

*Breve storia dell'evoluzione dei modelli
per il suono nelle grandi sale*

Introduzione

Nel passato la progettazione acustica di un auditorium aveva poco di scientifico e di ingegneria. Grandi sale con una buona acustica erano spesso il frutto di una certa dose di fortuna. L'architettura delle fortunate era imitata nell'intento di realizzare la stessa acustica ma non pochi risultati sono stati deludenti. Poco era noto sul perché una sala fosse acclamata per le sue qualità acustiche ed un'altra, apparentemente simile, non godesse pure di una reputazione simile.

Il disagio dovuto all'assenza di conoscenze scientifiche sull'acustica delle grandi sale è evidente nelle parole dell'architetto Jean Louis Charles Garnier (1825-1898) progettista della grandiosa Opéra di Parigi: “...*Mi sono preoccupato di conoscere a fondo questa bizzarra scienza [dell'acustica] ma...da nessuna parte ho trovato regole sicure che potessero guidarmi; al contrario solo contraddizioni...Io devo dichiarare di non aver adottato alcun principio, che il mio progetto non si basa su alcuna teoria e che dal caso soltanto attendo l'insuccesso o la riuscita...come un acrobata che ad occhi chiusi si aggrappa alle corde di un pallone che sale.*”¹

È solo alla fine dell'ottocento che Wallace Clement Sabine (1868 - 1919),

il pioniere dell'acustica architettonica quantitativa, gettò la prima luce sulla materia rimasta oscura per più secoli. È nota l'aneddotica su come questo saggace giovane ricercatore dell'Università di Harvard (USA) giunse alla determinazione della famosa formula del tempo di riverberazione, ancora oggi preziosa².

La formula del tempo di riverberazione di Sabine, rappresenta a ragione il primo modello matematico utile per l'ingegneria dell'acustica degli auditori. Successivamente, studi teorici e sperimentali sono stati pubblicati con un tasso crescente nel tempo nell'intento della previsione sempre più accurata delle loro prestazioni acustiche.

Questa nota descrive brevemente le linee fondamentali degli sviluppi in materia da Sabine ai giorni nostri. Sono esaminati i primi tentativi basati su modelli fisici bidimensionali con la visualizzazione ottica di certi aspetti della propagazione ondosa, studi acustici con modelli fisici tridimensionali in scala ridotta che in certe realizzazioni consentivano anche l'ascolto di come sarebbe stata l'esperienza uditiva della sala in progetto (auralizzazione) e, infine, i modelli al calcolatore sempre più perfezionati rispetto alle prime realizzazioni della fine degli anni sessanta che oggi consentono anche auralizzazioni realistiche del manufatto in progetto.

Modelli fisici bidimensionali e tridimensionali

Ultrasuoni e fotografia Schlieren

Nel 1913 Sabine³ pubblicò un lavoro sperimentale basato su una tecnica da lui indicata come metodo di Toepler-Boys-Foley modificato per la ripresa fotografica di disturbi nell'aria. Sostanzialmente, si tratta delle prime applicazioni della visualizzazione di campi ultrasonici in fluidi trasparenti basata sull'interazione acusto-ottica (la parola tedesca *Schlieren* corrisponde a *striatore*)⁴. In pratica, era costruito un modello in scala ridotta dell'auditorium in progetto dal quale erano rimosse delle superfici, ad esempio le pareti laterali sostituite da superfici trasparenti alla luce. Un suono di durata molto breve era prodotto nel punto in cui si supponeva collocata la sorgente reale e mentre il suono si propagava nel modello un lampo di luce prodotto da un lato del modello lo attraversava andando ad impressionare una lastra fotografica dall'altro lato. Usual-

