provveduto a misurare questo parametro tramite la usuale strumentazione in terzi d' ottava visibile in fig. 2.7. Vista la notevole lentezza di questo strumento, la misura del tempo di riverberazione è stata eseguita solo in un punto per ogni fila, ma ha dato sempre risultati pressoché coincidenti. Per ricavare dalle misure in terzi d' ottava il valore complessivo del tempo di riverberazione pesato A ($T_{0.05}$) si è ricorsi ad una ricostruzione numerica del decadimento sonoro, ammettendo che il segnale della

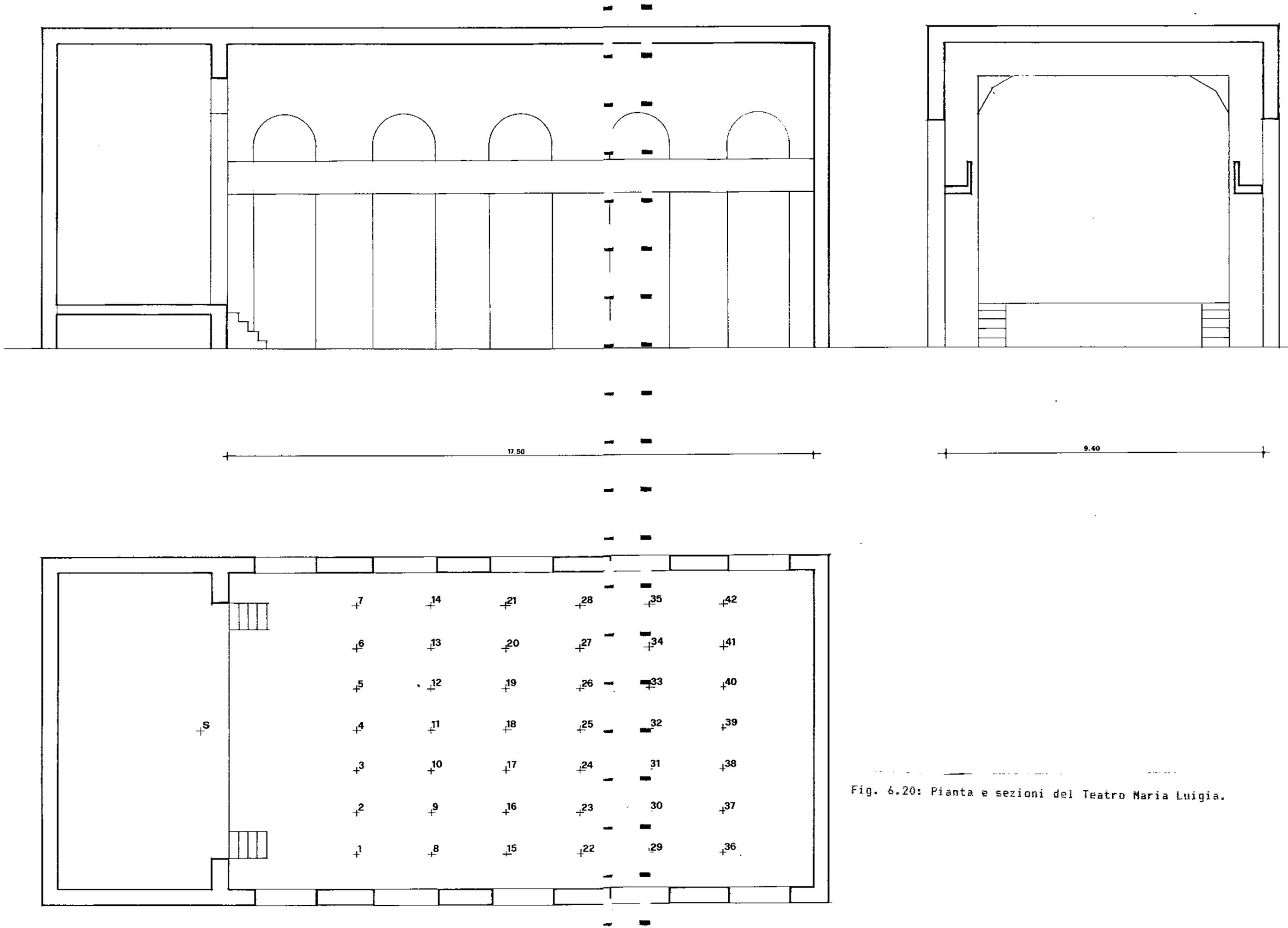


Fig. 6.20: Pianta e sezioni del Teatro Maria Luigia.

sorgente contenesse all'istante dello spegnimento uguale energia in ogni banda di frequenza, e calcolando per gli istanti successivi il livello complessivo pesato "A" dei singoli livelli nelle bande di terzo d'ottava, attenuati ciascuno in base al tempo di riverberazione corrispondente.

Nella fig. 6.21 è visibile la mappa del livello sonoro, che mostra una ottima uniformità longitudinale, nel senso che non si verifica il forte incremento di livello in prossimità del palcoscenico che caratterizza altre sale simili. Il livello nel punto centrale di ogni fila è sensibilmente più alto di quello dei punti adiacenti, ma ciò è facilmente spiegabile osservando che questo punto si trova nel corridoio centrale, e pertanto riceve una forte riflessione dal pavimento (parquet di legno) e non subisce l'attenuazione dell'onda diretta per incidenza radente sui sedili antistanti. A rigore il punto centrale di ogni fila non ha neppure rilevanza ai fini della qualità acustica della sala, poiché in esso non sono comunque mai presenti spettatori.

Nella fig. 6.22 si osserva invece il valore pressoché uniforme del tempo di riverberazione: come già spiegato, la uniformità in direzione trasversale dipende dal fatto di aver misurato un solo punto per fila; viceversa la uniformità in senso longitudinale è segno di una

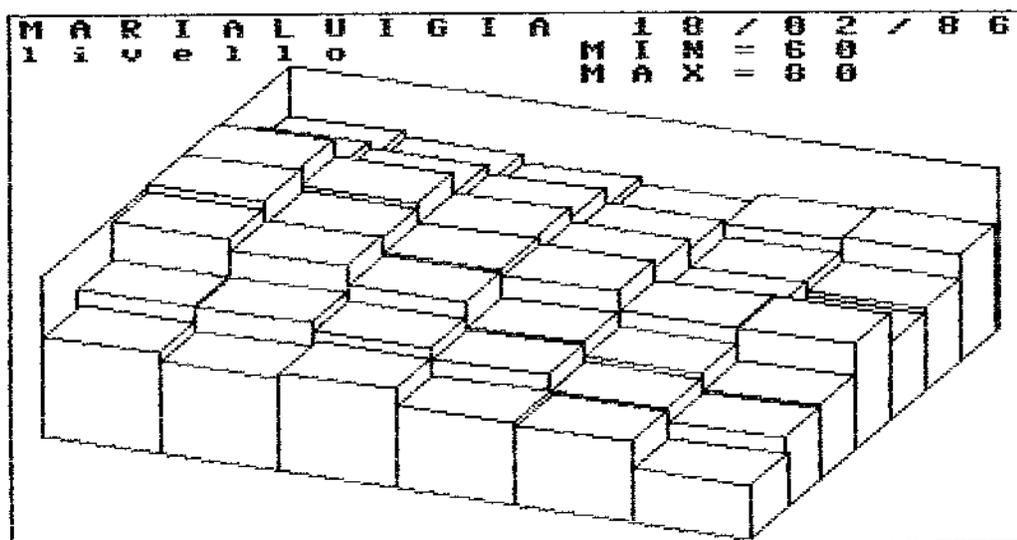


Fig. 6.21: Mappa del livello sonoro.

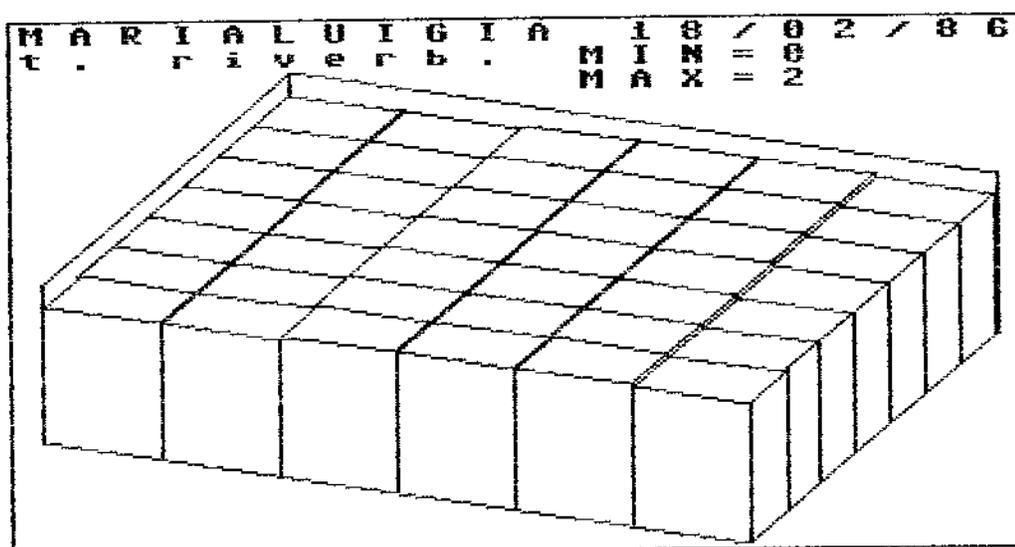


Fig. 6.22: Mappa del tempo di riverberazione.

sostanziale invarianza di questo parametro in tutti i punti dell' ambiente.

Il valore ottenuto è di 1.70 s, ed è forse leggermente elevato in relazione alle dimensioni ed all' utilizzo dell' ambiente. Va però tenuto conto del fatto che le misure sono state eseguite con sala vuota, e che la presenza del pubblico riduce notevolmente il valore del tempo di riverberazione, poiché i sedili in legno vuoti danno un assorbimento abbastanza contenuto in rapporto all' assorbimento sviluppato a sedili occupati. Pertanto si può ritenere che la sala presenti sostanzialmente un valore corretto per questo parametro.

In fig. 6.23 è visibile la mappatura del tempo di ritardo della prima riflessione (ITDG), che è molto ridotto nella parte anteriore della sala (tranne che in un punto, nel quale la riflessione laterale sinistra è schermata da una tenda). Nella parte posteriore dello ambiente il tempo di ritardo cresce leggermente, restando comunque sempre su valori molto ridotti (minori di 20 ms).

In fig. 6.24 si osserva il valore della ampiezza equivalente delle riflessioni A: essa è elevata ai lati della sala, mentre si riduce notevolmente nella zona centrale-anteriore. I valori elevati di questo parametro discendono dalla notevole movimentazione delle superfici laterali, che producono una forte diffusione del suono.

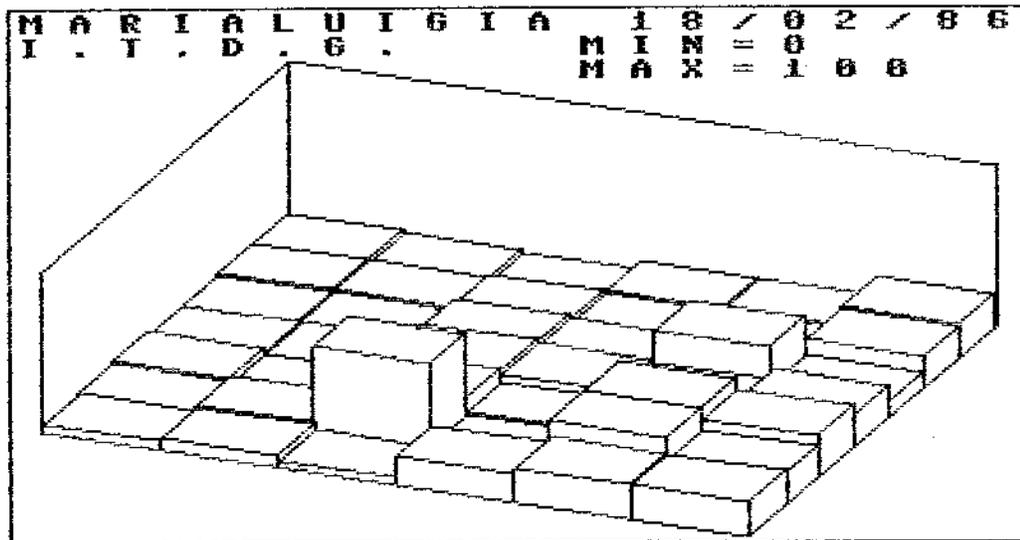


Fig. 6.23: Mappa del tempo di ritardo della prima riflessione.

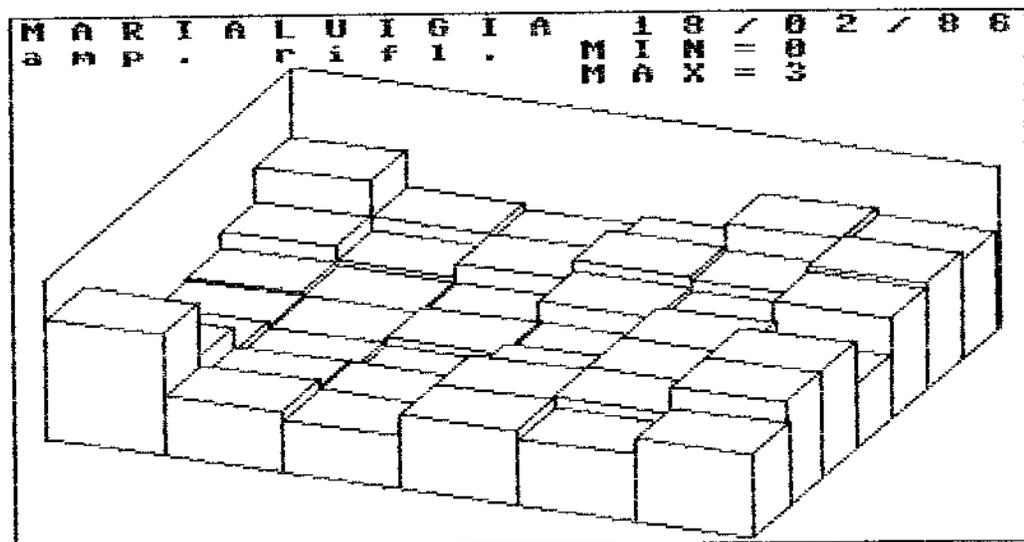


Fig. 6.24: Mappa della ampiezza equivalente delle riflessioni.

In fig. 6.25 si può infine vedere la distribuzione della Correlazione Mutua Inter-Aurale (IACC), che presenta ovviamente i massimi valori nei punti centrali delle file (che tutto sommato non contano), mentre si riduce ai lati, a causa della diffusione del suono prodotta dalle pareti laterali.

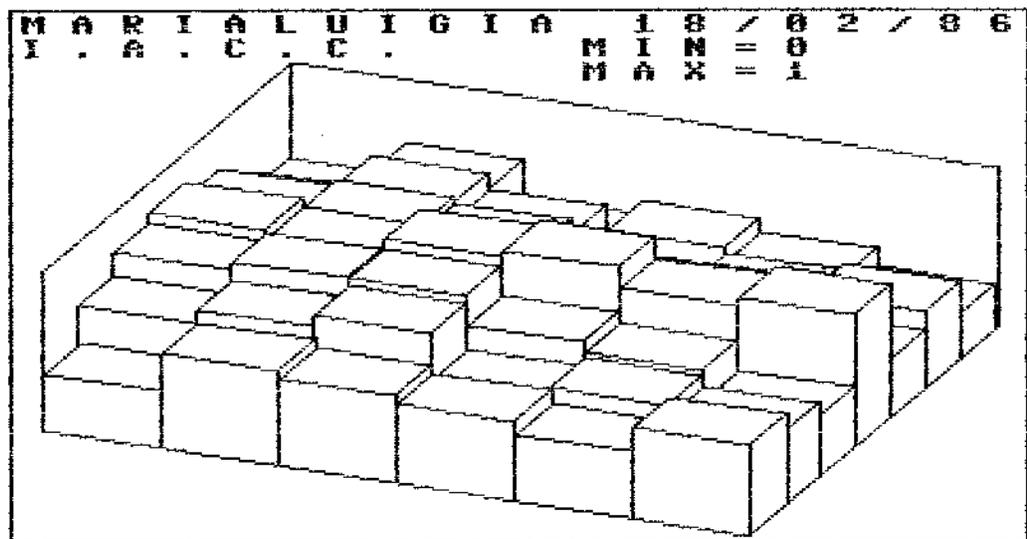


Fig. 6.25: Mappa della IACC.

Per la valutazione degli indici di qualità acustica sono stati seguiti gli stessi criteri già illustrati per l'aula di prova: si è fatto riferimento a due brani musicali con durata convenzionale della autocorrelazione pari rispettivamente a 43 e 127 ms, mentre si è supposto che la sorgente sonora avesse una potenza tale da garantire buone condizioni d'ascolto nella maggior parte della sala.

In base a quest'ultima considerazione, è stato fissato un livello di potenza della sorgente di 107 dB, cui corrisponde un livello di riferimento di 73 dB(A). Si nota in pratica che questa potenza è inferiore a quella richiesta nell'aula di prova, che pure aveva una capienza quasi dimezzata: ciò è segno che il teatro in esame è dotato di una buona sonorità, e non richiede dunque particolari accorgimenti per garantire un adeguato livello d'ascolto (difatti non è presente alcun impianto di amplificazione).

In fig. 6.26 è riportato l'andamento dell'indice di preferenza del livello sonoro: esso si riduce fortemente solo in pochissimi posti situati in vicinanza della sorgente, e manifesta una lieve tendenza alla diminuzione nella zona posteriore sinistra, dovuta all'attenuazione prodotta in questa zona dalle tende di velluto situate appunto sulla parete sinistra.

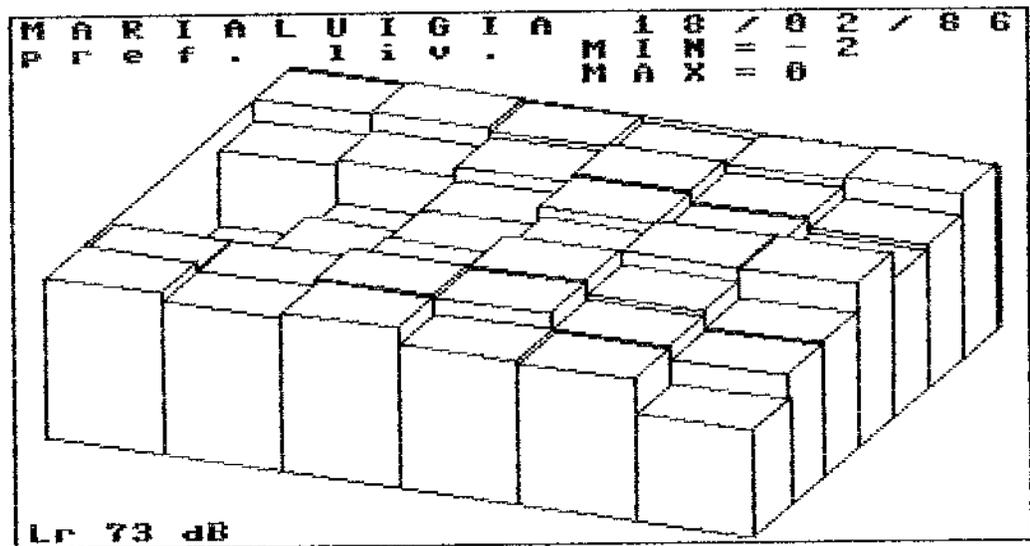


Fig. 6.26: Indice di preferenza del livello sonoro.

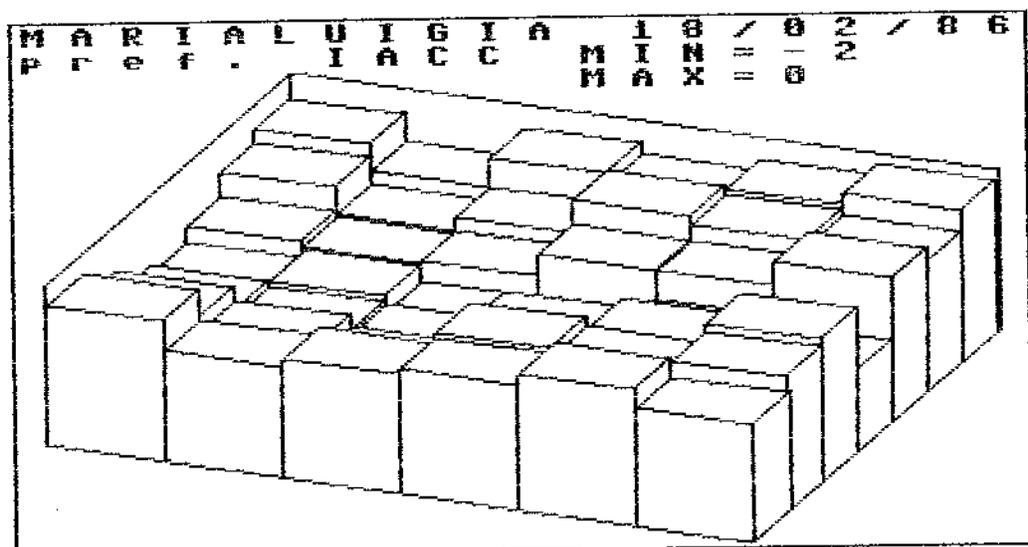


Fig. 6.27: Indice di preferenza della IACC.

