

**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 <sub>e</sub> =43	-0.24375	-0.70175	-0.88825	-0.40875	-2.2425
% sul t.	10.86 %	31.29 %	39.60 %	18.22 %	
t <sub>e</sub> =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 <sub>e</sub> =43	-0.2683	-0.63024	-0.78642	-0.15238	-1.8378
% sul t.	14.60 %	34.30 %	42.80 %	8.29 %	
t <sub>e</sub> =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 <sub>e</sub> =43	-0.35205	-0.72256	-0.54871	-0.79205	-2.4154
% sul t.	14.57 %	29.91 %	22.71 %	32.79 %	
t <sub>e</sub> =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 <sub>e</sub> =43	-0.32733	-0.7435	-0.70533	-0.06416	-1.8403
% sul t.	17.78 %	40.40 %	38.32 %	3.48 %	
t <sub>e</sub> =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 è 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 Schallruckwerfe 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" - *Geophysics*, 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 Pseudorauschsinalen" - *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 <sub>bis</sub>
Fig. 2.6: Apparato sperimentale per la registrazione dei decadimenti sonori.	p. 72 <sub>bis</sub>
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: Pianta 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	/
$\beta$	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 <sup>2</sup>
I	intensita' acustica	W/m <sup>2</sup>
IACC	Correlazione Mutua Inter Aurale	/
IRT	tempo di ritardo iniziale ( $T_{12}$ )	s
ITDG	tempo di ritardo della 1 <sup>a</sup> 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	/
$\rho_0$	densita' del mezzo acustico	kg/m <sup>3</sup>
$S$	superficie	m <sup>2</sup>

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