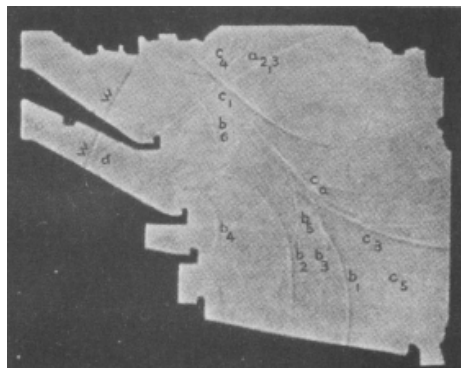


Fig. 1 – Foto Schlieren con l'identificazione dei fronti d'onda effettuata da W.C. Sabine per lo studio acustico del New Theatre in New York

mente, il flash era generato dalla scintilla che scoccava tra due elettrodi. Un dispositivo analogo era utilizzato come sorgente sonora impulsiva. La ripresa di fotogrammi in successione temporale forniva un'idea della propagazione e dell'interazione dei fronti d'onda. La Fig.1 riporta un'istantanea ripresa ed analizzata da Sabine per una sezione del modello del New Theatre di New York.

Un esempio ulteriore di studio è rappresentato più chiaramente nella Fig. 2 riportata da J. Engl⁵. Si tratta di un'istantanea Schlieren del modello della famosa sala da concerto Neues Gewandhaus di Lipsia distrutta dagli eventi bellici della II Guerra Mondiale. Sono evidenziati meglio gli effetti di diffrazione e diffusione causati dai dettagli geometrici del soffitto e le traiettorie delle onde.

Vasca con onde superficiali sull'acqua

Questa tecnica, nota anche come "ripple tank", è stata usata spesso nel passato. La Fig. 3 mostra la realizzazione dell'apparato come riportato da Davis e Kaye⁶. Una vasca con il fondo trasparente aveva il contorno profilato come quello della sezione della sala da studiare. La punta di un'asticciola col-

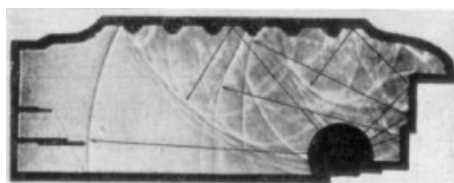


Fig.2 – Foto Schlieren che mostra il rinvio dei fronti d'onda ultrasonici dal soffitto di un modello della Neues Gewandhaus di Lipsia



Fig. 3 – Allestimento di un “ripple tank”

legata ad un generatore di vibrazioni era immersa nel punto sorgente appena sotto il pelo libero dell'acqua profonda qualche centimetro. La frequenza dell'eccitatore era scelta in modo tale che la lunghezza d'onda delle onde superficiali generate sul pelo dell'acqua fosse in un rapporto con le dimensioni geometriche del modello simile a quello tra le lunghezze d'onda nell'aria e le dimensioni geometriche della sala in scala reale, per il parlato e/o la musica.

Come per la tecnica fotografica Schlieren a ultrasuoni, un lampo di luce emesso da un lato del modello impressionava una lastra fotografica posta opportunamente dall'altro lato. La Fig. 4 mostra una sequenza di immagini riprese dagli stessi Autori⁶ con la tecnica del ripple tank per una sezione di un modello di auditorium in scala ridotta nel rapporto 1:50. La lunghezza d'onda nel modello era dell'ordine di 13 mm corrispondente ad una lunghezza d'onda di circa 610 mm per l'aria nell'auditorium in scala reale (frequenza ~ 560 Hz). Gli Autori⁶ riportano che già nel 1843 Scott Russel utilizzava le onde superficiali sull'acqua per indagare sull'acustica degli ambienti chiusi.