L'indice di preferenza della IACC mostra ciò che già era evidente dalla mappatura del parametro fisico: in fig. 6.27 si nota infatti che la preferenza è elevata nelle zone laterali, mentre è molto ridotta al centro delle file, in corrispondenza del corridoio di passaggio.

Considerando il primo brano musicale, con $t_e=43$ ms, si nota che l'indice di preferenza del tempo di ritardo della prima riflessione (ITDG), riportato in fig. 6.28, mostra i suoi massimi valori nella parte posteriore della sala: nella parte anteriore, viceversa, l'ITDG è troppo piccolo, e ciò riduce l'indice di preferenza. Va comunque detto che la sala è tutto sommato di dimensioni piuttosto ridotte, e che non è in alcun modo possibile fare aumentare l'ITDG in ambienti di questa taglia.

Il tempo di riverberazione è un po' troppo lungo per il brano musicale in questione, e questo fatto viene segnalato dalla lieve riduzione del corrispondente indice di preferenza, riportato in fig. 6.29. Si nota una certa variabilità dell'indice di preferenza, cui fa riscontro la completa uniformità del valore del tempo di riverberazione: è la diversa ampiezza equivalente delle riflessioni (A) che produce questa variabilità, poiché ove essa è maggiore (ai lati e dietro) è più avvertibile lo eccesso del tempo di riverberazione.

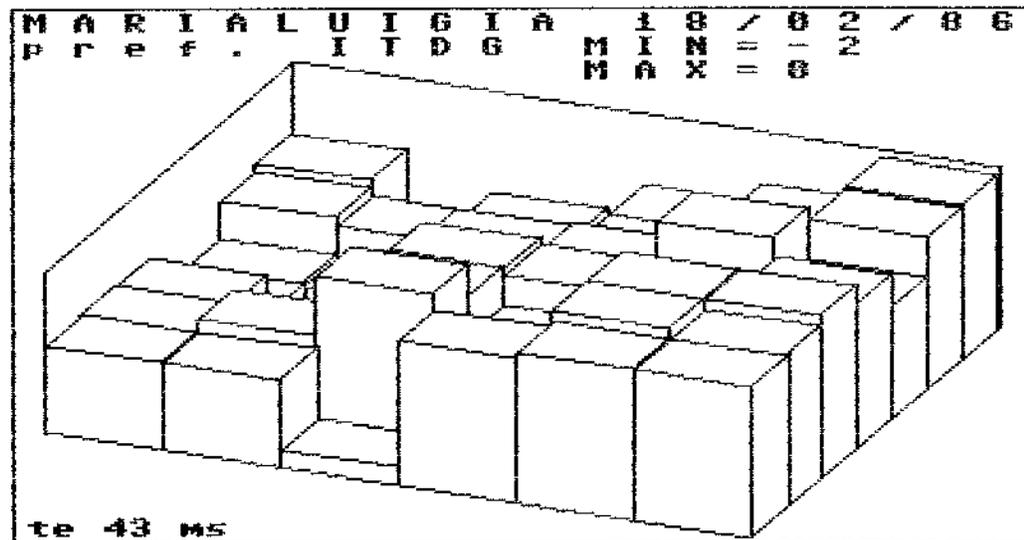


Fig. 6.28: Indice di preferenza del tempo di ritardo della prima riflessione - brano musicale I.

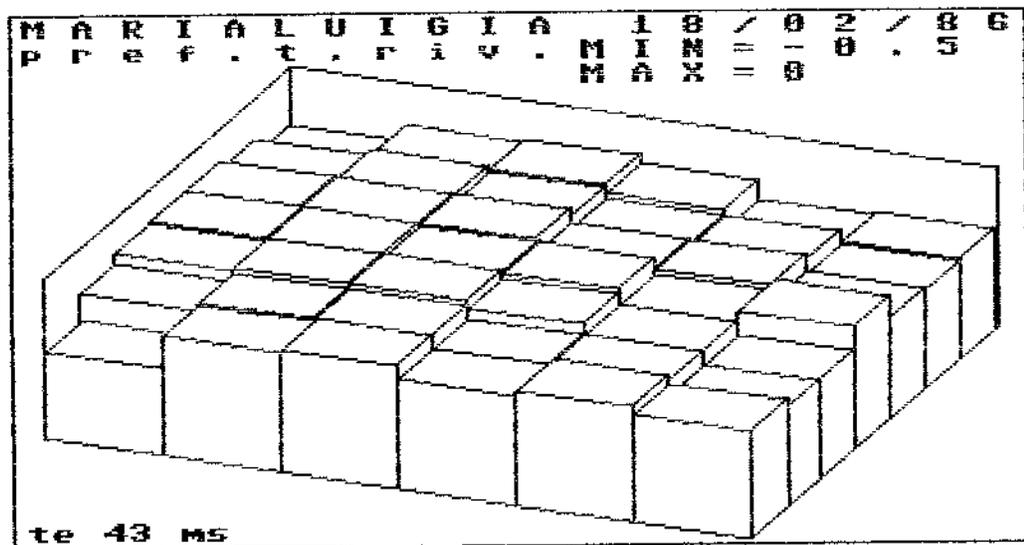


Fig. 6.29: Indice di preferenza del tempo di riverberazione - brano musicale I.

Facendo invece riferimento al secondo brano musicale ($t_e=127$ ms), si nota una sostanziale riduzione dello indice di preferenza dell' ITDG, poiché ora esso risulta ovunque troppo ridotto: ciò è ben evidente dal confronto tra le fig. 6.28 e 6.30. Va comunque ribadito che in un ambiente piccolo è impossibile attendersi valori di ITDG maggiori di quelli riscontrati.

L' indice di preferenza del tempo di riverberazione rimane circa agli stessi livelli del primo brano musicale, poiché ora il tempo di riverberazione è troppo corto: la fig. 6.31 mostra però che ora l' effetto dell' ampiezza equivalente della prima riflessione è opposto a quello di prima, poiché ove essa è più alta si avverte una maggior sensazione di riverberazione, e pertanto l' indice di valutazione è più elevato.

Considerando infine l' indice di preferenza totale, riportato nelle fig. 6.32 e 6.33 per i due brani musicali citati, si nota anzitutto che esso è sostanzialmente più elevato nel primo caso, a causa del miglior comportamento di ITDG. Inoltre il valore è piuttosto variabile da un punto all' altro, e questo fatto viene facilmente spiegato osservando che le pareti laterali movimentate fanno variare parecchio le condizioni di ascolto a seconda che nel punto considerato le riflessioni principali risultino schermate o meno.

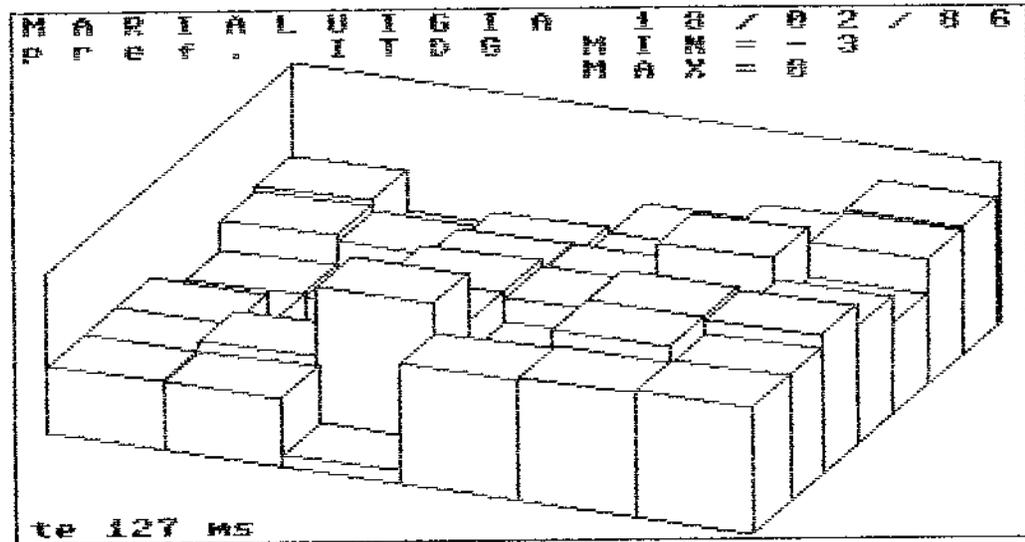


Fig. 6.30: Indice di preferenza del tempo di ritardo della prima riflessione - brano musicale 2.

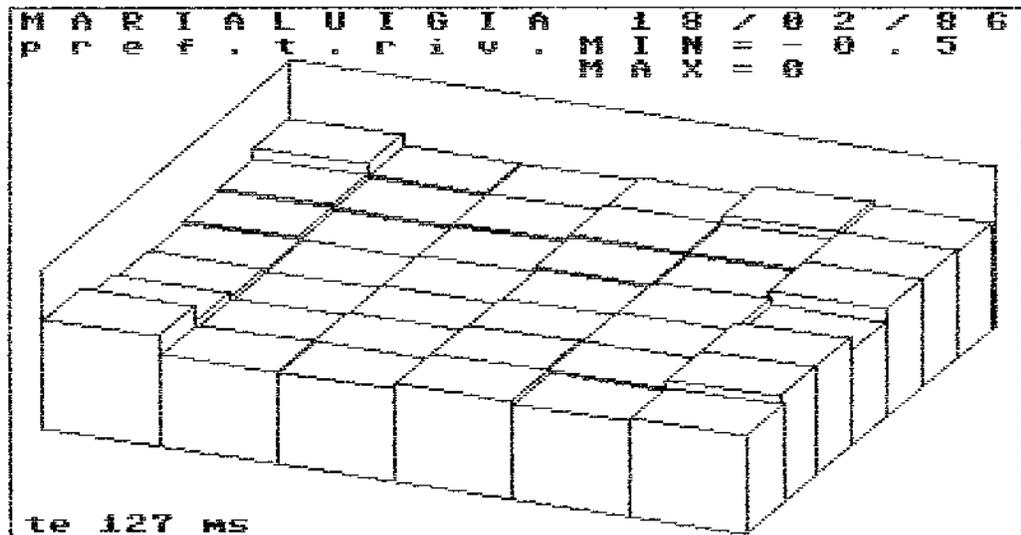


Fig. 6.31: Indice di preferenza del tempo di riverberazione - brano musicale 2.

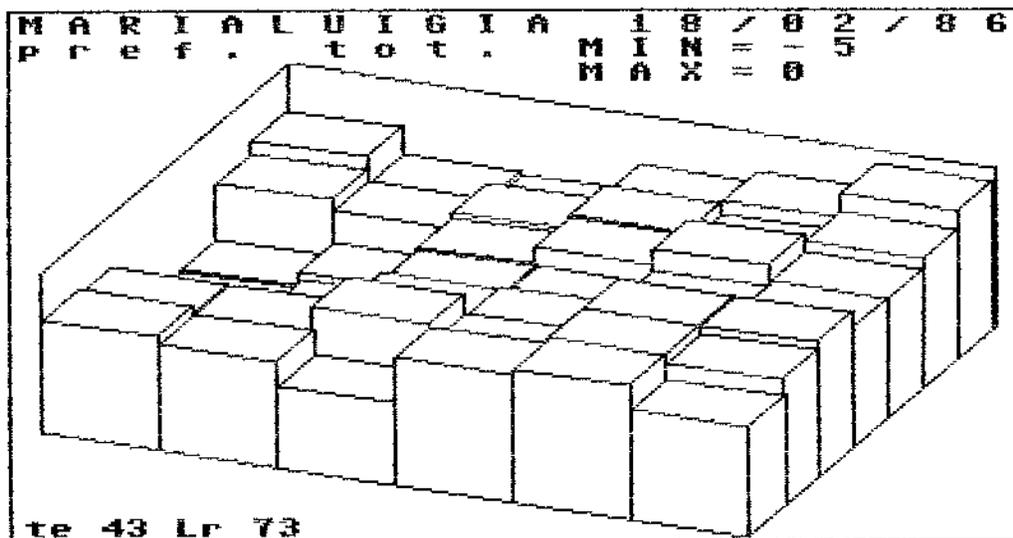


Fig. 6.32: Indice di preferenza totale - brano musicale 1.

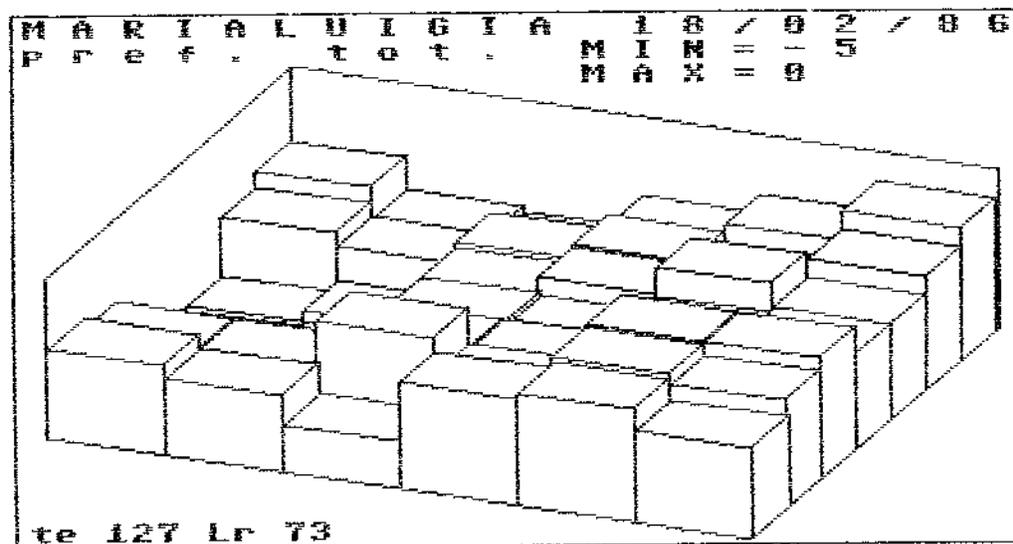


Fig. 6.33: Indice di preferenza totale - brano musicale 2.

In relazione al primo brano musicale il comportamento dell' ambiente è complessivamente buono, mentre esso lascia un po' a desiderare in relazione al secondo; ciò in effetti corrisponde alle reali necessità, poiché la sala viene usata circa in egual misura per il parlato ($t_0 < 15$ ms) e per la musica, limitatamente però a piccoli complessi di musica da camera o moderna, per le quali ben si addicono le caratteristiche riscontrate.

Volendo ulteriormente migliorare le caratteristiche dell' ambiente si potrebbe pensare ad intervenire sulle tende di velluto per l' oscuramento delle finestre, collocandole magari a filo delle pareti, in modo da non ridurre eccessivamente le riflessioni dalla parete laterale sinistra. L' installazione di poltrone imbottite renderebbe la sala utilizzabile proficuamente anche se riempita solo parzialmente, ed inoltre migliorerebbe le condizioni durante le prove dei musicisti prima della effettiva rappresentazione.

La parete di fondo piatta e riflettente andrebbe infine trattata con materiale fonoassorbente, o almeno diffondente, in considerazione anche del fatto che è priva di decorazioni; non è stato peraltro rilevato alcun eco.

6.3 Chiesa "S. Domenico" di Foligno

Su richiesta del Comune di Foligno è stata eseguita la valutazione acustica dello stato di fatto della chiesa di S. Domenico: si tratta di un edificio recentemente acquisito dal Comune, che verrà completamente ristrutturato ed utilizzato come contenitore di eventi culturali e spettacolari. Sebbene si parli in questo caso, almeno formalmente, di restauro conservativo, la ristrutturazione prevede notevoli variazioni della acustica dell'ambiente, che attualmente è simile a quella di tutte le chiese di grandi dimensioni [76,77].

Per meglio valutare gli effetti della ristrutturazione, è stata eseguita una prima campagna di misure, atte a valutare lo stato di fatto prima dello inizio dei lavori. Purtroppo alcuni inconvenienti hanno fatto sì che le misure siano state eseguite mentre nello ambiente era installato un ponteggio metallico, ed in assenza della pavimentazione: ciò ha senza dubbio influenzato i risultati, come d'altronde la mancanza di alcuni serramenti.

A ristrutturazione ultimata verranno rieseguite le misure acustiche, in modo da comprendere se e quali benefici saranno apportati dall'intervento

architettonico.

Nelle figure 6.34 e 6. 35 sono riportate la pianta e le sezioni dell' edificio in esame; si nota la rilevante lunghezza dello stesso, che ha richiesto ben 13 file di punti di misura. Essendo limitato il tempo disponibile, sono stati campionati solo 3 punti per fila, in considerazione anche del fatto che la larghezza della sala non è elevata, perlomeno in rapporto alla lunghezza. Nella fig. 6.36 sono visibili la posizione della sorgente sonora e dei punti di misura. L' altezza del vano è notevole, e per di più il soffitto è costituito da capriate in legno, per cui praticamente non si hanno riflessioni di ritorno da esso; viceversa il pavimento, pur essendo coperto di polvere e residui di intonaco, era in condizioni di riflettere facilmente l' energia sonora, poiché non erano presenti ostacoli di alcun tipo (sedie, panche, banchi).

Accanto alla valutazione eseguita con la procedura qui presentata, sono state effettuate nella chiesa di S. Domenico anche le tradizionali misure acustiche con strumentazione analogica: in pratica sia la mappa dei livelli così determinata, sia i tempi di riverberazione hanno mostrato un sostanziale accordo fra i due tipi di misura.

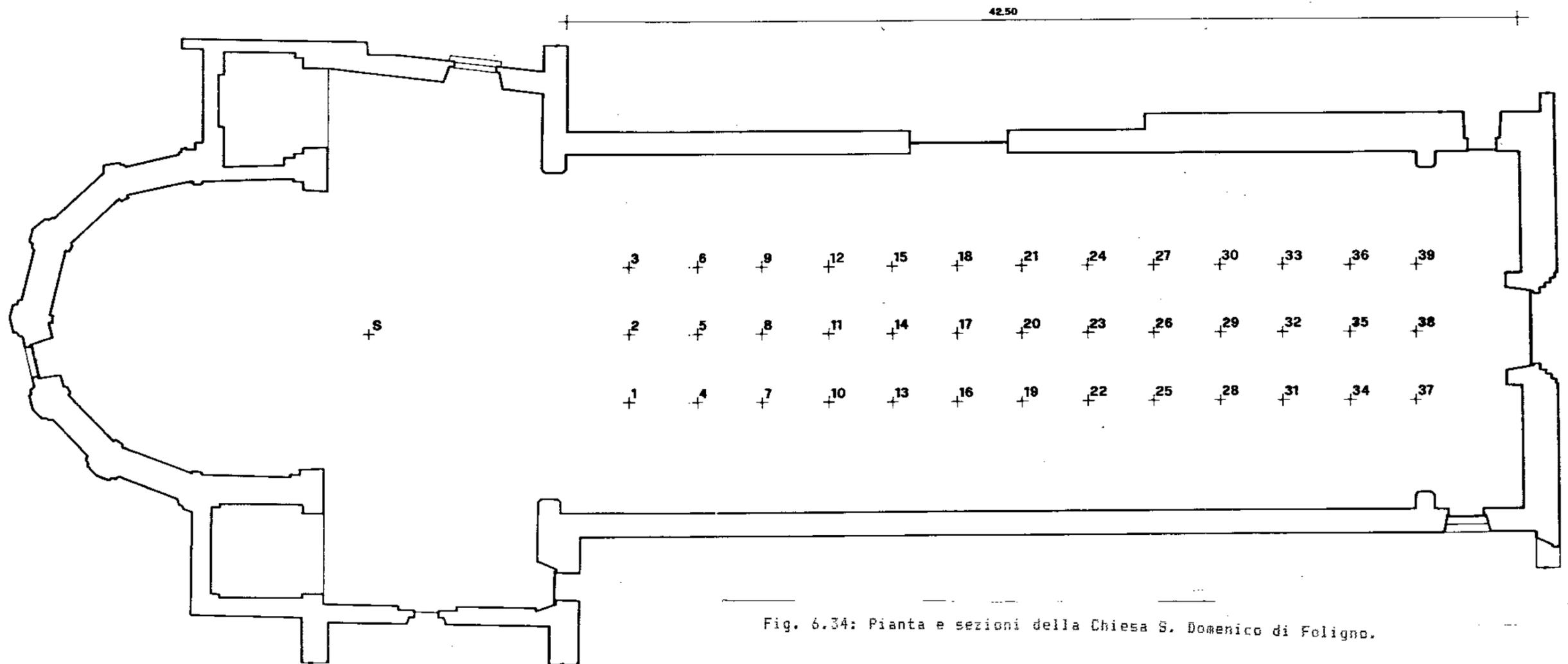
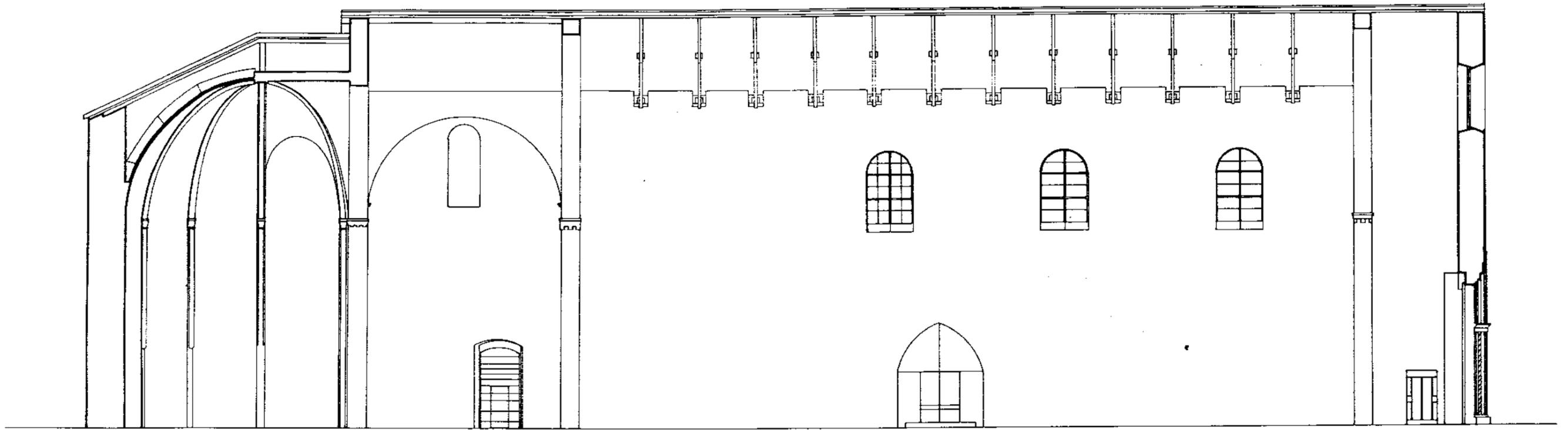


Fig. 6.34: Pianta e sezioni della Chiesa S. Domenico di Foligno.