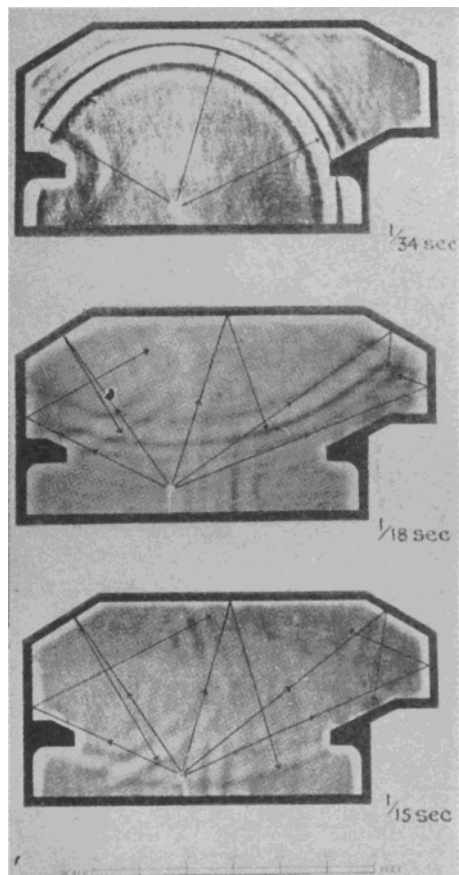


Fig. 4 – Ripple tank. Tre fotografie riprese in sequenza 1/34 s, 1/18 s e 1/15 s dopo l'attivazione della sorgente di vibrazione per una sezione di un modello di un auditorium che mostrano l'evoluzione dei fronti d'onda nel tempo

Raggi di luce

Questa tecnica ottica utilizzata da Takeo Satow⁷ è basata sul semplice apparato illustrato nella Fig.5. Una cassa di vetro in cui era inserita una sezione, o una pianta o un'altra superficie, di un modello realizzato in metallo molto lucidato. Una sorgente di luce S era posta nella posizione della sorgente so-

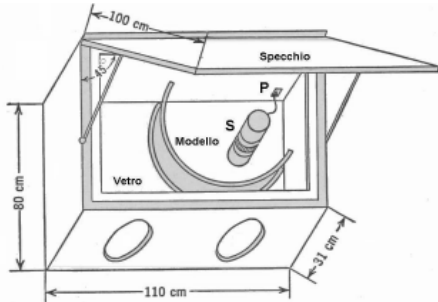


Fig. 5 - Apparato ottico di Satow

nora. La lampada era contenuta in uno schermo cilindrico dotato di fessure lungo una circonferenza che producevano numerosi raggi luminosi con una distribuzione angolare uniforme. Questi raggi erano riflessi dalle superfici speculari del modello ed erano resi visibili dalla diffusione della luce causata dalle particelle del fumo che riempiva l'apparato. Le superfici assorbenti erano annerite.

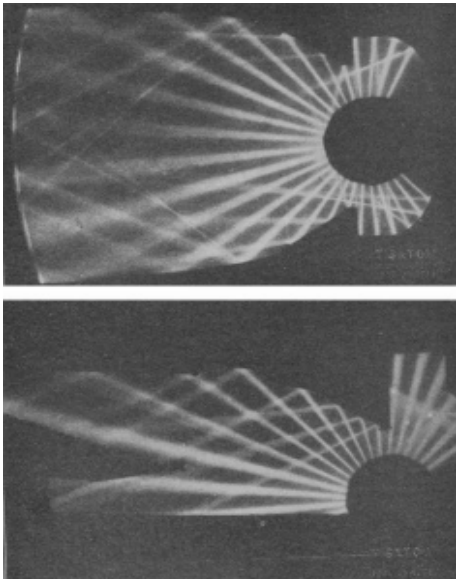


Fig. 6 - Raggi luminosi nel modello della pianta (alto) ed in quello della sezione longitudinale (basso) dell'Okuma Memorial Auditorium

La Fig. 6 mostra le fotografie dei raggi luminosi fatte da Satow in occasione dello studio acustico preliminare della pianta e della sezione longitudinale dell'Okuma Memorial Auditorium in Giappone. Sostanzialmente, questa tecnica consentiva di osservare solamente le riflessioni del primo ordine. In tempi più recenti la tecnica si è giovata del raggio laser che, intenso e molto collimato, consente puntamenti più precisi per indagare sulle prime riflessioni. I ricercatori della Nagata Acoustics hanno studiato le prime riflessioni in un modello ottico tridimensionale della sala da concerto Suntory Hall inaugurata a Tokyo nel 1986.

Luce distribuita

Oltre che studiare una sala con i raggi luminosi, Vermeulen e De Boer⁸ tentarono di valutare l'intensità del suono sulla base delle variazioni della luminosità delle riflessioni della luce. In un loro modello ottico, durante uno studio per il Teatro della Philips ad Eindhoven in Olanda, sostituirono la platea occupata dagli spettatori con una lastra di vetro opalino. Le superfici riflettenti erano rivestite di fogli in alluminio. Con una sorgente luminosa, opportunamente schermata, posta nel modello, impressionavano una lastra fotografica sotto il vetro opalino nello scopo di registrare la distribuzione dell'illuminamento come rappresentazione della distribuzione dell'energia sonora superficiale in regime stazionario. La Fig. 7 mostra un modello ottico di una sala con il soffitto concavo in scala molto ridotta.