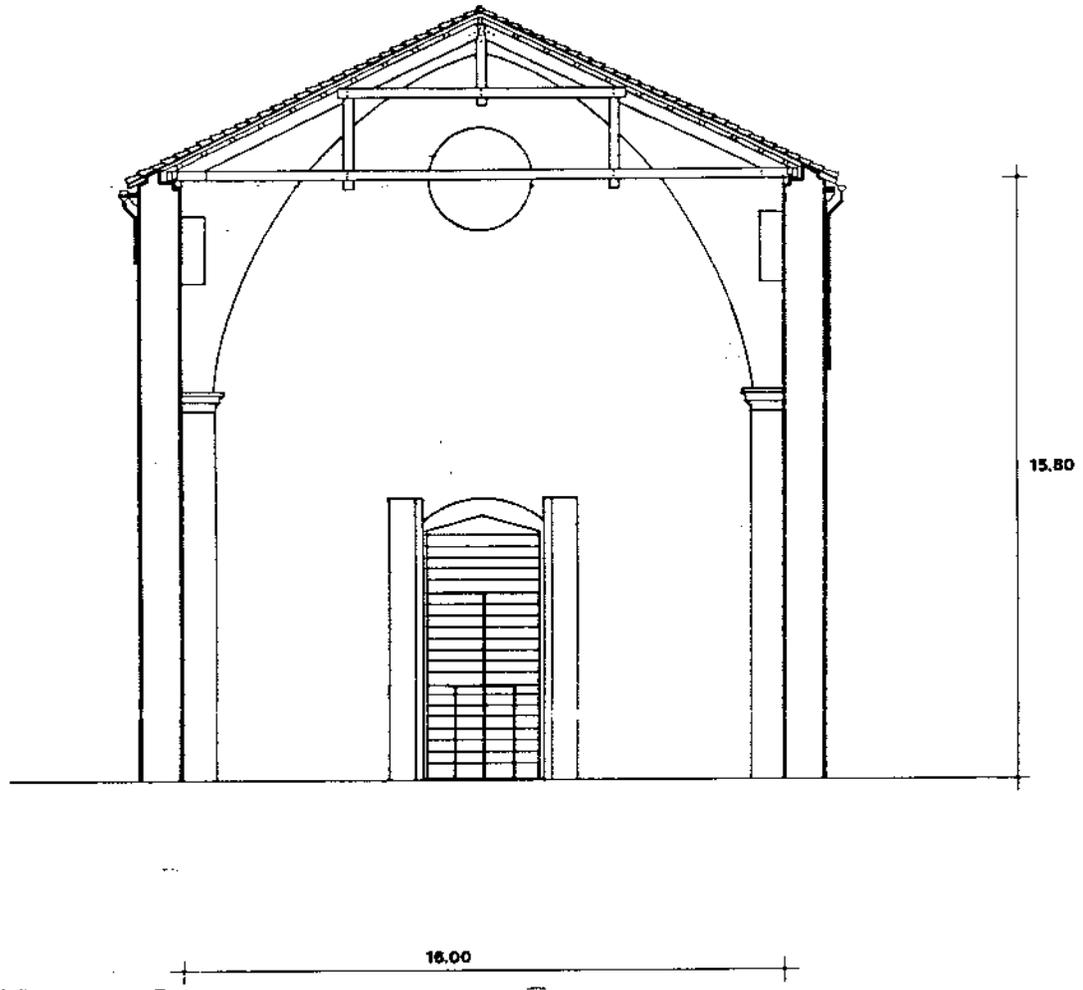


Fig. 6.35: Sezione trasversale della Chiesa S. Domenico.

Nella fig. 6.36 è riportata la mappa del livello sonoro: si nota un valore pressoché costante nella parte anteriore della platea, un progressivo calo nella zona centrale della sala, e di nuovo un valore livellato nella parte posteriore. Vista la notevole lunghezza dello ambiente, era inevitabile doversi attendere una rilevante diminuzione di livello nella parte posteriore; manca una zona anteriore con livello molto forte, poiché i primi punti di misura sono già ad una distanza discreta dalla sorgente (11 m).

Il tempo di riverberazione, visibile in fig. 6.37, mostra la solita grande costanza in tutti i punti dello ambiente, tipica delle sale molto riverberanti. In effetti il valore è piuttosto elevato, poiché rasenta i 4 s. Nonostante ciò, esso non deve essere considerato enorme, poiché altre chiese hanno mostrato situazioni ben peggiori, con tempi di riverberazione superiori ai 10 s [76].

Il tempo di ritardo della prima riflessione (ITDS) è riportato in fig. 6.38: si nota che i punti centrali delle prime due file presentano un valore molto grande, pari a circa 100 ms, a causa della totale mancanza di riflessioni da parte delle pareti laterali. Si vede infatti dalla pianta che la presenza dei due transetti impedisce ai punti in questione di ricevere le riflessioni laterali,

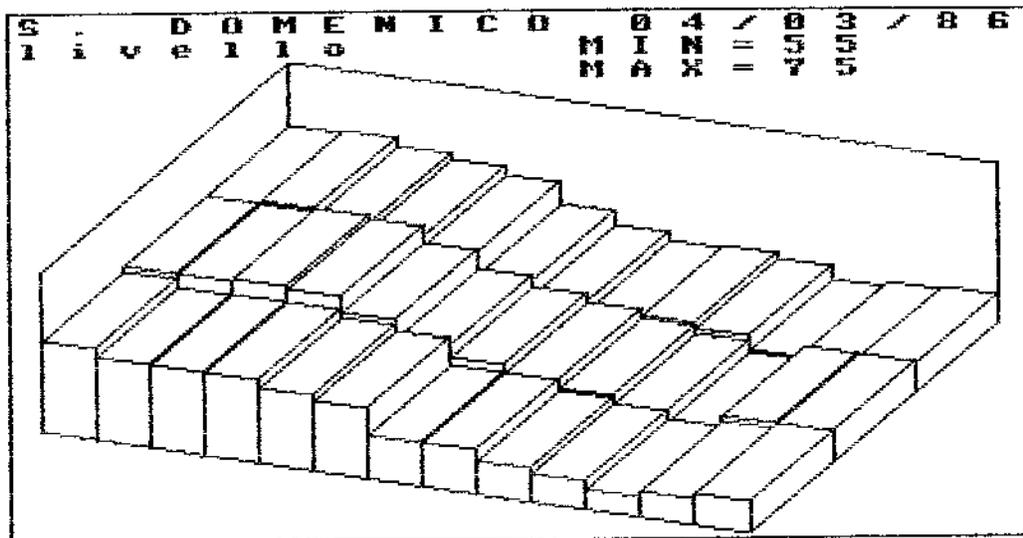


Fig. 6.36: Mappa del livello sonoro.

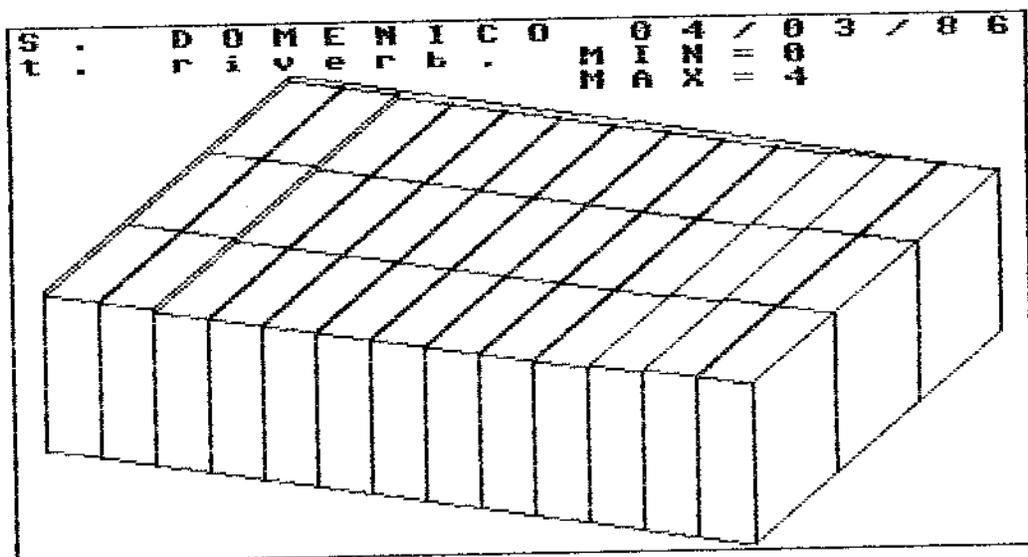


Fig. 6.37: Mappa del tempo di riverberazione.

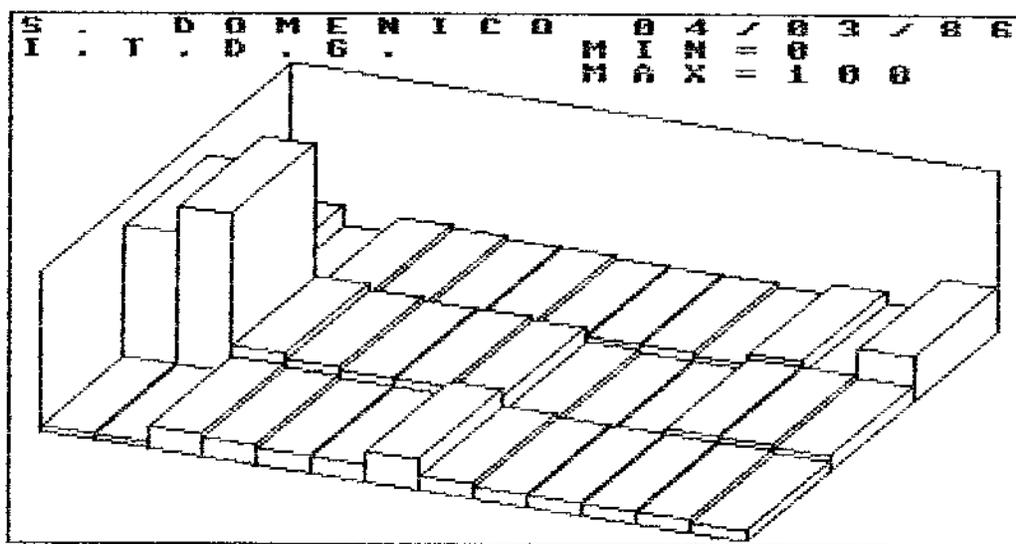


Fig. 6.38: Mappa del tempo di ritardo della prima riflessione.

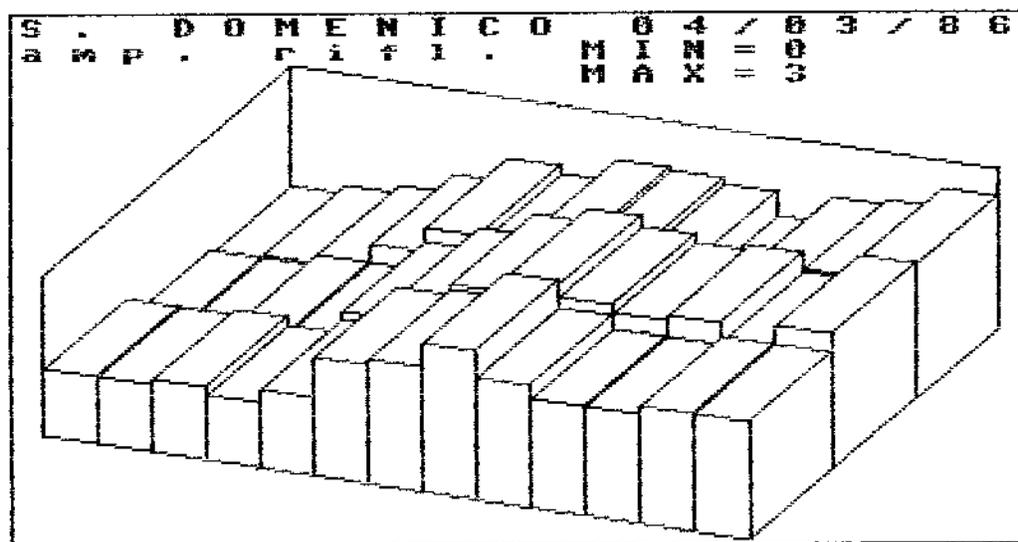


Fig. 6.39: Mappa della ampiezza equivalente delle riflessioni.

per cui la prima forte riflessione (ed anche l' unica) che giunge in questi punti proviene dall' abside. In tutti i restanti punti l' ITDG è piuttosto ridotto, non superando mai i 20 ms. Nell' ultimo punto della sala, a destra della fila di fondo, l' ITDG torna ad un valore più elevato, poiché la riflessione proveniente dalla parete di destra è stata intercettata dal ponteggio metallico situato in questa zona.

L' ampiezza equivalente delle riflessioni A, riportata in fig. 6.39, mostra un andamento praticamente inverso a quello del livello sonoro: esiste infatti una zona della sala più vicina alla sorgente ove il campo diretto è predominante, e l' ampiezza A è pertanto ridotta a valori inferiori all' unità. Essa cresce poi progressivamente nella zona centrale, e si livella attorno al valore 2.5 nella parte posteriore. La graduale variazione del valore dell' ampiezza segnala l' assenza di particolari fenomeni di diffrazione sulle pareti laterali.

Infine la IACC, la cui mappatura è visibile in fig. 6.40, mostra, come è lecito attendersi, un valore elevato nella zona vicina alla sorgente, ove in pratica il campo diretto è predominante. Il valore si riduce poi nella zona centrale, che si potrebbe definire "zona di transizione", ed assume i valori più bassi ai lati della parte posteriore. Il valore estremamente basso visibile nel

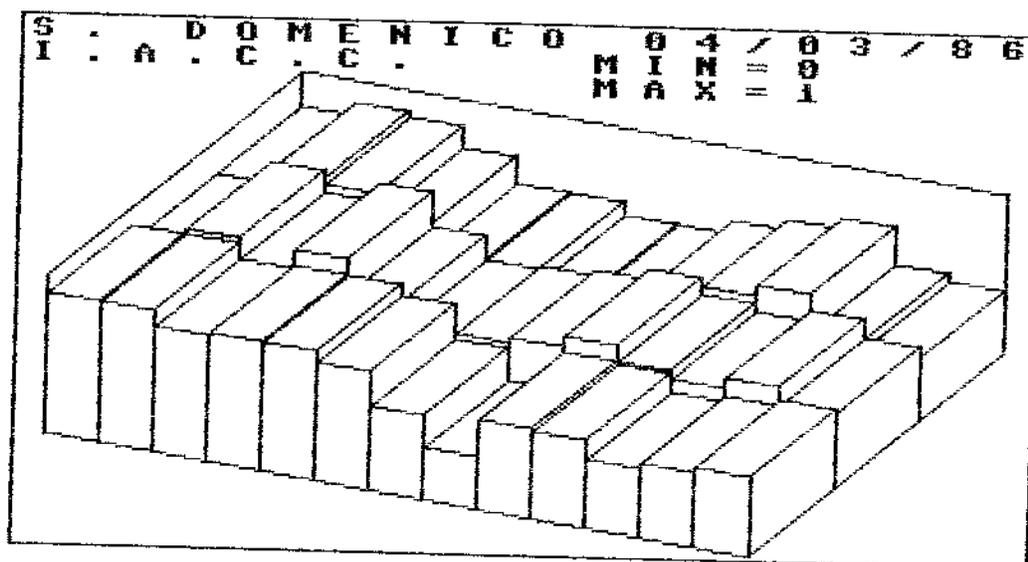


Fig. 6.40: Mappa della IACC.

punto a sinistra della ottava fila non è corretto, poiché osservando le risposte all' impulso misurate in questo punto si nota un disturbo presente durante la registrazione dell' orecchio sinistro, causato probabilmente da qualche occasionale rumore transitorio.

Anche se ovviamente nessuno eseguirebbe della musica in una sala nelle condizioni in cui sono state fatte le misure, è stata ugualmente effettuata la valutazione della qualità acustica con riferimento ai due brani musicali già individuati (Sinfonietta, $t_0=43$ ms e Royal Pavane, $t_0=127$ ms).

E' stato scelto un livello di potenza di 118 dB, cui corrisponde un livello di riferimento di 62 dB(A): è ovvio che in un ambiente così grande sia richiesta una potenza elevata. Ciononostante l' indice di preferenza del livello, riportato in fig. 6.41, assume valori prossimi allo zero soltanto nella zona centrale della sala, mentre è ridotto sia in prossimità della sorgente (livello troppo forte) che in prossimità del fondo della sala (livello debole). La scelta del valore di 62 dB per il livello di riferimento è tuttavia quella che rende massima la preferenza nel maggior numero di posti. Nella realtà probabilmente la potenza sonora non potrà essere così elevata, per cui le condizioni ottimali si verificheranno leggermente più in prossimità della sorgente di quanto qui ipotizzato.

L' unica soluzione corretta ai problemi della distribuzione del livello sonoro sarebbe l' utilizzo combinato di riflettori e di apparecchiature di amplificazione, tenuto anche conto che la presenza degli ascoltatori produrrebbe una ulteriore riduzione di livello nella parte posteriore, dovuta alla attenuazione della onda diretta per incidenza radente.

L' indice di valutazione della IACC è mostrato in fig. 6.42: esso cresce progressivamente verso il fondo della sala, compensando così almeno in parte il peggioramento

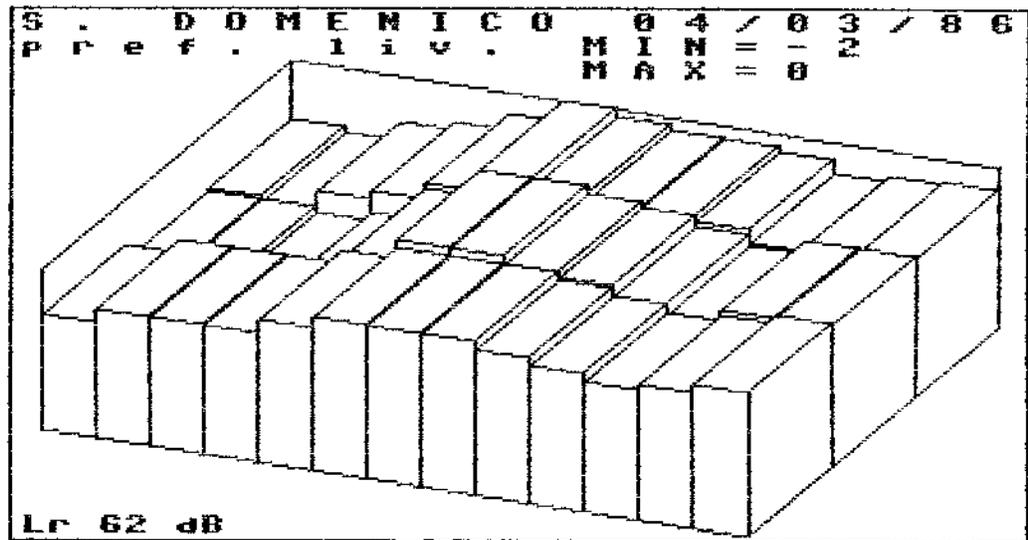


Fig. 6.41: Indice di preferenza del livello sonoro.

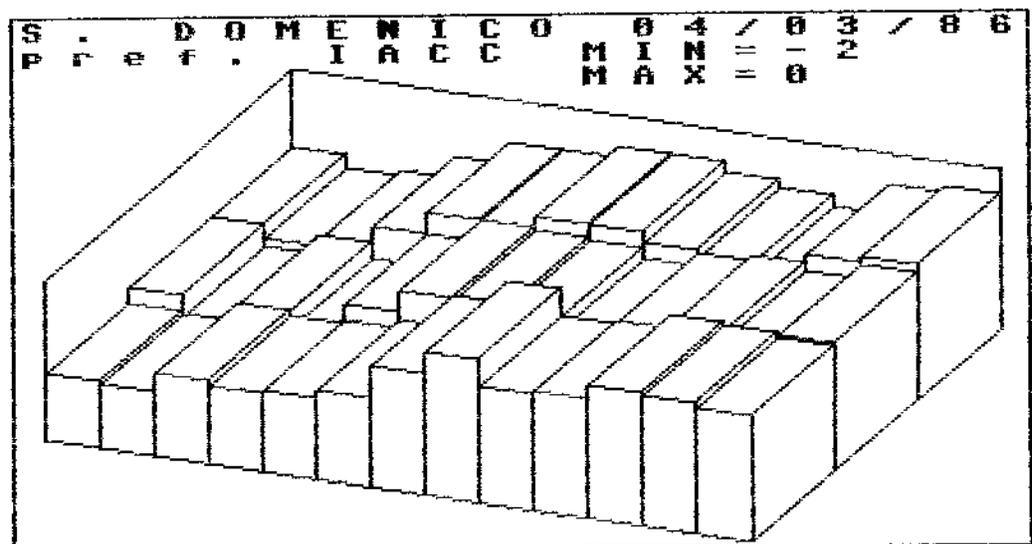


Fig. 6.42: Indice di preferenza della IACC.

della qualità acustica che qui si verifica a causa della eccessiva riduzione di intensità del suono diretto.

Facendo riferimento al primo brano musicale, con $t_0=43$ ms, si nota che il tempo di ritardo della prima riflessione è molto prossimo al valore ottimale in una buona parte dei punti di misura. Infatti in fig. 6.43 si osserva che l'indice di preferenza dell'ITDG è elevato quasi dappertutto, tranne che nei punti laterali delle prime due file, ove la riflessione più forte giunge dal pavimento.

Il tempo di riverberazione è invece decisamente eccessivo, come mostrato dalla fig. 6.44: l'indice di preferenza decresce progressivamente all'aumentare della ampiezza delle riflessioni A, verso il fondo della sala.

Con il secondo brano musicale si verifica, come già riscontrato nelle altre sale, che l'indice di preferenza dell'ITDG si riduce, mentre aumenta quello del tempo di riverberazione: infatti in fig. 6.45 si osserva una drastica riduzione del primo parametro, rispetto alla corrispondente fig. 6.45. Viceversa, in fig. 6.46 si osserva un sostanziale incremento dell'indice di preferenza del tempo di riverberazione, che rimane tuttavia pur sempre eccessivo: difatti l'indice di preferenza cala al crescere della ampiezza A, nella parte posteriore della sala.

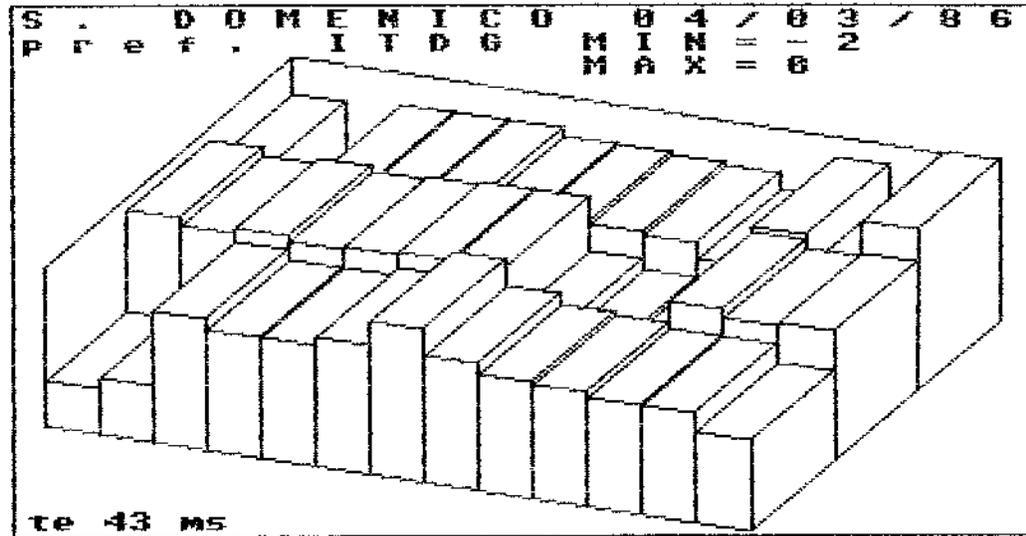


Fig. 6.43: Indice di preferenza del tempo di ritardo della prima riflessione - brano musicale 1.

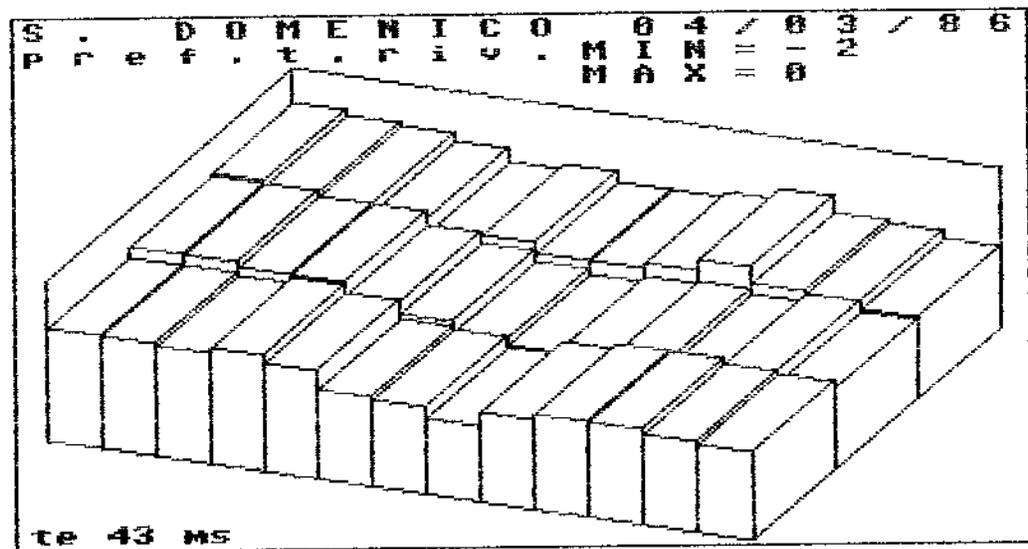


Fig. 6.44: Indice di preferenza del tempo di riverberazione - brano musicale 1.

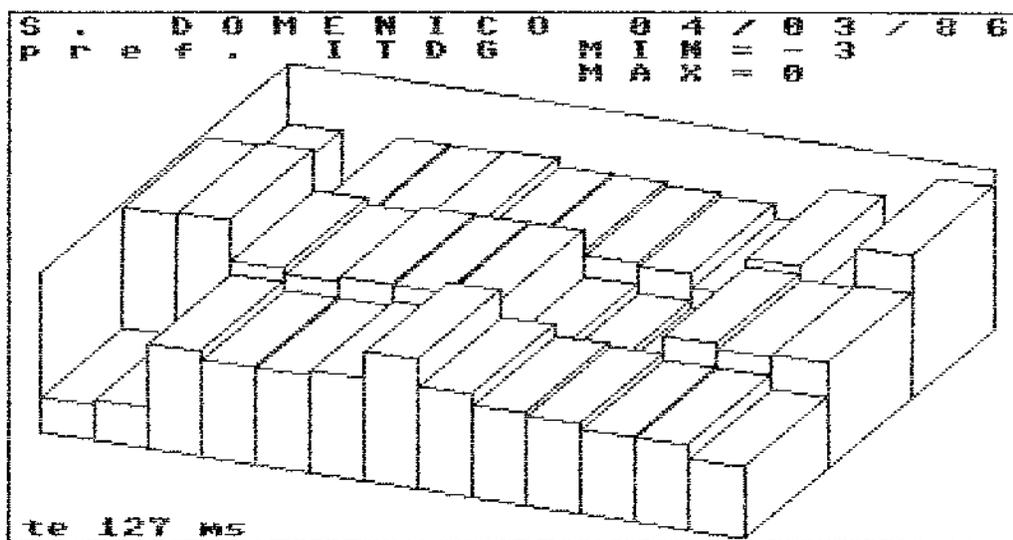


Fig. 6.45: Indice di preferenza del tempo di ritardo della prima riflessione - brano musicale 2.

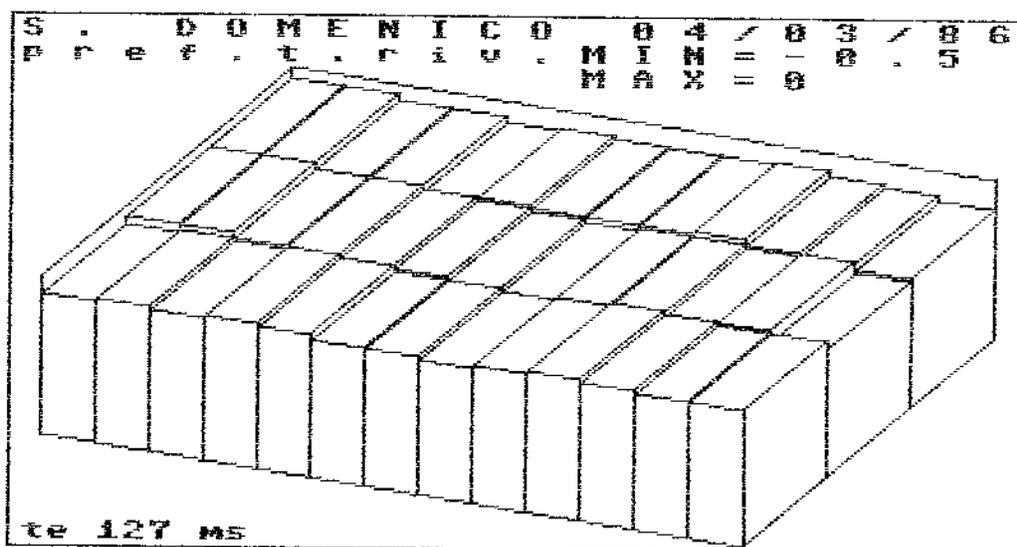


Fig. 6.46: Indice di preferenza del tempo di riverberazione - brano musicale 2.

Dalla sovrapposizione di tutti i fenomeni citati derivano indici di preferenza totale complessivamente piuttosto livellati: in fig. 6.47 si nota infatti che, in relazione al primo brano musicale, l'indice totale oscilla per quasi tutti i punti fra -2 e -3. Il valore non è certo elevato, come era ovvio attendersi, ma perlomeno si nota che i fenomeni negativi presenti non agiscono mai contemporaneamente nello stesso punto, compensandosi vicendevolmente.

Ciò non deve essere inteso come uniformità del campo acustico nell'ambiente: esso è infatti tutt'altro che uniforme. Infatti con il secondo brano musicale i diversi aspetti della valutazione di qualità assumono pesi diversi, come è mostrato in fig. 6.48. L'indice di preferenza totale è in questo caso più variabile, e risulta maggiore nella parte posteriore della sala, mentre nel caso precedente la zona migliore era situata nella parte centrale. È evidente che uno degli scopi dello intervento di correzione acustica del locale dovrà essere la garanzia di più uniformi condizioni di ascolto in relazione alle diverse posizioni degli ascoltatori ed alla diverse rappresentazioni che avranno luogo.

L'ipotesi definitiva di intervento verrà definita solo dopo che la ristrutturazione edilizia primaria avrà avuto luogo, in considerazione dei vincoli di carattere

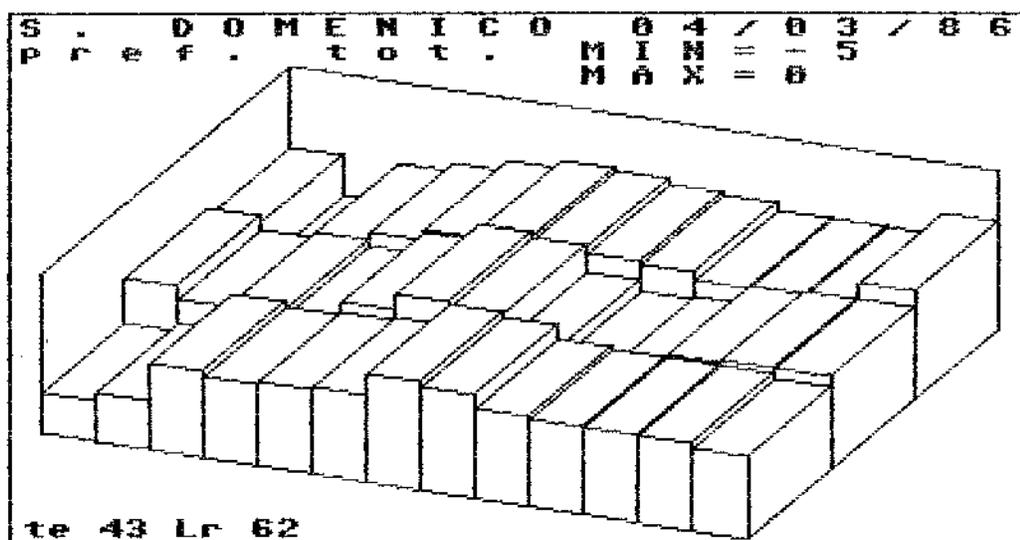


Fig. 6.47: Indice di preferenza totale - brano musicale 1.

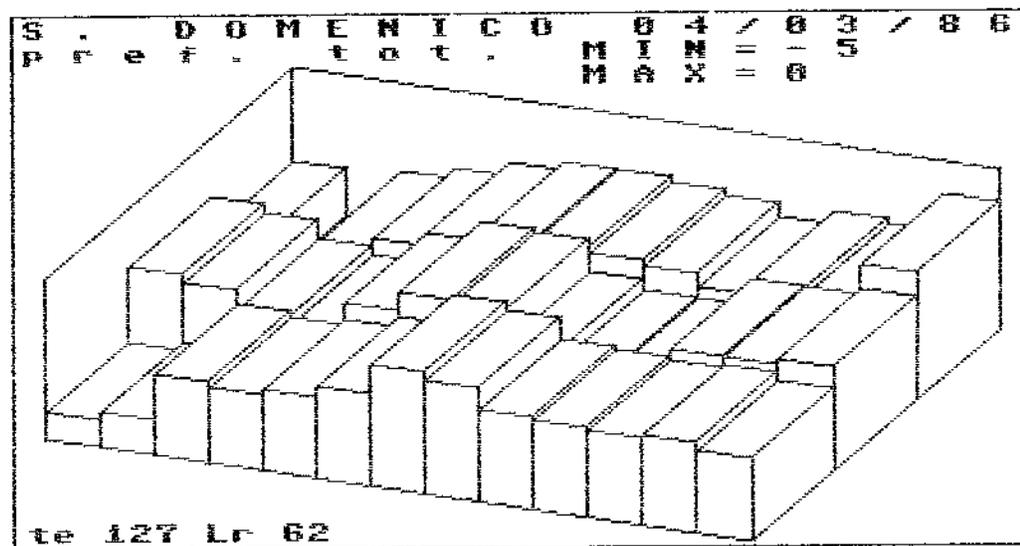


Fig. 6.48: Indice di preferenza totale - brano musicale 2.

architettonico e monumentale presenti. Tuttavia già ora è evidente che sarebbe auspicabile una riduzione della altezza dell' ambiente, conformando il soffitto in modo da garantire adeguato livello sonoro alla parte posteriore della sala. Sarebbe anche utile dotare la platea di una adeguata inclinazione. Una volta fissata la forma del soffitto e l' inclinazione della platea, andrà stabilita quale parte del primo rendere riflettente e quale assorbente, in modo da evitare riflessioni sulla parete di fondo e creare invece riflessioni del secondo ordine soffitto-pareti laterali.

Essendo l' ambiente relativamente stretto, sono già presenti forti riflessioni laterali, per cui non è necessario intervenire per rafforzarle.

La platea andrà opportunamente attrezzata con poltrone imbottite, onde ridurre il tempo di riverberazione anche quando la sala non è occupata completamente. Peraltro la riduzione di volume conseguente all' abbassamento del soffitto e l' assorbimento degli ascoltatori dovrebbero essere in grado di abbassare considerevolmente il tempo di riverberazione rispetto al valore attualmente misurato.

Per le sue caratteristiche geometriche, la chiesa di S. Domenico diventerà probabilmente una ottima sala per concerti di musica classica, utilizzabile proficuamente anche per altri generi musicali basati su orchestre di

discrete proporzioni. Sarà viceversa più difficile riuscire a rendere la sala adatta a prosa o conferenze, per le quali sarà necessario ricorrere ad amplificazione artificiale.

6.4 Teatro "Astra" di Forlì

Il teatro Astra di Forlì è un edificio relativamente recente, di proprietà del Comune della città romagnola, che viene intensamente utilizzato per spettacoli di prosa, varietà e concerti. Di esso è stata richiesta la valutazione della qualità acustica, ed il suggerimento di eventuali migliorie da apportare.

I disegni della sala sono visibili nelle fig. 6.49 e 6.50, riportanti rispettivamente piante e sezione: si nota l'elevata capienza della sala, incrementata notevolmente dalla presenza della loggia che copre la parte posteriore della platea. Pertanto la zona posteriore della platea è completamente priva di riflessioni provenienti dal soffitto della sala. Esse sono scarse anche nella parte anteriore, a causa del profilo sfuggente del soffitto in prossimità del boccascena. Per di più il materiale di rivestimento è costituito da un conglomerato di fibre di legno e cemento, ondulato con orditura trasversale delle ondulations: esso è dunque piuttosto assorbente e diffondente. La loggia è piuttosto inclinata, per cui il suo margine anteriore finisce ad un'altezza ridotta sulla platea, che è solo leggermente inclinata.