Fig. 7 – Modello ottico di una sala con soffitto concavo per lo studio della distribuzione dell'energia sonora sul pavimento della platea

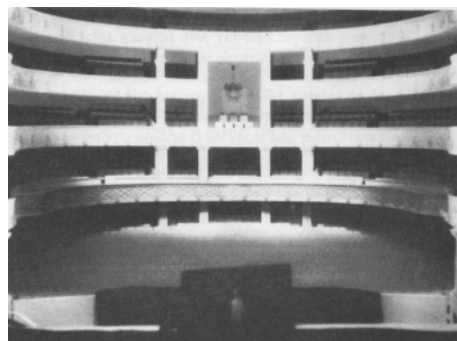


Fig. 8 – Modello ottico tridimensionale del Teatro Nazionale di Monaco di Baviera

Un modello tridimensionale a distribuzione della luce è riportato da Cremer⁹. Il modello fu realizzato per dimostrare la necessità di cambiare il soffitto a cupola originale del Teatro Nazionale di Monaco. Questo teatro d'opera, costruito agli inizi dell'ottocento, doveva essere rifatto come era prima della sua distruzione avvenuta durante la II Guerra Mondiale. La Fig. 8 evidenzia che la sorgente di luce sul palcoscenico, schermata affinché la luce emessa

non giungesse direttamente al pubblico, illumina il palco reale ed i suoi dintorni principalmente a causa della luce riflessa dal soffitto. La concentrazione del suono dalla cupola costituiva un rischio di eco udibile. Il problema fu risolto diminuendo la concavità fisica e dipingendo una prospettiva di cupola all'intradosso che evocava visivamente la sensazione di profondità dell'originale. La Tabella 1 mostra sinteticamente le caratteristiche dei metodi elencati sopra.

	Metodo Schlieren	Ripple Tank	Metodo ottico Raggi di luce	Metodo ottico Distribuzione	Metodo ottico Raggio Laser
Anno della prima pubblicazione	1913	1921	1929	1936	1985
Numero di dimensioni D	2D	2D	2D	3D	3D
Aspetto fisico	Ultrasuoni	Onde sull'acqua	Luce	Luce	Luce Laser
Fronte d'onda	X	X			
Lunghezza d'onda		X			
Rapporto di scala tipico	1:200	1:50	1:50	1:200	1:10
Riflessioni iniziali	X	X	X		X
Distribuzione dell'energia				X	
Assorbimento superficiale	X		((X))	((X))	((X))
Effetti di diffusione (scattering)	X	X			
Effetti di diffrazione	X	X			

Tab. 1 – Caratteristiche dei metodi fisici (Da Rindel modificata)

*Modelli acustici in scala ridotta**Similitudine acustica*

La base teorica di questa modellistica è la relazione di similitudine:

$$\frac{\lambda_m}{\lambda_w} = \frac{l_m}{l_w} = \mu$$

dove λ_m e λ_w sono le lunghezze d'onda nel modello e nella sala reale rispettivamente; l_m è una lunghezza nel modello e l_w è la lunghezza corrispondente nella sala reale; μ è il rapporto di scala. Se il mezzo è aria, sia nel modello sia nella sala reale, la relazione di similitudine diventa:

$$\frac{f_m}{f_w} = \frac{1}{\mu}$$

dove f_m e f_w sono la frequenza nel modello e la corrispondente nella sala reale. Se il rapporto di scala è $\mu = 1/10$, tutte le frequenze usate nel modello devono essere 10 volte quelle corrispondenti nella sala reale. Il campo di frequenze di interesse in una sala reale è almeno quello definito dalle bande ottave con frequenze centrali da 63 Hz a 4 kHz. Pertanto, quello da utilizzare nel modello deve essere esteso alle bande ottave da 630 Hz a 40 kHz. Questa trasposizione in frequenza implica l'uso di sorgenti e sensori con prestazioni adeguate nel campo degli ultrasuoni.