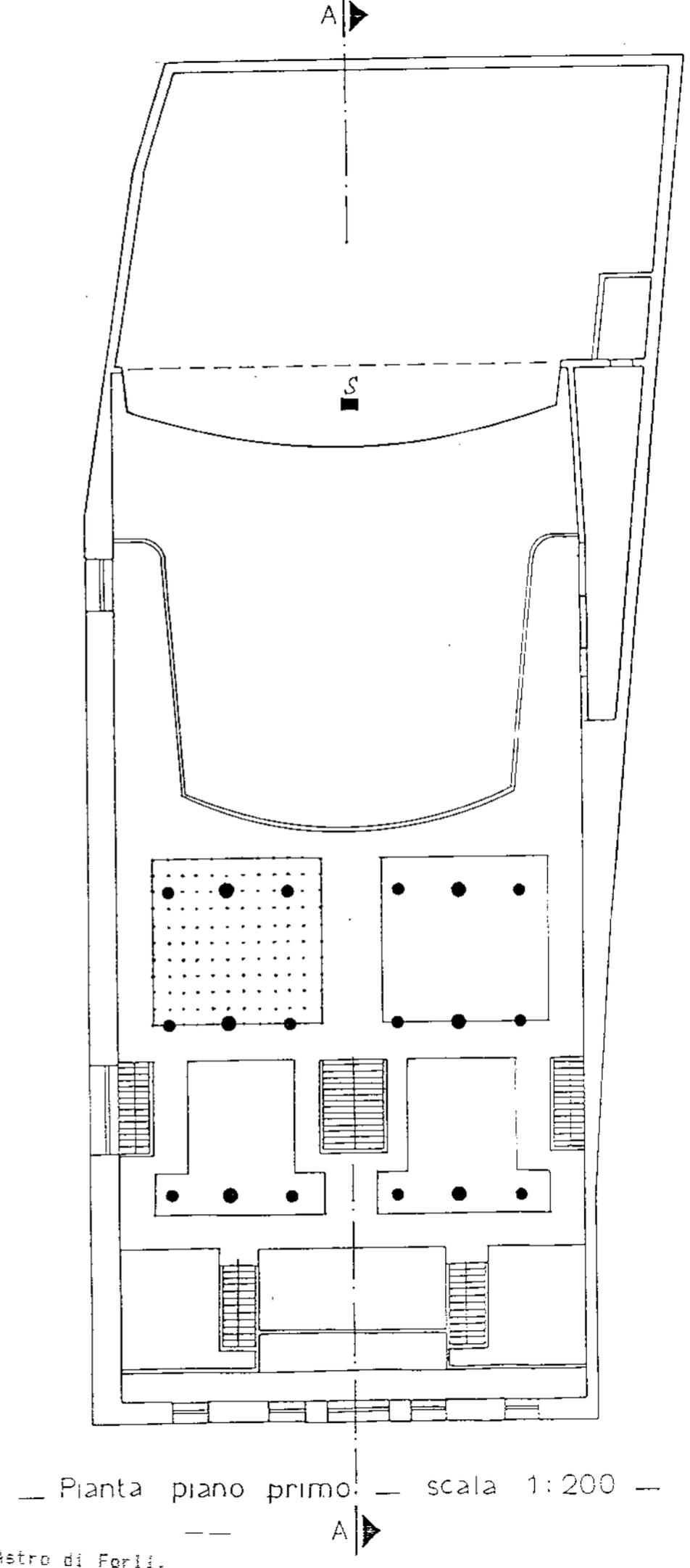
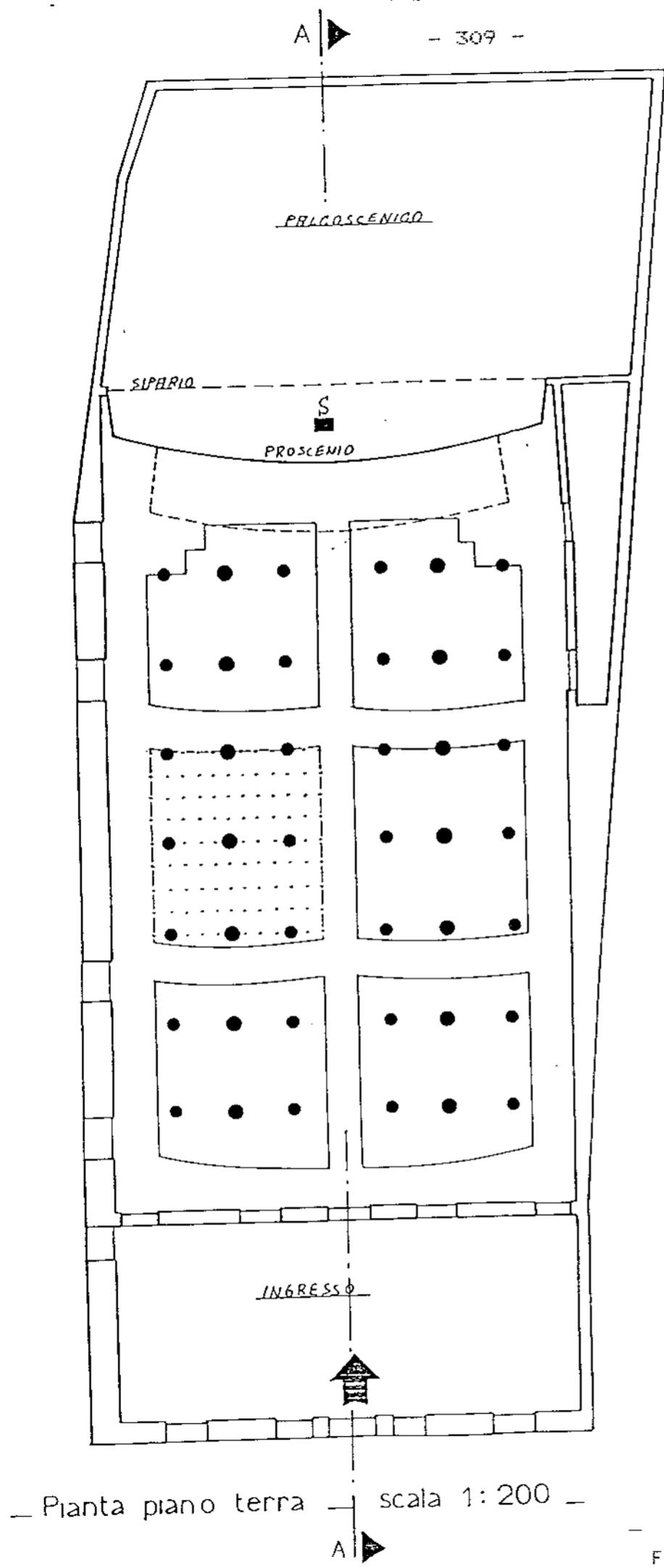
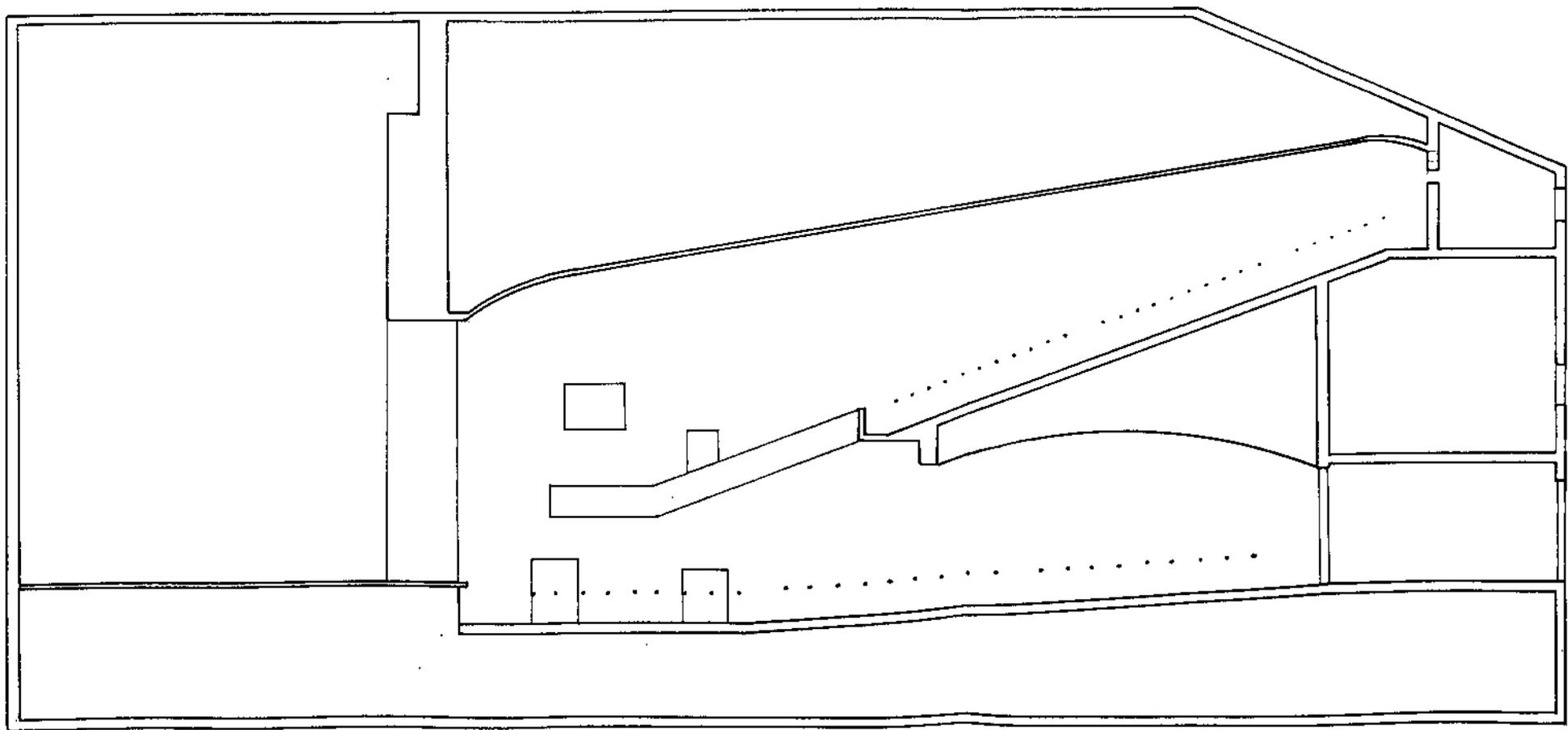


Fig. 6.49: Pianta del Teatro Astro di Ferli.



— Sezione A-A — scala 1:200 —

Vanno tenuti presenti altri importanti particolari della sala in esame: le poltrone sono federate con velluto, e sono molto imbottite; le pareti laterali sono rivestite con pannelli dello stesso materiale del soffitto, ma non ondulati; il primo pannello, in prossimità del pavimento, è invece di cemento liscio (alto circa 1m). Il boccascena è rialzato di circa 2 metri dal piano della platea, ed è presente un pesante sipario in velluto a scorrimento orizzontale. Dietro di esso è installato il sipario tagliafuoco metallico, a movimento verticale, che è stato mantenuto alzato nel corso delle prove. Le porte di uscita sono imbottite internamente con finta pelle, ma le chiusure sono tali da non garantire un buon isolamento.

Dietro il boccascena si trova un palcoscenico di grandi dimensioni, soprattutto molto alto: affinché questo volume, che era interamente vuoto il giorno delle prove, non interagisse negativamente con l'acustica della sala, le misure sono state eseguite con il sipario in velluto chiuso.

Le dimensioni elevate della sala hanno consigliato di adottare sei punti di misura per fila, e di campionare sette file nella platea e tre sulla balconata. Per la presentazione grafica dei risultati, queste ultime tre file sono state collocate subito dietro l'ultima fila di

poltrone della platea: appaiono dunque 10 file di punti di misura, ma le ultime tre debbono essere pensate sostanzialmente sovrastanti alle tre file precedenti.

Le dimensioni ed il forte assorbimento della sala hanno messo a dura prova la potenza della sorgente sonora, che è stata fatta lavorare al limite del sovraccarico per garantire un sufficiente rapporto segnale/disturbo.

In fig. 6.51 è visibile la mappa del livello sonoro: esso è ovviamente più elevato in prossimità della sorgente sonora, decresce poi abbastanza progressivamente e si livella ad un valore abbastanza ridotto nella zona della platea coperta dalla gradinata. Sulla loggia sovrastante, il livello è più alto solo di poco, segno che comunque il soffitto non è in grado di rinviare sugli ascoltatori energia utile.

In fig. 6.52 si può invece vedere la mappa del tempo di riverberazione: contrariamente a tutti i casi precedentemente incontrati, esso è qui piuttosto variabile da punto a punto, oscillando fra 0.7 e 1 s. La variabilità è sicuramente connessa con il valore molto basso del parametro stesso: infatti l'ambiente presenta superfici fortemente assorbenti, con distribuzione non uniforme delle stesse. In questo caso non valgono dunque le usuali ipotesi di uniforme distribuzione statistica del decadimento sonoro, ed il tempo di riverberazione varia da

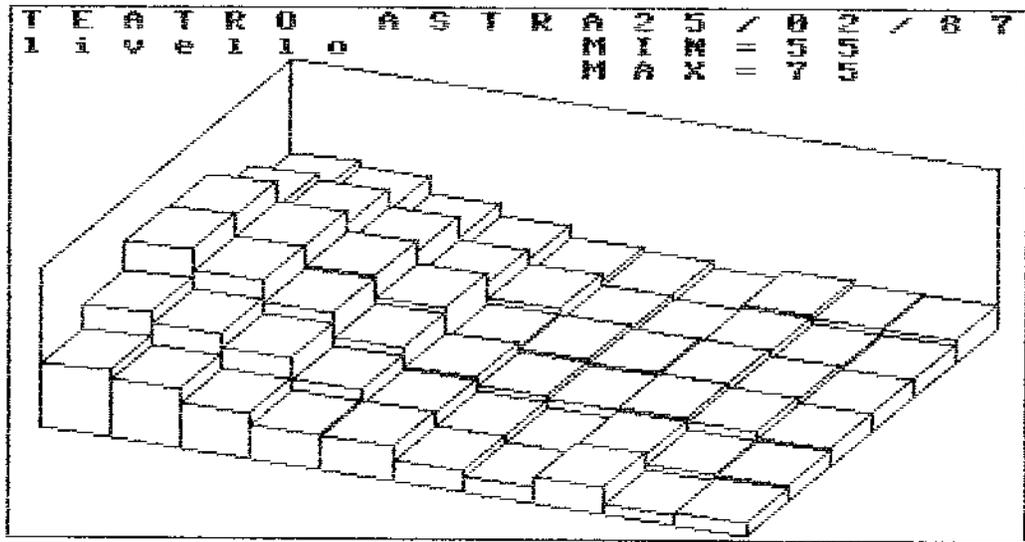


Fig. 6.51: Mappa del livello sonoro.

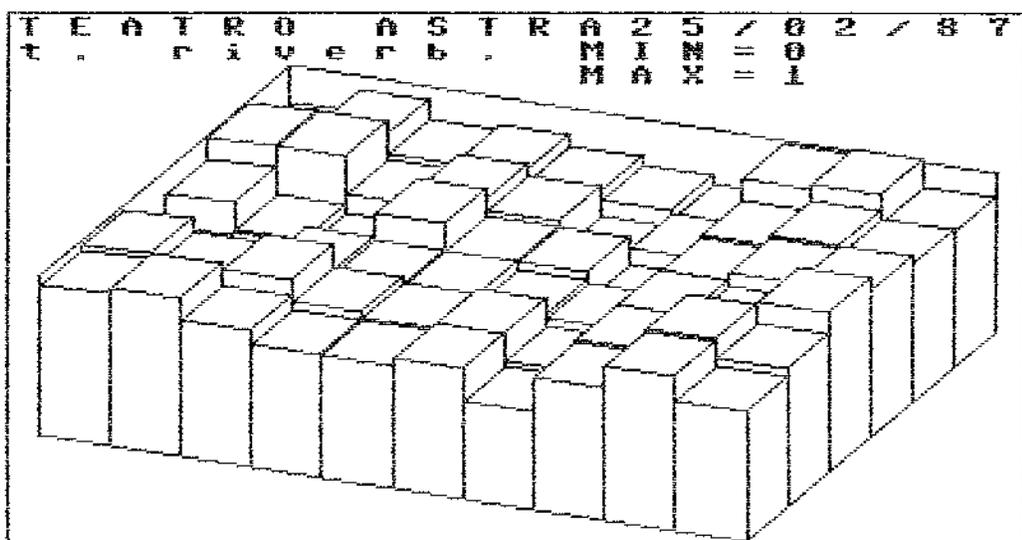


Fig. 6.52: Mappa del tempo di riverberazione.

punto a punto. Ciò deriva forse anche dal fatto che il parametro misurato è un T_{15} , cioè si prendono in considerazione solo i primi 15 dB del decadimento, che sono appunto la parte più influenzata dalla posizione del punto di misura.

L'analisi della distribuzione in frequenza del decadimento sonoro ha fornito questi tempi di riverberazione misurati in ottave:

freq. Hz	250	500	1000	2000	4000	lin.
t.riv. s	1.03	1.00	0.81	0.60	0.62	0.75

Si nota una costante diminuzione al crescere della frequenza, segno che i materiali di rivestimento e l'aria hanno un assorbimento crescente con la frequenza, come è usuale. I tempi di riverberazione sono anche stati misurati, per confronto, tramite l'analizzatore in tempo reale di fig. 2.8, utilizzando sia l'usuale decadimento di un rumore stazionario, sia un rumore impulsivo con susseguente ricostruzione del decadimento sonoro tramite l'integrazione all'indietro di Schroeder [50]: i risultati sono sostanzialmente gli stessi su riportati.

E' evidente che valori così bassi del tempo di riverberazione sono adatti soprattutto alla prosa, mentre in campo musicale la sala è decisamente troppo "sorda". Tuttavia sono presenti riflessioni laterali piuttosto forti, che possono almeno in parte compensare questo

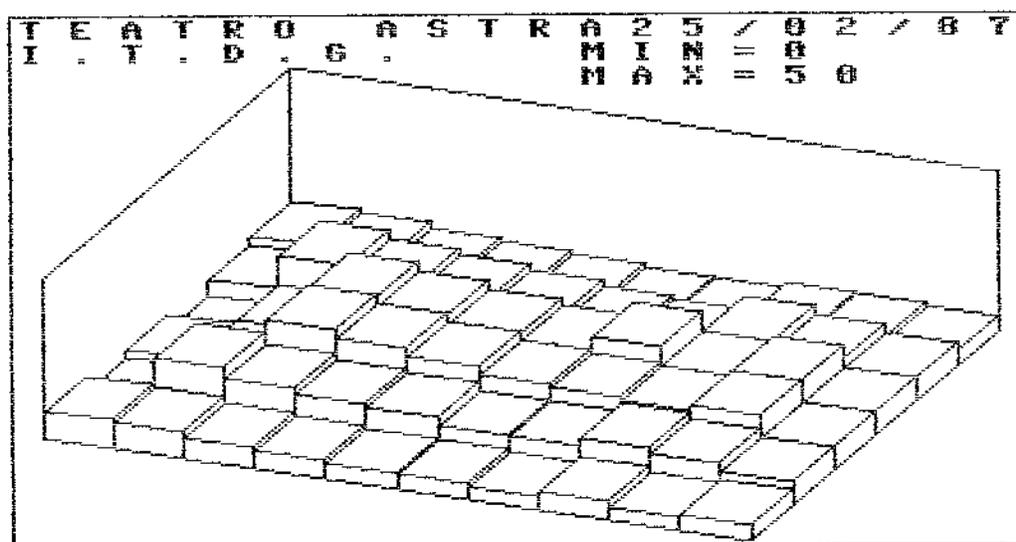


Fig. 6.53: Mappa del tempo di ritardo della prima riflessione.

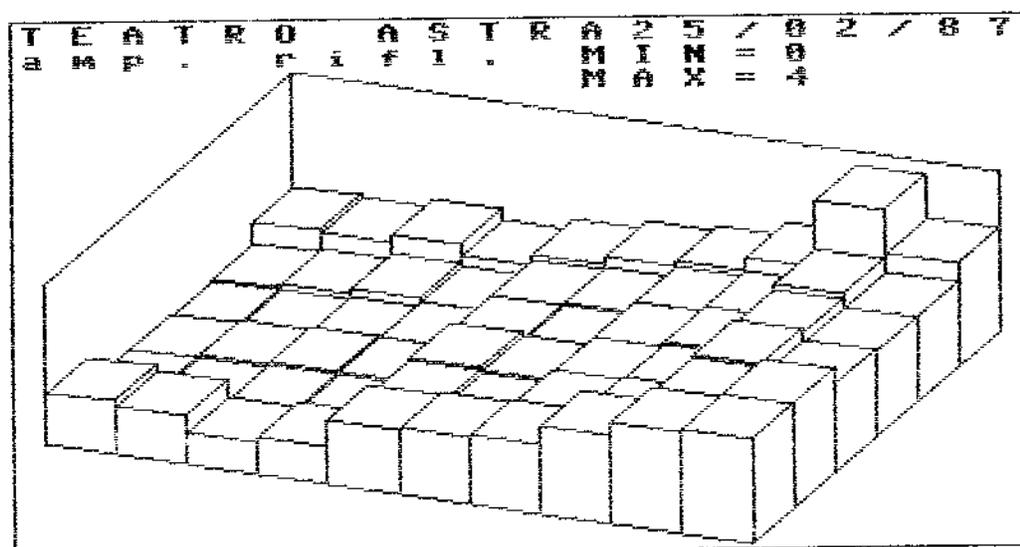


Fig. 6.54: Mappa della ampiezza equivalente delle riflessioni.

problema. Visto l' utilizzo polivalente della sala non è certo auspicabile un aumento generalizzato del tempo di riverberazione.

In fig. 6.53 è riportato il grafico del tempo di ritardo della prima riflessione (ITDG); esso raggiunge i massimi valori (circa 20 ms) nella zona centrale della sala, mentre è più ridotto in prossimità delle pareti laterali. L' ampiezza delle riflessioni A è visibile in fig. 6.54, e si nota che essa cresce ai lati, ma soprattutto nella parte posteriore della sala e raggiunge i valori massimi sulla balconata, ove evidentemente giunge qualche contributo di energia anche dal soffitto.

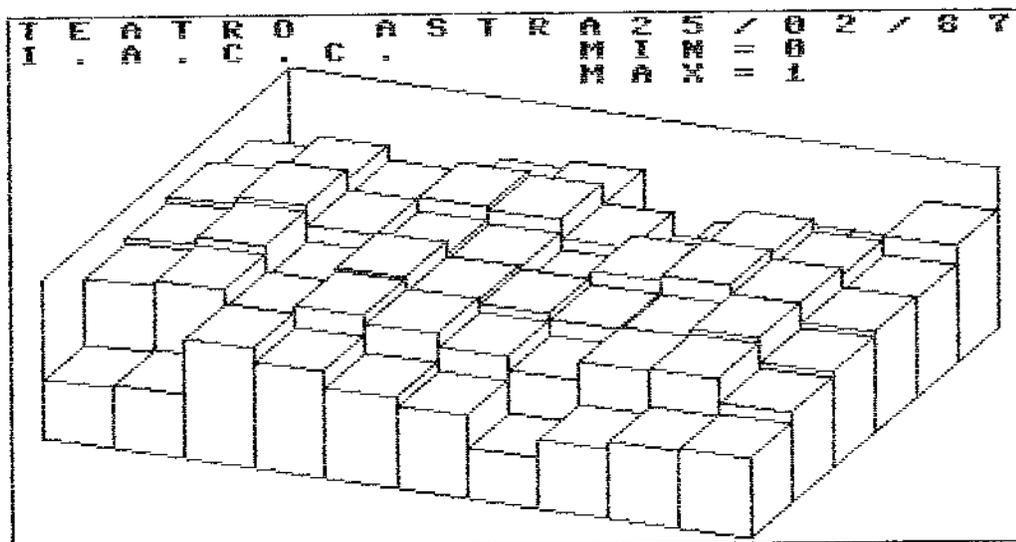


Fig. 6.55: Mappa della IACC.

La fig. 6.55 illustra la mappa della Correlazione Mutua Inter-Aurale (IACC), che è sempre abbastanza elevata in prossimità dell'asse longitudinale della sala, mentre si riduce in vicinanza delle pareti laterali e nella parte posteriore di platea e galleria. Considerando la forma rettangolare della pianta e lo scarso contributo fornito dal soffitto era lecito attendersi valori più bassi della IACC: evidentemente la simmetria del locale e la mancanza di asperità sulle pareti laterali rendono le prime riflessioni meno diffuse del previsto. Va anche detto che in gran parte della platea il campo diretto è predominante, come è mostrato dal valore relativamente ridotto della ampiezza \bar{A} , e ciò deriva dal forte potere fonoassorbente di tutte le superfici.

Per il calcolo degli indici di preferenza si è fatto riferimento ai soliti due brani musicali, con t_0 di 43 e 127 ms. Il livello di riferimento è stato fissato a 60 dB(A), cui corrisponde un livello di potenza di 120 dB: ad un valore così elevato corrisponde evidentemente un livello troppo forte nella zona anteriore della sala, mentre si raggiunge il valore ottimale nella parte centrale e posteriore. La scelta del livello di riferimento è stata fatta in coerenza con le altre sale studiate, per rendere massimo l'indice di preferenza nel maggior numero di posti: in questo caso essa è però

sicuramente divergente dalla realtà, nella quale il livello sonoro è corretto nella zona anteriore mentre è troppo ridotto sotto la balconata. Comunque in fig. 6.56 è riportata la mappa dell'indice di preferenza del livello d'ascolto, che si riduce solo nella ristretta zona in prossimità del proscenio.