Il problema centrale rispetto all'accuratezza dei modelli acustici in scala ridotta è il coefficiente di assorbimento di ciascuna superficie che alla frequenza del modello f_m deve essere uguale a quello nella sala reale alla frequenza corrispondente f_w . Anche l'aria ed il pubblico devono avere un comportamento

scalato. Una discussione approfondita di questi aspetti è riportata da Polack et al.¹¹

Evoluzione dei modelli acustici

Nel 1934 Spandöck¹² pubblicò un lavoro su un metodo per la valutazione soggettiva dell'acustica di una sala di cui aveva realizzato un modello tridimensionale in scala 1:5. Utilizzò un registratore che incideva la traccia di un segnale sonoro sulla superficie di un cilindro rivestito di cera che ruotava a 60 giri al minuto. Tramite un altoparlante il segnale fu riprodotto nel modello a 300 giri al minuto e registrato all'interno alla stessa velocità. La riproduzione di questa registrazione a 60 giri al minuto consentiva di apprezzare in anticipo gli effetti dell'acustica della sala da costruire. Successivamente Jordan¹³ migliorò questo metodo della trasposizione in frequenza utilizzando un registratore magnetico a filo per dimostrare a orecchio gli effetti acustici di sistemi fonoassorbenti sull'intelligibilità del discorso in un suo modello. Tra le varie attività progettuali con modelli, Jordan è stato molto impegnato durante il lungo e tormentato iter (circa 1957-1973) della progettazione e realizzazione del complesso della Sydney Opera House¹⁴ (Fig.9).



Fig. 9 – Vista del complesso della Sydney Opera House



Fig. 10 – Jordan in un modello 1:10 della “Major Hall” della Sydney Opera House (da [10])

La Fig.10 mostra Wilhelm Lassen Jordan nel modello acustico in scala 1:10 (circa 1966) dell'ultima versione della “Major Hall” della Sydney Opera House dovuta all'architetto Jørn Utzon. Questo modello non corrisponde alla realizzazione finale della sala. Durante le sue attività Jordan sviluppò un registratore a nastro magnetico di alta qualità, per la trasposizione in frequenza, nonché sorgenti miniaturizzate (anche un dodecaedro).

Walter Reichardt¹⁵ della Scuola di Dresda iniziò ad organizzare già dal 1947/48 studi sui modelli di sale. Con lui altri ricercatori utilizzarono scale con rapporti 1:10 e 1:20. Allo scopo di assimilare gli effetti dell'assorbimento dell'aria nel modello a quelli dell'aria ordinaria, essa veniva disidratata fino ad un'umidità relativa del 2% (in altre ricerche era sostituita anche da azoto



Fig.11 – Modello del teatro storico di Dresda: Semper Oper in scala 1:20

molto puro). Un esempio di modello accurato in scala 1:20 è quello del teatro storico Semper Oper a Dresda (Fig. 11). Nella figura è visibile in primo piano una sorgente impulsiva realizzata con un generatore elettrico di scintille. Come era stato fatto in precedenza, l'acustica della sala veniva giudicata oggettivamente in base alla struttura delle risposte all'impulso registrate nel modello con un oscilloscopio.

In occasione della riprogettazione della sala del teatro Semper Oper fu realizzata anche una testa artificiale in scala per registrazioni binaurali nel modello (Fig.12)¹⁶.

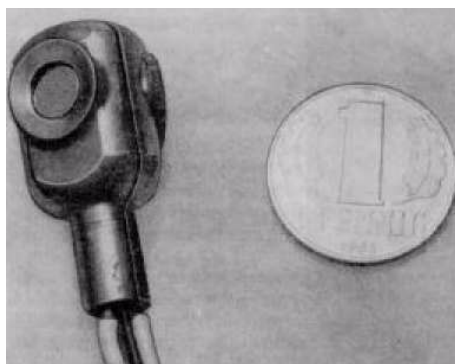


Fig.12 – Modello in scala di testa artificiale

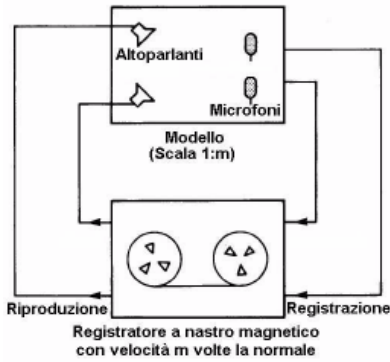


Fig. 13 – Principio della registrazione analogica in un modello (modificato da [19])