In fig. 6.57 è visibile l'indice di preferenza della IACC, che è ovviamente maggiore ai lati e nella zona posteriore della platea e della loggia; al centro delle file esso è abbastanza ridotto, e costituisce la maggior penalizzazione sull'indice di preferenza complessivo. E' dunque evidente che conviene intervenire su questo parametro per migliorare la qualità acustica dello ambiente.

Per quanto riguarda il primo brano musicale, con $t_0=43$ ms, il tempo di ritardo della prima riflessione appare solo leggermente troppo breve, e si hanno i valori massimi dell'indice di preferenza nella zona centrale delle file, come è mostrato dalla fig. 6.58: l'indice di preferenza si riduce poi notevolmente in prossimità della sorgente sonora, poiché qui la prima riflessione proviene dal pavimento.

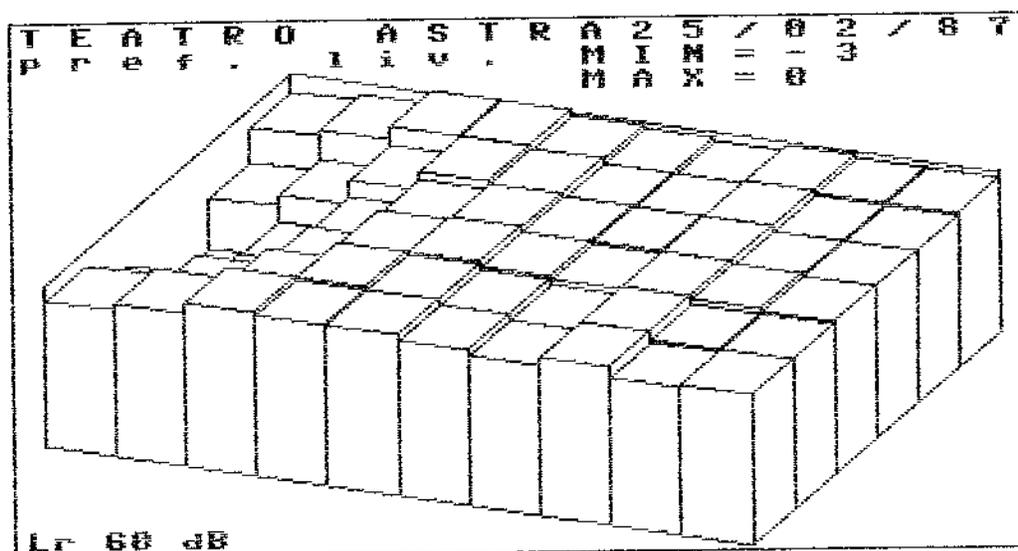


Fig. 6.56: Indice di preferenza del livello sonoro.

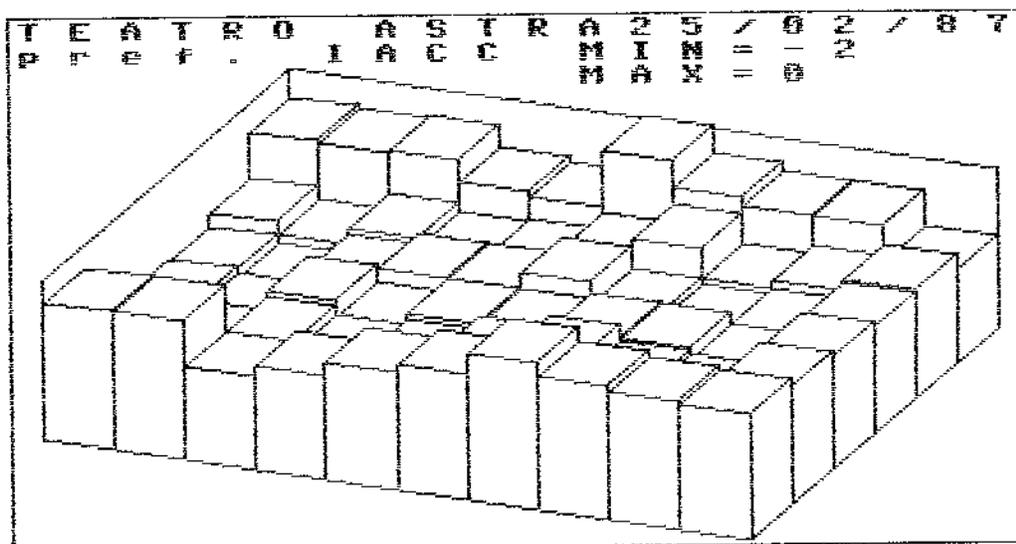


Fig. 6.57: Indice di preferenza della IACC.

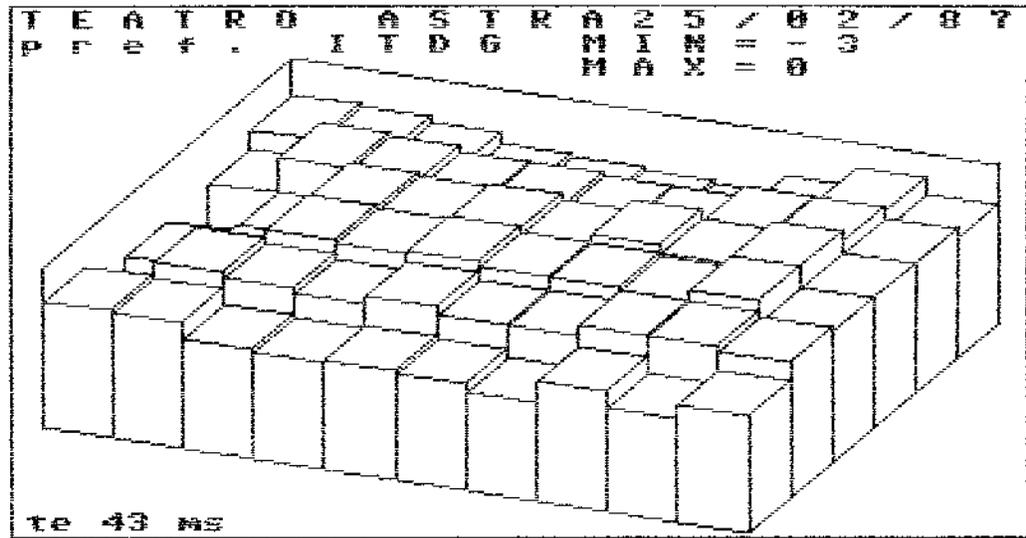


Fig. 6.58: Indice di preferenza del tempo di ritardo della prima riflessione - brano musicale 1.

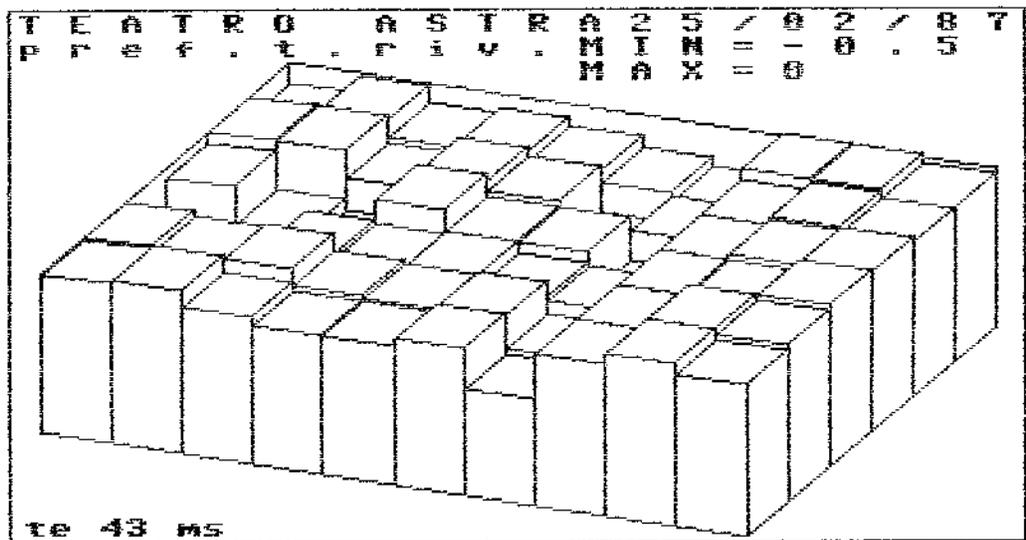


Fig. 6.59: Indice di preferenza del tempo di riverberazione - brano musicale 1.

Il tempo di riverberazione appare sostanzialmente adeguato all' esecuzione del primo brano musicale, e lo indice di preferenza corrispondente è pertanto sempre prossimo allo zero, come si può vedere dalla fig. 6.59.

In riferimento al secondo brano musicale, la sala appare viceversa molto meno adatta: in fig. 6.60 si nota che l' indice di preferenza dell' ITDG si è considerevolmente ridotto, conservando lo stesso andamento del caso precedente ma con una costante penalizzazione di circa una unità. Lo stesso accade per l' indice di preferenza del tempo di riverberazione, che è ora oscillante fra -0.5 e -1 , come si può vedere dalla fig. 6.61.

Nelle fig. 6.62 e 6.63 sono riportati i grafici degli indici di preferenza totale: il primo mostra un valore complessivo piuttosto buono nella quasi totalità dei posti della sala, visto che gli effetti di ITDG e di IACC tendono a compensarsi reciprocamente; nella zona vicina alla sorgente sonora si sommano viceversa tutti gli effetti negativi, e l' indice di preferenza scende notevolmente.

Nell' ultima figura si nota che sostanzialmente la distribuzione dell' indice di preferenza è la stessa, ma il diverso brano musicale richiederebbe tempo di riverberazione ed ITDG più lunghi, per cui si ha un

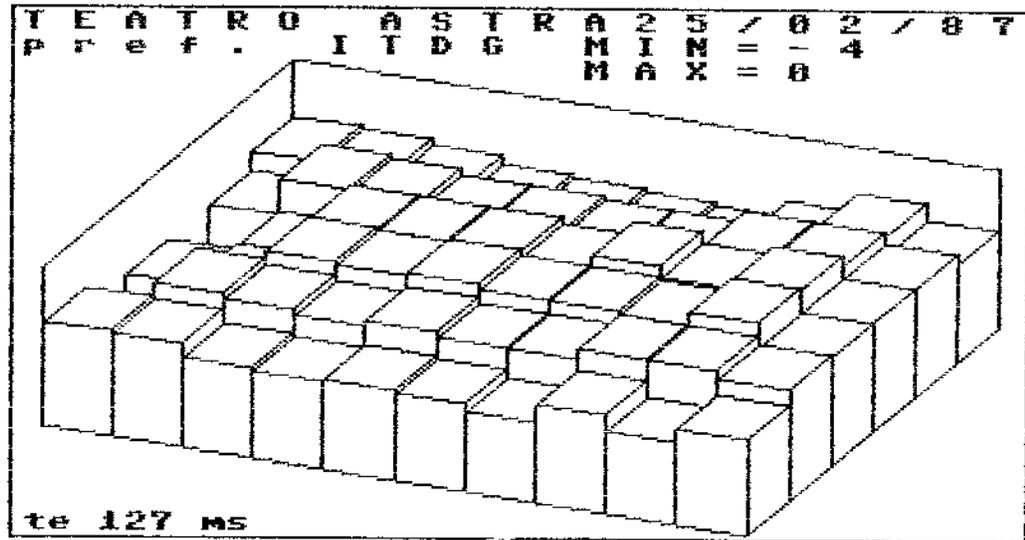


Fig. 6.60: Indice di preferenza del tempo di ritardo della prima riflessione - brano musicale 2.

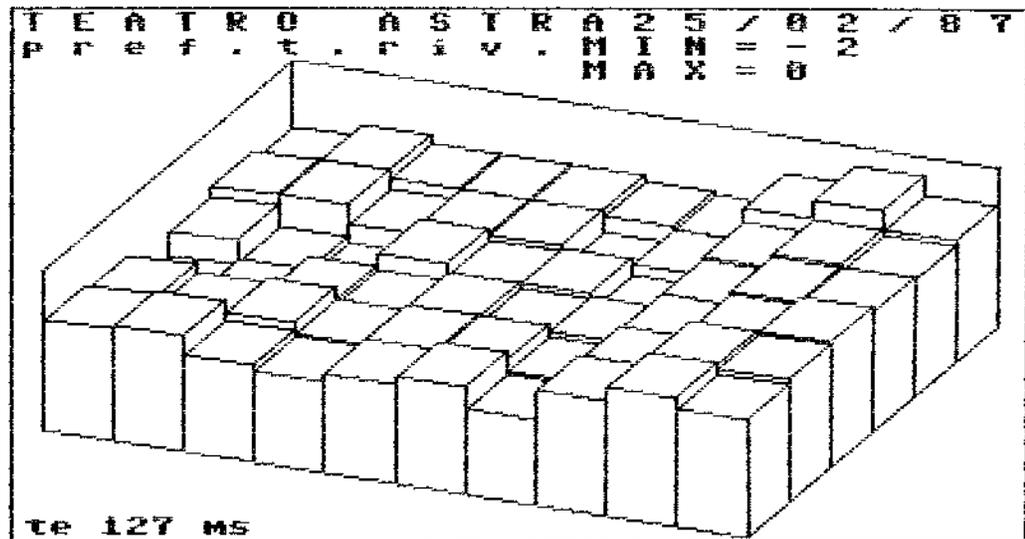


Fig. 6.61: Indice di preferenza del tempo di riverberazione - brano musicale 2.

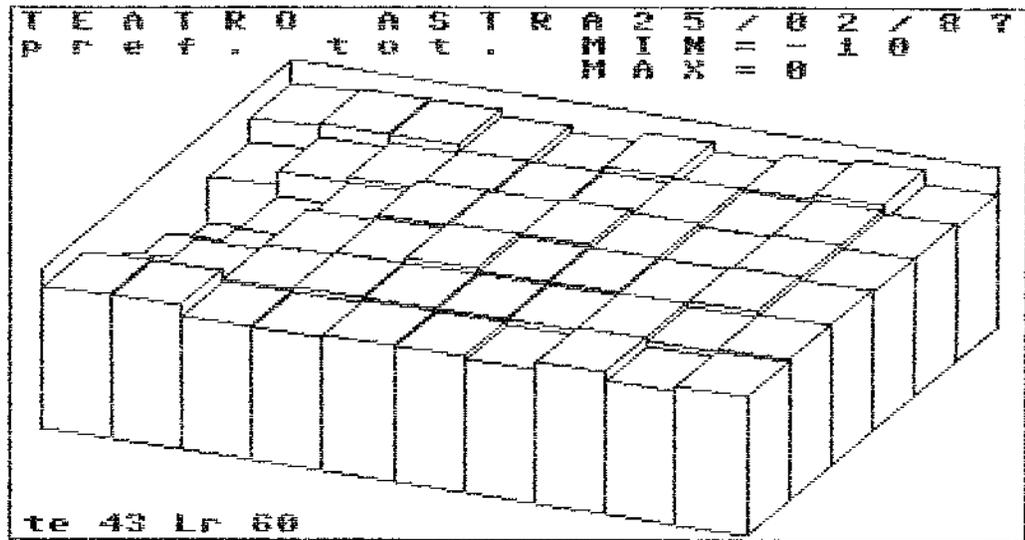


Fig. 6.62: Indice di preferenza totale - brano musicale 1.

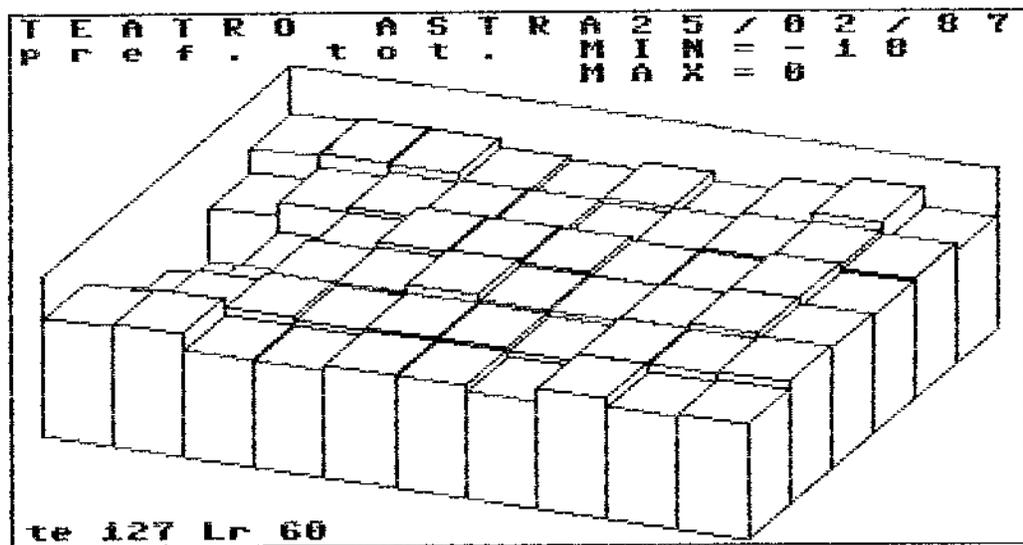


Fig. 6.63: Indice di preferenza totale - brano musicale 2.

generalizzato peggioramento dell' indice stesso. E' evidente che la sala è piú adatta a musica moderna che a musica classica, e raggiunge le condizioni ottimali per la prosa.

E' possibile migliorare le condizioni di ascolto, senza stravolgere le caratteristiche e la vocazione del teatro, aumentando la diffusione delle pareti laterali: i primi due pannelli dal basso andrebbero sostituiti con materiali a basso potere assorbente, ma dotati di buona diffusione del campo sonoro, ottenuta con una opportuna movimentazione della superficie. In questo modo diminuirebbe la IACC praticamente ovunque, e si migliorerebbe l' uniformità del campo sonoro.

Un' altra possibilità, utile piú per la prosa che per la musica, è costituita dall' installazione di un riflettore subito sopra il boccascena: lo studio geometrico mostra però che è estremamente difficile fare in modo che esso invii energia sotto la balconata, in modo da rafforzare il campo diretto, poiché essa è veramente molto bassa.

Nel caso di esecuzioni musicali, specie se per pochi strumenti, sul palcoscenico va installata una opportuna chiusura a paravento, le cui pareti laterali e soffitto vanno studiati in modo da inviare energia sonora verso il fondo della sala, non trascurando un adeguato ritorno di

riflessioni per gli stessi musicisti, che ne hanno bisogno onde potersi sentire reciprocamente ed amalgamare la produzione musicale. Utilizzando per questa "camera di orchestra" materiali piuttosto riflettenti, si dovrebbe far aumentare leggermente anche il tempo di riverberazione, come sarebbe auspicabile per alcuni generi musicali.

Non pare che interventi sul soffitto siano in grado di migliorare la situazione, poiché le riflessioni provenienti dall'alto non sono in grado di infiltrarsi sotto la balconata, e per di più tendono ad aumentare la IACC.

Il tempo di riverberazione cresce anche, ovviamente, a sipario aperto, poiché il volume complessivo aumenta. Nel corso delle rappresentazioni, tuttavia, sul palcoscenico sono presenti quinte, sfondi ed arredi, per cui globalmente la situazione non è destinata a variare di molto. Tutto sommato non è il tempo di riverberazione basso a creare i maggiori problemi, anche in considerazione dell'uso prevalente della sala.

7° CAPITOLO

CONCLUSIONI

7.1 Discussione dei risultati

Nel capitolo precedente sono stati illustrati i risultati ottenuti applicando la procedura di valutazione della qualità acustica allo studio di quattro sale. I parametri misurati sono gli stessi che vengono solitamente presi in considerazione anche per la valutazione della attitudine di una sala all' ascolto del parlato, ma ovviamente dagli stessi dati oggettivi discendono valutazioni diverse, in relazione al diverso uso della sala.

In tutti quattro i casi si è fatto riferimento a due brani musicali dalle caratteristiche completamente diverse: il primo (Sinfonietta di Arnold) è un Allegro con bassa durata convenzionale della funzione di autocorrelazione ($t_e=43$ ms). Viceversa il secondo (Royal Pavane di Gibbons) è un brano lento ($t_e=127$ ms), per cui i due brani costituiscono i casi estremi della produzione sinfonica.

L' influenza della frase musicale si esercita soprattutto sul valore ottimale del tempo di riverberazione e del tempo di ritardo della prima riflessione (ITDG): mentre però il primo ha un peso complessivamente non troppo elevato sulla valutazione

globale di qualità, il secondo esercita invece notevole importanza sui risultati.

Due delle quattro sale studiate sono di piccole dimensioni, per cui in ogni caso in esse l' ITDG ha valori minori di quelli ottimali: in entrambe queste sale il tempo di riverberazione non è molto breve; complessivamente il riferimento al primo brano musicale comporta un indice di preferenza maggiore rispetto al secondo. Infatti la diminuzione di preferenza prodotta nel secondo caso dall' incremento dell' ITDG ottimale è compensata solo in piccola parte dall' aumento dello indice di preferenza, dovuto al fatto che il valore ottimale del tempo di riverberazione è più prossimo al valore reale.

Per quanto si riferisce al tempo di riverberazione, nelle restanti due sale si hanno situazioni sostanzialmente opposte: infatti nella chiesa di S. Domenico il tempo di riverberazione è molto alto, ed in questo caso l' indice di preferenza complessivo è circa lo stesso con entrambi i brani musicali. Viceversa nel teatro Astra il tempo di riverberazione è molto basso, per cui si ha un buon valore dell' indice di preferenza solo con il primo brano musicale, mentre con il secondo si registrano valori notevolmente più bassi. In entrambi i casi l' ITDG tende a penalizzare il secondo brano.

In tutte le sale si è supposto di utilizzare una sorgente sonora di adeguata potenza, capace di rendere massimo l'indice di preferenza del livello nel maggior numero dei punti di misura nella sala. I risultati sarebbero stati sostanzialmente diversi se fosse stata utilizzata sempre la stessa potenza sonora in tutte le sale, ma in effetti quella seguita è l'unica strada che consente di paragonare le diverse sale senza introdurre un ulteriore elemento di discriminazione, costituito dalla entità della potenza della sorgente sonora da utilizzare in sede di rappresentazione.

Praticamente in tutte le sale si verifica il fenomeno della crescita del livello sonoro in prossimità della sorgente: ciò è dovuto alla insufficiente distanza fra la prima fila di sedili e la sorgente stessa. Mentre però questo fenomeno è molto evidente nell'Aula 2.1 e nel teatro Astra, nelle due altre sale la variazione di livello sonoro è più progressiva, e soprattutto non si verifica una eccessiva differenza fra il valore massimo e quello minimo del livello.

E' stata individuata la possibilità di migliorare la acustica di ogni sala con interventi specifici, localizzando l'attenzione su quegli aspetti fisici che sono risultati più penalizzanti sulla valutazione complessiva di qualità. Bisogna anche tenere conto che

nessuna delle quattro sale studiate è concepita come pura sala da concerto, ma è previsto per esse un minore o maggiore utilizzo per spettacoli di altro tipo o per conferenze. E' pertanto necessario mediare le esigenze di una buona acustica musicale, che in base all' analisi svolta richiederebbero ben definiti parametri fisici, con quelle di una estesa gamma di diversi utilizzi dello ambiente.

Nella fig. 7.1 sono riportati i valori medi dello indice di preferenza totale ottenuti nelle quattro sale studiate, in relazione ai due diversi brani musicali: da essi può anche essere stilata una "graduatoria" fra le sale. E' evidente che solo dopo che saranno stati acquisiti dati da un ben maggiore numero di teatri sarà possibile realizzare una corretta classificazione degli stessi, tenendo conto non solo del valore medio dello indice di preferenza, ma anche della distribuzione spaziale e della uniformità dello stesso.

sala	Aula 2.1	Marialuigia	S.Domenico	T. Astra
$t_{e=43}$	-2.24	-1.837	-2.415	-1.84
$t_{e=127}$	-2.64	-2.643	-2.359	-3.30

Fig. 7.1: Tabella dei valori medi dell' indice di preferenza totale.

Per fornire una valutazione comparativa delle quattro sale studiate, sono state realizzate le tabelle riportate in fig. 7.2; per ognuna di esse è stato calcolato il valore medio di ciascun distinto indice di preferenza, ed è mostrata l'incidenza percentuale dello stesso sullo indice di preferenza totale. Osservando i dati riportati, si nota che:

1) Il livello d'ascolto non ha mai un grosso peso sulla diminuzione di preferenza, poiché si è supposto di utilizzare una sorgente di potenza ottimale.

2) La IACC ha invece un peso ben maggiore, oscillante fra il 20 ed il 40 % del totale; in valore assoluto tutte quattro le sale mostrano una situazione molto simile, con valor medio dell'indice di preferenza dell'IACC oscillante attorno a -0.7 . La similitudine discende presumibilmente dal fatto che le 4 sale hanno tutte pianta rettangolare.

3) L'ITDS è senza dubbio il parametro più importante, come d'altronde lo stesso Beranek aveva riscontrato: ad esso si deve, nel caso particolare, il massimo valore assoluto dell'indice di preferenza (-1.68), e la sua importanza viene mitigata solo da valori del tempo di riverberazione veramente eccessivi (S. Domenico con il primo brano musicale).

4) Il tempo di riverberazione è usualmente poco influente

Aula 2.1	pr. liv.	pr. IACC	pr. ITDG	pr. t.r.	pr. tot.
t _e =43	-0.24375	-0.70175	-0.88825	-0.40875	-2.2425
% sul t.	10.86 %	31.29 %	39.60 %	18.22 %	
t _e =127	-0.24375	-0.70175	-1.687	-0.0112	-2.64375
% sul t.	9.21 %	26.54 %	63.81 %	0.42 %	

Maria L.	pr. liv.	pr. IACC	pr. ITDG	pr. t.r.	pr. tot.
t _e =43	-0.2683	-0.63024	-0.78642	-0.15238	-1.8378
% sul t.	14.60 %	34.30 %	42.80 %	8.29 %	
t _e =127	-0.2683	-0.63024	-1.5345	-0.21071	-2.6438
% sul t.	10.14 %	23.83 %	58.04 %	7.97 %	

S. Dom.	pr. liv.	pr. IACC	pr. ITDG	pr. t.r.	pr. tot.
t _e =43	-0.35205	-0.72256	-0.54871	-0.79205	-2.4154
% sul t.	14.57 %	29.91 %	22.71 %	32.79 %	
t _e =127	-0.35205	-0.72256	-1.21513	-0.0694	-2.3592
% sul t.	14.92 %	30.62 %	51.50 %	2.94 %	

T. Astra	pr. liv.	pr. IACC	pr. ITDG	pr. t.r.	pr. tot.
t _e =43	-0.32733	-0.7435	-0.70533	-0.06416	-1.8403
% sul t.	17.78 %	40.40 %	38.32 %	3.48 %	
t _e =127	-0.32733	-0.7435	-1.45983	-0.7745	-3.3052
% sul t.	9.90 %	22.49 %	44.16 %	23.43 %	

Fig. 7.2: Tabella dei valori medi degli indici di preferenza parziali e della incidenza percentuale dei parametri fisici.

sul giudizio, tranne quando è notevolmente discosto dal valore ottimale, come nel citato caso di S. Domenico, o come nel teatro Astra con il secondo brano musicale: in questi casi esso arriva ad eguagliare l'importanza della IACC, con valori dell'indice di preferenza di -0.7 - -0.8 .

In base a quanto esposto, pare evidente che in genere convenga intervenire più sulla IACC e sul tempo di ritardo della prima riflessione, piuttosto che seguire la usuale via che prevede un accurato rispetto dei tempi di riverberazione ottimali. L'importanza del livello sonoro è in realtà ben superiore a quanto emerge dai dati riportati, poiché in generale non è possibile adeguare la potenza della sorgente al valore ottimale richiesto.

E' chiaro che le quattro sale hanno caratteristiche e utilizzi ottimali diversi: l'Aula 2.1 non è certo una buona sala per conferenza, ma come sala da concerto è, se non buona, perlomeno accettabile. Il teatro Maria Luigia è molto adatto a musica moderna o a piccoli complessi, mentre diviene pari all'Aula 2.1 per la musica classica. La chiesa di S. Domenico è viceversa una buona sala per la musica sinfonica di stile romantico, o ovviamente per la musica ecclesiastica. Le sue prestazioni miglioreranno decisamente quando sarà arredata a dovere. Infine il teatro Astra è evidentemente ottimo per la prosa o la

commedia musicale, sarebbe probabilmente buono per la opera lirica, mentre non é adatto alla musica classica.

La valutazione effettuata si basa su una particolare condizione d' uso delle sale studiate: in effetti eventi diversi implicano solitamente diverse sistemazioni, gradi di riempimento e disposizioni all' interno degli ambienti, per cui si può ritenere che sia possibile, sfruttando queste modifiche, adattare in una certa misura l' acustica della sala all' utilizzo che ne viene fatto. Gli indici di preferenza ottenuti aiutano anche in questo caso a comprendere su quali parametri convenga intervenire ed in quali punti della sala. E' auspicabile che queste informazioni trovino utilizzo da parte di scenografi e registi teatrali, onde migliorare la qualità delle loro produzioni e la soddisfazione degli spettatori.

7.2 Problemi irrisolti

Mettendo a punto una procedura del tutto innovativa, basata sulla misura diretta di grandezze sinora solo calcolate, era inevitabile che sorgessero problemi ai quali è stato possibile dare solo una risposta parziale. In questo paragrafo verranno messi in luce questi problemi, e verrà fatta una analisi critica della loro influenza sui risultati ottenuti.

Il primo ostacolo incontrato nella applicazione delle teorie di Ando alla misura diretta della qualità acustica di una sala da concerto è stato la mancanza di una definizione estremamente rigorosa ed operativa delle grandezze fisiche da misurare. Parlando del campo acustico prodotto da una sorgente musicale, lo stesso semplice concetto di "Livello Sonoro" deve essere precisato con rigore; in effetti la potenza sonora emessa è molto variabile, per cui occorre adottare un valore medio su un periodo sufficientemente lungo. La scelta di utilizzare livelli sonori pesati A con costante di tempo "slow" può essere valida per brevi spezzoni di musica anecoica registrata, quali quelli utilizzati nelle valutazioni soggettive con campi acustici simulati; l' utilizzo di sorgenti musicali direttamente nell' ambiente da studiare comporta una situazione ben diversa. Il problema è stato

aggirato, a livello strumentale, utilizzando una sorgente di rumore rosa di potenza perfettamente costante, mentre a livello concettuale si è cercato di minimizzare la influenza del livello di ascolto sul giudizio complessivo ammettendo che sia possibile eseguire il brano musicale con una sorgente di potenza tale da rendere ottimale il livello d' ascolto nella gran parte della sala. Ciò non toglie che la qualità acustica di una sala dipende anche dalla risposta della sala stessa ad una potenza sonora emessa a livello costante: non è però possibile valutare questo aspetto se non si conosce la potenza sonora effettiva della sorgente in ogni parte del brano musicale eseguito, che è un dato usualmente del tutto incognito.

Anche la determinazione del tempo di ritardo della prima riflessione ha creato alcuni problemi: infatti esistono posizioni ove la risposta all' impulso non mostra alcuna riflessione evidente dopo l' onda diretta, poiché le riflessioni vengono schermate da ostacoli. In questi casi usualmente è stata considerata la riflessione proveniente dal pavimento come significativa, ma ciò contrasta con quanto fatto in posizioni vicine, nelle quali è presente una riflessione dalle pareti per cui si considera l' energia proveniente dal pavimento come facente parte del campo diretto. Negli ambienti studiati, di forma rettangolare, questo fenomeno di mancanza di onde

riflesse é abbastanza infrequente, ma in altre sale può verificarsi in gran parte della platea, rendendo così dubbia la valutazione del più importante parametro oggettivo. Forse l'acquisizione di risposte all'impulso più lunghe risolverebbe almeno in parte il problema, poiché potrebbero essere considerate anche riflessioni tardive che attualmente giungono al di fuori della finestra di misura.

Infine anche la misura della IACC ha destato qualche perplessità, poiché in effetti c'è una piccola influenza su questo parametro da parte della sorgente sonora e del brano musicale, che non é stata tenuta in considerazione. Inoltre Ando considera la Correlazione Mutua dei due segnali musicali, non delle risposte all'impulso, con un intervallo complessivo di integrazione di 35 s, contro i 50 ms utilizzati. Peraltro altri autori hanno misurato la IACC con tecnica assimilabile a quella utilizzata nel presente lavoro (risposte all'impulso di 80 ms anziché di 50 ms), trovando valori della IACC sufficientemente prossimi a quelli misurati secondo Ando [43].

Riguardo la strumentazione adottata, sono emersi alcuni problemi di stabilità della taratura dei microfoni adoperati, per cui i livelli sonori misurati a distanza di mesi in sale diverse non sono del tutto confrontabili: la adozione di una testa artificiale di elevata qualità

costruttiva, incorporante microfoni progettati allo scopo, migliorerebbe decisamente la situazione.

Nonostante i problemi citati, le misure hanno mostrato un buon grado di affidabilità e ripetibilità, e solo il confronto con ulteriori analisi eseguite con diversa procedura potrà consentire di valutare la accuratezza complessiva.

7.3 Possibili sviluppi futuri

L'informazione contenuta nelle misure eseguite non viene sfruttata completamente dalla attuale procedura di valutazione della qualità acustica. Possibili miglioramenti sono dunque ottenibili da una duplice azione, basata da un lato sul miglioramento ulteriore delle misure oggettive, dall'altro lato sul migliore sfruttamento dei dati oggettivi per ricavarne informazioni soggettive.

Il primo importante aspetto che dovrebbe essere preso in considerazione è rappresentato dalla composizione spettrale della funzione di trasferimento fra sorgente ed ascoltatore. E' stato infatti osservato come la distorsione spettrale del campo acustico, ed in particolare l'attenuazione delle basse frequenze, pregiudichi in modo sostanziale la qualità acustica (par. 1.6), mentre lo stesso Ando ha concluso che qualunque variazione spettrale dell'energia sonora proveniente dalle riflessioni, rispetto a quella del campo diretto, riduce la preferenza soggettiva [37]. Pertanto andrebbe individuato un descrittore fisico della composizione spettrale, ed andrebbero effettuate analisi psicosoggettive per determinarne l'influenza sull'indice di preferenza, individuando anche per esso una opportuna

scala di valutazione.

Si pensa di effettuare indagini di questo tipo tramite analisi statistiche dei giudizi di preferenza ottenuti da un certo numero di soggetti cui verranno presentate in cuffia coppie di registrazioni, ottenute da uno stesso segnale anecoico di partenza, convolute con le risposte all' impulso effettive misurate in una sala esistente, e sottoposte ad un diverso ulteriore filtraggio tramite un equalizzatore grafico in bande di $1/3$ di ottava. Il descrittore fisico della composizione spettrale potrebbe essere rappresentato dalla pendenza media del profilo di equalizzazione, ottenuta con il metodo dei minimi quadrati. Un descrittore migliore sarebbe lo scarto quadratico medio delle attenuazioni o amplificazioni introdotte, in modo da tenere conto delle disparità spettrali piuttosto che della pendenza complessiva, che potrebbe anche essere nulla.

Sempre riguardo le componenti spettrali del campo acustico, i dati già acquisiti consentono la ricerca di eventuali zone di ombra acustica a particolari frequenze, e la comprensione degli effetti di diversa diffusione sonora al variare della frequenza da parte delle superfici: per fare ciò, verranno realizzate mappe del livello sonoro in bande di frequenza, dal confronto delle quali è possibile comprendere i fenomeni citati.

Per ovviare agli inconvenienti presentati dall' uso del criterio ITDG in quei punti in cui non è evidente alcuna riflessione precoce, si potrebbe cercare di sostituire ad esso il tempo baricentrico dell' energia di Cremer e Kurer [26], che è comunque definito in ogni punto. Sarebbe necessario dimostrare l' indipendenza di questo parametro oggettivo dagli altri, e in seguito effettuare indagini psicosoggettive per determinarne la scala di valutazione.

Sempre riguardo le ulteriori elaborazioni dei dati già acquisiti, potrebbe venire sviluppata una procedura di valutazione dell' indice di articolazione della parola (AI), oppure del più recente Speech Transmission Index (STI): in questo modo, un unici insieme di misure potrebbe fornire contemporaneamente una valutazione della qualità acustica della sala per l' impiego da concerto o da conferenza, unificando almeno concettualmente la trattazione dei diversi aspetti di sale polifunzionali, come in effetti sono tutte quelle studiate. Essendo disponibile la risposta all' impulso in tutte le postazioni di misura, dovrebbe essere possibile estrarre da essa la "Modulation Transfer Function", con la quale è possibile poi calcolare direttamente lo Speech Transmission Index alle varie frequenze [46].

Riguardo la possibilità di migliorare le misure

oggettive, andrà perseguita la possibilità tecnica di aumentare la lunghezza temporale della risposta allo impulso, senza peraltro ridurre né la risoluzione temporale, né il campo di frequenza di indagine. Ciò dovrebbe risultare possibile anche con la strumentazione attuale, utilizzando il microcomputer per il filtraggio inverso della funzione di trasferimento, anziché il software interno dello analizzatore di Fourier.

Si spera di realizzare entro breve tempo gli sviluppi proposti, in modo da disporre di un sistema del tutto completo per la analisi e la valutazione degli ambienti chiusi.

Una volta ottenuta la valutazione oggettiva della qualità acustica di una sala, si può utilizzare una delle tecniche di previsione descritte nel cap. 3 per studiare l'effetto di possibili modifiche: la tecnica di valutazione degli indici di preferenza consente infatti di estrarre immediatamente gli effetti qualitativi dalle risposte all'impulso riferite alle orecchie di un ascoltatore. Dal confronto fra le misure sperimentali ottenute nella sala vera ed i dati ottenuti dal metodo di previsione si ottiene poi il grado di accuratezza del metodo di previsione stesso. E' anche possibile agire su un solo parametro fisico, vista la loro mutua indipendenza sul giudizio di qualità, realizzando modelli mirati alla

previsione del parametro voluto: il nuovo valore dello indice di preferenza va integrato con quelli preesistenti degli altri parametri, per ottenere l' indice di preferenza complessivo.

E' stata rilevata una notevole influenza sulla qualità acustica da parte del brano musicale adottato: andrà pertanto approfondito il legame fra sorgente musicale e campo acustico. Ciò richiede contatti con storici della musica e compositori, onde poter caratterizzare le condizioni ottimali di ascolto di brani diversi; probabilmente sarà necessario classificare le possibili sorgenti musicali ed i possibili brani in categorie omogenee, caratterizzate anch' esse da parametri oggettivi quali la durata convenzionale della funzione di autocorrelazione. Con questo ulteriore approccio si spera di sanare almeno in parte il divario di metodologia e di mentalità che attualmente separa il mondo dei musicisti da quello degli acustici, così come il lavoro svolto dovrebbe fare riguardo i rapporti fra acustici ed architetti.

Lavoro svolto in parte con il contributo dei fondi 40% del Ministero per la Pubblica Istruzione, nell' ambito della ricerca "Aspetti acustici dei Teatri dell' Emilia Romagna".

APPENDICI

BIBLIOGRAFIA

- [1] SABINE W.C. - "Collected Papers on Acoustics" - Dover Publications, New York (1964).
- [2] COCCHI A. - "Riflessioni in merito all' acustica dei teatri" - Rivista Italiana d' Acustica - vol. VIII, p. 69 (1984).
- [3] KNUDSEN V.D. - "Architectural Acoustics" - John Wiley, New York (1932).
- [4] WATSON F.R. - "Acoustics of Auditoriums", New York (1923).
- [5] MICHEL E. - "Handbook d. Arch." , Leipzig (1926).
- [6] WOOD A.B. - "A textbook of sound" - G. Bell e Sons, London (1937).
- [7] KLUHL W. - Acustica, 4, p. 618 (1954).
- [8] BERANEK L.L. - "Acoustics" - Mc Graw Hill, New York (1956).
- [9] LOCHNER J.P., BURGER J.F. - Acustica, 10, p. 394 (1960).
- [10] JAEGER G. - Wiener Akad. Berlin Math. Nat. Kl., 120, p. 613 (1911).
- [11] MORSE P.M. - "Vibration & Sound" - Mc Graw Hill, New York (1948).
- [12] MORSE P.M., INGARD K.V. - "Theoretical Acoustics" - Mc Graw Hill, New York (1968).
- [13] EYRING C.F. - Journal of Acoustic Soc. of America, 1 p. 217 (1930).

- [14] MEYER E. RICHARDSON E.C. - "Technical aspects of sound", vol. III - Elsevier publ., Amsterdam (1962).
- [15] BERANEK L.L. "Music Acoustics and Architecture" - John Wiley, New York (1962).
- [16] SCHROEDER M.R. "Toward Better Acoustics for Concert Halls" - Physics Today, p. 24 October (1980).
- [17] MEYER E., KUTTRUFF H. - Acustica, 13 p. 183 (1968).
- [18] SESSLER G.H., WEST J.E. - Journal of Acoustic Soc. of America, 36 p. 1725 (1964).
- [19] MEYER E., BURGTORF W., DAMESKE P. - "Eine Apparatur zur Elektroakustischen Nachbildung von Schallfeldern" - Acustica, 15 p. 339 (1965).
- [20] MELLERT V. - "Construction of a dummy head after new measurements of thresholds of hearing" - Journ. of Ac. Soc. of America, 51 p. 1359 (1972).
- [21] WILKENS, H. - "Kopfbezugliche Stereophonie-ein Hilfsmittel für Vergleich und Beurteilung verschiedener Raumeindrücke" - Acustica, 26 p. 213 (1972).
- [22] DAMASKE P. - "Head related two channel stereophony with loudspeaker reproduction" - Journ. of Ac. Soc. of America, 50 p. 1109 (1971).
- [23] THIELE R. - "Richtungsverteilung und Zeitfolge der Schallruckwerke in Räumen" - Acustica, 3 p. 291 (1953).
- [24] BERANEK L.L., SCHULTZ T.J. - "Some recent experiences in the design and testing of concert halls with suspended panel arrays" - Acustica, 15 p. 307 (1965).

- [25] REICHARDT W., ABEL ALIM O., SCHMIDT W. - "Definition und Meßgrundlage eines objektiven Maßes zur Ermittlung der Grenze zwischen brauchbarer und unbrauchbarer Durchsichtigkeit bei Musikdarbietung" - *Acustica*, 32 p. 126 (1975).
- [26] KURER R. - "Zur Gewinnung von Einzahlkriterien bei Impulsmessungen in der Raumakustik" - *Acustica*, 21 p. 370 (1969).
- [27] GOTTLÖB D. - Dissertation, Göttingen (1973).
- [28] BARRON M., MARSHALL A.H. - "Spatial Impression due to early lateral reflections in concert halls: the derivation of a physical measure" - *Journal of Sound and Vibration*, 77 p. 211 (1981).
- [29] REICHARDT W., LEHMANN U. - "Definition eines Raumdrucksmaßes R zur Bestimmung des Raumeindrucks bei Musikdarbietungen auf der Grundlage subjektiver Untersuchungen" - *Applied Acoustics*, 11 p. 99 (1978).
- [30] JORDAN V.L. - "Acoustical design of concert halls and theatres" - *Applied Science Publ.*, London (1980).
- [31] DAMASKE P., ANDO Y. - *Acustica*, 27 p. 232 (1972).
- [32] ANDO Y. - "Subjective preference in relation to objective parameters of music sound fields with a single echo" - *Journ. of Ac. Soc. of America*, 62 p. 1436 (1977).
- [33] IANNIELLO C. - "La qualità acustica nelle sale da concerto. Aspetti Soggettivi e criteri oggettivi" - *Rivista Italiana di Acustica*, vol. IX 2 p. 33 (1985).
- [34] ANDO Y., GOTTLÖB D. - "Effects of early multiple reflections on subjective preference judgements of music sound fields" - *Journ. of Ac. Soc. of America*, 65 p. 524 (1979).

- [35] ANDO Y. - "Preferred delay and level of early reflections in concert halls" - Fortschmitt der Akustik, DAGA '81, p. 157 - Berlin (1981).
- [36] KANG S.H., ANDO Y. - "Comparisons between subjective preference judgements for sound fields by different nations" - Memoirs of the Graduate School of Science and Technology, Kobe University, 3-A p. 71 (1985).
- [37] ANDO Y., KAGEYAMA K. - "Subjective preference of sound with a single early reflection" - Acustica, 37 p. 111 (1977).
- [38] ANDO Y., OKURA M., YUASA K. - Acustica, 50 p. 134 (1982).
- [39] ANDO Y., MORIOKA K., Journ. of Acoustic Society of Japan, 39 p. 89 (1983).
- [40] ANDO Y., OTERA K., HAMANA Y. - Journ. of Ac. Soc. of Japan, 39 p. 89 (1983).
- [41] XU YAYING - "Psycho-acoustic test for the concert hall acoustics" - proc. of 11th I.C.A., Lyon (1983).
- [42] ANDO Y., IMAMURA M. - "Subjective preference tests for sound fields in concert halls simulated by the aid of a computer" - Journ. of Sound and Vib., 65 p. 229 (1979).
- [43] XU Y., CAUSSE' R., JULLIEN J.P. - "IACC and LE measurements in concert hall" - proc. of 11th I.C.A., Lyon (1983).
- [44] ANDO Y. - "Calculation of subjective preference at each seat in a concert hall" - Journ. of Ac. Soc. of America, 74 p. 873 (1983).
- [45] ANDO Y. - "Concert Hall Acoustics" - Springer-Verlag, Berlin (1985).

- [46] SCHROEDER M.R. - "Modulation Transfer Functions: definition and measurement" - *Acustica*, 49 p. 179 (1981).
- [47] KURER R., KURZE V. - "Integrations Verfahren zur Nachlallauswertung" - *Acustica*, 19 p. 313 (1967-68).
- [48] ATAL B.S., SCHROEDER M.R., SESSLER G.M. - "Subjective reverberation time and its relation to sound decay" - *proc. of 5th I.C.A.*, paper G32, Liege (1965).
- [49] JORDAN V.L. - "Einige Bemerkungen-uber Anhall und Anfangsnachhall in Musikraumen" - *Applied Acoustics*, 1 p. 29 (1968).
- [50] SCHROEDER M.R. - "New method of measuring reverberation time" - *Journ. of Ac. Soc. of America*, 37 p. 409 (1965).
- [51] CREMER L., MULLER H.A. - "Principles and Applications of Room Acoustics" - *Applied Science Publ.*, London (1982).
- [52] BARRON M. "Impulse test techniques for auditoria" - *Applied Acoustics* 17, p. 165 (1984).
- [53] BERKHOUT A.J. - "Least-squares inverse filtering and wavelet deconvolution" - *Geophisics*, 42 p. 1369 (1977).
- [54] BERKHOUT A.J., DE VRIES D., BOONE M.M. - "A new method to acquire impulse responses in concert halls" - *Journ. of Ac. Soc. of America*, 68 p. 179 (1980).
- [55] ALRUTZ H. "Ein neuer Algorithmus zur Auwertung von Messungen mit Pseudorauschsignalen" - *Fortschritte der Akustik, DAGA '81*, p. 525 - Berlin (1981).
- [56] XU YAYING - "Correlation entre l' appreciation subjective et les parametres objectifs des salles de concert" - *Expose del Laboratoire d' Acoustique IRCAM, Paris* (1981).

- [57] JORDAN V.L. "A group of objective acoustical criteria for concert halls" - Applied Acoustics, 14 p. 253 (1981).
- [58] FAHY F.J. - "A technique for measuring sound intensity with a sound level meter" - Journ. of Ac. Soc. of America 62, p. 1057 (1977).
- [59] PISANI V. - Comunicazione al Convegno A.I.A. di Torino (1983).
- [60] PRANDTL - "The physics of solids and fluids" part II - Blackie, Glasgow (1936).
- [61] VON KARMAN T. - "The similarity law of transonic flow" - J. Math and Phys. 26, p. 182 (1947).
- [62] POMPOLI R., PAGLIARINI G., CLARKSON B.L. - "Sound prediction by scale models - Measurements on a tractor cab and its 1/5 scale model" - proc. of 11th. I.C.A., Lyon (1983).
- [63] FARINA A. - "Previsione mediante modelli in scala del campo acustico generato all' interno di strutture chiuse vibranti" - Università di Bologna, tesi di laurea in Ingegneria (1982).
- [64] FARINA A., PAGLIARINI G., POMPOLI R. - "Campo acustico generato all' interno dell' abitacolo dei mezzi di trasporto: confronto fra tecniche numeriche e tecniche sperimentali su modelli in scala" - Atti del 3° Convegno Nazionale P.F.T. - C.N.R., Taormina (1985).
- [65] FARINA A., PAGLIARINI G., POMPOLI R. - "Determinazione delle prestazioni acustiche dell' abitacolo di veicoli: previsione mediante modelli numerici e verifiche sperimentali" - Atti del 4° Convegno Nazionale P.F.T. - C.N.R., Torino (1986).
- [66] BARRON M. - "Auditorium Acoustic Modelling Now" - Applied Acoustics, 16 p. 279 (1983).

- [67] GUALMINI G. - "Valutazione delle caratteristiche acustiche di una sala per conferenze. Previsione teorica mediante l' uso di modelli in scala" - Università di Bologna, tesi di laurea in Ingegneria (1979).
- [68] PAGLIARINI G., POMPOLI R. - "The sound pressure level within a cylindrical chamber with a sinusoidally driven end wall" - proc. of Int. Conf. on Recent Advances in Structural Dynamics, 2 p. 457 - Southampton (1980).
- [69] ESSERT R.D., WALSH J.P., EDWARDS N., CORMACK R. - "Audible simulation using scale model impulse responses" - paper AA5 at 10th Meeting of the Ac. Soc. of America - Minneapolis (1984). Minneapolis (1984).
- [70] BENDAT J.S., PIERSOL A.G. - "Engineering applications of correlation and spectral analysis" - J. Wiley & Sons, New York (1980).
- [71] PARKIN P.H., SCHOLLES W.E., DERBYSHIRE A.G. - Acustica, 2 p. 97 (1952).
- [72] HARMAN H.N. "Modern Factor Analysis", University of Chicago Press, Chicago (1968).
- [73] WILKENS H., PLENGE G. - "Auditorium Acoustics" - Applied Science Publ., London (1975).
- [74] SIEBRASSE K.F. - Dissertation, Gottingen (1973).
- [75] SCHROEDER M.R., GOTTLÖB D., SIEBRASSE K.F. - "Comparative study of european concert halls: correlation of subjective preference with geometric and acoustic parameters" - Journ. of Ac. Soc. of America, 56 p. 1195 (1974).
- [76] GIULIANINI A., COCCHI A. - "Un contributo alla conoscenza delle caratteristiche acustiche degli spazi chiusi: le chiese" - Rivista It. di Acustica vol IX, n° 1 (1985).

[77] REBECCHI C. - "Proposte di intervento per la trasformazione in auditorium della chiesa di S. Rocco in Carpi" - Tesi di laurea in ingegneria, Univ. di Bologna - A.A. 84-85 .

[78] ALLODI I. - "I teatri di Parma dal Farnese al Regio" - Nuove Edizioni, Milano (1969).

ELENCO DELLE FIGURE

Fig. 1.1: Attenuazione delle principali frequenze con la distanza nella New York's Philharmonic Hall.	p. 34
Fig. 1.2: Caratteristiche di autocorrelazione di diversi segnali musicali.	p. 46
Fig. 1.3: Legame fra durata effettiva della autocorrelazione e tempo di ritardo preferito della prima riflessione.	p. 48
Fig. 1.4: Legame fra durata effettiva della autocorrelazione e tempo di riverberazione preferito.	p. 50
Fig. 2.1: Curva di ponderazione "A".	p. 62
Fig. 2.2: Spettro sonoro in terzi d' ottava.	p. 64
Fig. 2.3: Spettro sonoro in banda stretta.	p. 65
Fig. 2.4: Mappa di livello sonoro e curve di decremento.	p. 69
Fig. 2.5: Tracciati di decadimento di un rumore stazionario.	p. 72 _{bis}
Fig. 2.6: Apparato sperimentale per la registrazione dei decadimenti sonori.	p. 72 _{bis}
Fig. 2.7: Strumentazione per analisi in terzi di ottava dei tempi di riverberazione.	p. 75
Fig. 2.8: Analizzatore di frequenza in tempo reale.	p. 76
Fig. 2.9: Effetto dello "smoothing" sulle curve di decadimento.	p. 78

Fig. 2.10: Risposta all' impulso teorica.	p. 83
Fig. 2.11: Risposta all' impulso effettiva.	p. 83
Fig. 2.12: Risposta all' impulso quadrata.	p. 86
Fig. 2.13: Risposta all' impulso in decibel.	p. 86
Fig. 2.14: Caratteristiche temporali delle sorgenti impulsive.	p. 88
Fig. 2.15: Analizzatore di Fourier (FFT).	p. 93
Fig. 2.16: Risposte all' impulso ottenute per deconvoluzione.	p. 98
Fig. 2.17: Ricostruzione della curva di decadimento mediante integrazione all' indietro.	p. 101
Fig. 2.18: Risposta all' impulso e corrispondente curva di decadimento ricostruita tramite la integrazione di Schroeder.	p. 102
Figg. 3.1 e 3.2: Modello in scala per lo studio della riverberazione dell' Aula Magna.	p. 128
Figg. 3.3 e 3.4: Modello in scala per studio delle riflessioni del Nuovo Teatro Comunale di Cagliari.	p. 130
Fig. 3.5: Sorgenti virtuali generate da una camera rettangolare.	p. 139
Fig. 4.1: Proiezioni su due piani dello "spazio delle preferenze" ottenuto da Wilkens.	p. 168
Fig. 4.2: Percentuali della varianza complessiva spiegate dai fattori ottenuti da Siebrasse.	p. 171

Fig. 4.3: Proiezioni su tre piani dello "spazio delle preferenze" ottenuto da Siebrasse (didascalia originale).	p. 172
Fig. 4.4: Proiezione su un piano dello spazio delle preferenze ottenuto da Gottlob, Schroeder e Siebrasse (didascalia originale).	p. 176
Fig. 4.5: Correlazione fra parametri oggettivi e fattore F1 (didascalia originale).	p. 177
Fig. 4.6: Fattore di consenso F1 in funzione del livello d' ascolto e della IACC (didasc. orig.).	p. 180
Fig. 4.7: Fattore di consenso F1 in funzione del tempo di ritardo della prima riflessione e del tempo di riverberazione (didasc. orig.).	p. 181
Fig. 4.8: Indice di preferenza del livello d' ascolto (didasc. orig.).	p. 185
Fig. 4.9: Indice di preferenza del tempo di ritardo della prima riflessione (didasc. orig.).	p. 186
Fig. 4.10: Indice di preferenza del tempo di riverberazione (didasc. orig.).	p. 189
Fig. 4.11: Indice di preferenza della IACC (didasc. orig.).	p. 190
Fig. 5.1: Schema del sistema d' analisi della qualità acustica proposto da Ando.	p. 193
Figg. 5.2 e 5.3: Sorgente sonora B&K 4234 e curva di risposta in frequenza.	p. 201
Fig. 5.4: Testa artificiale.	p. 203
Fig. 5.5: Curve di calibrazione dei microfoni.	p. 206

Fig. 5.6: Microcomputer Commodore SX64	p. 212
Fig. 5.7: Apparato di connessione e cavi.	p. 217
Fig. 5.8: Schema del commutatore a relé.	p. 217
Fig. 5.9: Schema complessivo dei collegamenti.	p. 219
Fig. 5.10: Esempio di stampa numerica dei dati elaborati.	p. 241
Fig. 5.11: Rappresentazione grafica dei dati elaborati.	p. 243
Fig. 6.1: Confronto fra i tempi di riverberazione misurati nel modello e nella Aula Magna.	p. 251
Fig. 6.2: Pianta e sezioni dell' Aula Magna (Aula 2.1).	p. 253
Fig. 6.3: Fotografia dell' Aula Magna.	p. 254
Fig. 6.4: Fotografia dell' Aula Magna.	p. 255
Fig. 6.5: Confronto fra le misure effettuate a distanza di un anno.	p. 256
Fig. 6.6: Mappa del livello sonoro.	p. 258
Fig. 6.7: Mappa del tempo di riverberazione.	p. 258
Fig. 6.8: Mappa del tempo di ritardo della prima riflessione.	p. 260
Fig. 6.9: Mappa della ampiezza equivalente delle riflessioni.	p. 260

Fig. 6.10: Indice di preferenza del livello sonoro.	p. 264
Fig. 6.11: Indice di preferenza della IACC.	p. 264
Fig. 6.12: Indice di preferenza del tempo di ritardo della prima riflessione - brano musicale 1.	p. 266
Fig. 6.13: Indice di preferenza del tempo di riverberazione - brano musicale 1.	p. 266
Fig. 6.14: Indice di preferenza del tempo di ritardo della prima riflessione - brano musicale 2.	p. 268
Fig. 6.15: Indice di preferenza del tempo di riverberazione - brano musicale 2.	p. 268
Fig. 6.16: Indice di preferenza totale - brano musicale 1.	p. 269
Fig. 6.17: Indice di preferenza totale - brano musicale 2.	p. 269
Figg. 6.18 e 6.19: Fotografie del teatro del Convitto Nazionale Maria Luigia.	p. 274
Fig. 6.20: Pianta e sezioni del Teatro Maria Luigia.	p. 276
Fig. 6.21: Mappa del livello sonoro.	p. 278
Fig. 6.22: Mappa del tempo di riverberazione.	p. 278
Fig. 6.23: Mappa del tempo di ritardo della prima riflessione.	p. 280
Fig. 6.24: Mappa della ampiezza equivalente delle riflessioni.	p. 280
Fig. 6.25: Mappa della IACC.	p. 281

Fig. 6.26: Indice di preferenza del livello sonoro.	p. 283
Fig. 6.27: Indice di preferenza della IACC.	p. 283
Fig. 6.28: Indice di preferenza del tempo di ritardo della prima riflessione - brano musicale 1.	p. 285
Fig. 6.29: Indice di preferenza del tempo di riverberazione - brano musicale 1.	p. 285
Fig. 6.30: Indice di preferenza del tempo di ritardo della prima riflessione - brano musicale 2.	p. 287
Fig. 6.31: Indice di preferenza del tempo di riverberazione - brano musicale 2.	p. 287
Fig. 6.32: Indice di preferenza totale - brano musicale 1.	p. 288
Fig. 6.33: Indice di preferenza totale - brano musicale 2.	p. 288
Fig. 6.34: Pianta e sezioni della Chiesa S. Domenico di Foligno.	p. 292
Fig. 6.35: Sezione trasversale della Chiesa S. Domenico.	p. 293
Fig. 6.36: Mappa del livello sonoro.	p. 295
Fig. 6.37: Mappa del tempo di riverberazione.	p. 295
Fig. 6.38: Mappa del tempo di ritardo della prima riflessione.	p. 296
Fig. 6.39: Mappa della ampiezza equivalente delle riflessioni.	p. 296

Fig. 6.40: Mappa della IACC.	p. 298
Fig. 6.41: Indice di preferenza del livello sonoro.	p. 300
Fig. 6.42: Indice di preferenza della IACC.	p. 300
Fig. 6.43: Indice di preferenza del tempo di ritardo della prima riflessione - brano musicale 1.	p. 302
Fig. 6.44: Indice di preferenza del tempo di riverberazione - brano musicale 1.	p. 302
Fig. 6.45: Indice di preferenza del tempo di ritardo della prima riflessione - brano musicale 2.	p. 303
Fig. 6.46: Indice di preferenza del tempo di riverberazione - brano musicale 2.	p. 303
Fig. 6.47: Indice di preferenza totale - brano musicale 1.	p. 305
Fig. 6.48: Indice di preferenza totale - brano musicale 2.	p. 305
Fig. 6.49: Piante del Teatro Astro di Forlì.	p. 309
Fig. 6.50: Sezione longitudinale del Teatro Astra di Forlì.	p. 310
Fig. 6.51: Mappa del livello sonoro.	p. 313
Fig. 6.52: Mappa del tempo di riverberazione.	p. 313
Fig. 6.53: Mappa del tempo di ritardo della prima riflessione.	p. 315
Fig. 6.54: Mappa della ampiezza equivalente delle riflessioni.	p. 315

Fig. 6.55: Mappa della IACC.	p. 316
Fig. 6.56: Indice di preferenza del livello sonoro.	p. 319
Fig. 6.57: Indice di preferenza della IACC.	p. 319
Fig. 6.58: Indice di preferenza del tempo di ritardo della prima riflessione - brano musicale 1.	p. 320
Fig. 6.59: Indice di preferenza del tempo di riverberazione - brano musicale 1.	p. 320
Fig. 6.60: Indice di preferenza del tempo di ritardo della prima riflessione - brano musicale 2.	p. 322
Fig. 6.61: Indice di preferenza del tempo di riverberazione - brano musicale 2.	p. 322
Fig. 6.62: Indice di preferenza totale - brano musicale 1.	p. 323
Fig. 6.63: Indice di preferenza totale - brano musicale 2.	p. 323
Fig. 7.1: Tabella dei valori medi dell' indice di preferenza totale.	p. 330
Fig. 7.2: Tabella dei valori medi degli indici di preferenza parziali e della incidenza percentuale dei parametri fisici.	p. 332

Tabella dei Simboli

simbolo	grandezza	u. di mis.
A	costante di scala	/
A	ampiezza equival. delle rifless.	/
$A_c(t')$	funz.normal. di autocorrelazione	/
a_1	coeff. di assorbimento apparente	/
a_m	coeff. medio di assorb. apparente	/
ANZ	tempo di riverb. iniziale (T_{20})	s
B	costante di scala	/
β	coeff. di assorbimento dell'aria	m^{-1}
c, c_0	velocita' del suono	m/s
C	Klarheitmass o Indice di Chiarez.	/
D	Deutlichkeit o Indice di Definiz.	/
EDT	tempo di primo decadimento (T_{10})	s

f	frequenza	Hz
f_{1k}	parametri oggettivi	/
F_{31}	Fattore di vista	/
g_k	indice di qualita' della sala	/
$g(t)$	risposta all' impulso	/
$G(f)$	funzione di trasferimento	/
G_{12}	densita' spettrale incrociata	Pa ²
I	intensita' acustica	W/m ²
IACC	Correlazione Mutua Inter Aurale	/
IRT	tempo di ritardo iniziale (T_{12})	s
ITDG	tempo di ritardo della 1 ^a rifles.	ms
$K(t')$	funz. norm. di correlaz. mutua	/
L	lunghezza caratteristica geom.	m
L_e	Efficienza Laterale	/

L_p	Livello di pressione sonora	dB
L_w	Livello di potenza sonora	dB
n	versore normale ad una superficie	/
$n(t)$	decadimento di un suono stazion.	/
p'	valore ist. della press. sonora	Pa
\bar{p}'	val. medio eff. della press. son.	Pa
$p(t)$	segnale in uscita	Pa
$P(f)$	spettro del segnale in uscita	Pa
Q	direttivita' di una sorgente son.	/
r	distanza	m
r_m	coeff. medio di riflessione	/
R	criterio R di Beranek e Schultz	/
ρ_0	densita' del mezzo acustico	kg/m ³
S	superficie	m ²

SI	Impressione Spaziale	/
S_i	indice di preferenza del param. i	/
$s(t)$	segnale in ingresso	Pa
$S(f)$	spettro del segnale in ingresso	Pa
S.T.I.	Speech Transmission Index	/
t	tempo corrente	s
t'	tempo di ritardo o di sfasamento	s
t_e	durata effettiva della funzione di autocorrelazione di un segnale	ms
t_w	tempo baricentro dell' energia	ms
T	tempo di riverberazione	s
T_{sub}	Tempo di riverberaz. soggettivo	s
u	velocita' delle particelle	m/s