Nel 1968 la BBC (The British Broadcasting Corporation) riscontrò la necessità di impegnare risorse nella modellistica in scala e dal 1970 ha svolto studi intensivi con modelli molto dettagliati in scala 1:8¹⁷. Le applicazioni hanno riguardato preminentemente gli studi di registrazione e di monitoraggio. Furono sviluppati con attenzione particolare sistemi di registrazione analogici per la trasposizione in frequenza con l'ascolto stereofonico (Fig. 13), sorgenti che riproducevano in scala la risposta in frequenza e la direttività degli altoparlanti usati (Fig. 14) e microfoni molto miniaturizzati.

Lo scopo principale era l'ascolto fedele degli effetti acustici di scelte progettuali e di modifiche degli ambienti destinati alla produzione ed alla riproduzione della musica e della parola.

Dalla metà degli anni cinquanta non poche sale importanti sono state progettate fondando su prove sperimentali con modelli in scala di vario genere. Sono stati utilizzati modelli accurati, come nel

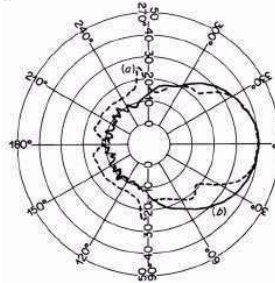
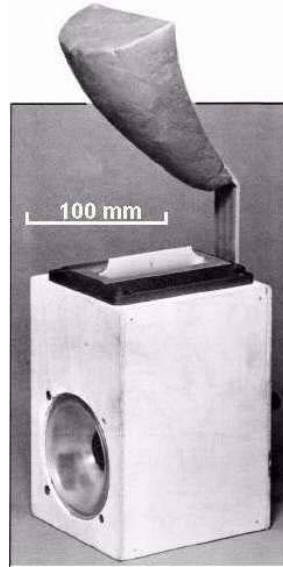


Fig. 14 – Altoparlante in scala costruito dalla BBC. Il corpo sovrastante la cassa contribuiva a realizzare in scala una direttività simile a quella degli altoparlanti monitor in uso

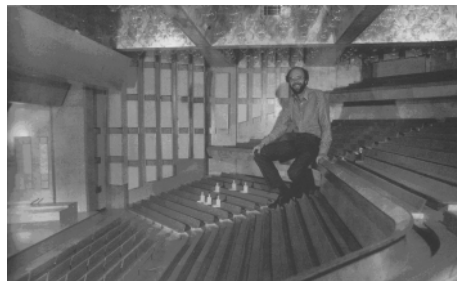


Fig. 15 – M. Barron nel modello della sala da concerto Barbican in scala 1:8

caso del Barbican a Londra per il quale la Fig. 15 mostra l'esperto Michael Barron¹⁸ nel modello acustico in scala 1:8, ma anche modelli più o meno semplificati.

In sostanza, la necessità di semplificazione era legata a più motivazioni. I modelli in scala con rapporti bassi e molto dettagliati risultavano molto costosi (talvolta il 20% del costo dell'opera), nonché ingombranti e poco maneggevoli per le modifiche durante il corso dello studio. Di fatto, necessitavano della riduzione dell'umidità dell'aria e di prove preliminari sui materiali in camere riverberanti in scala ridotta per realizzare i coefficienti di assorbimento in scala corretti. L'approfondimento delle conoscenze sull'acustica dei grandi ambienti, lo sviluppo di parametri descrittivi della qualità del suono basati sulla risposta all'impulso, che poteva essere rilevata facilmente con sorgenti costituite da generatori di scintille elettriche, la disponibilità di mezzi per l'elaborazione del segnale ed altri avanzamenti tecnici hanno consentito di giungere alla riduzione delle dimensioni dei modelli fino ad un rapporto di scala 1:50²¹. In particolare, per le sale da concerto gli aspetti più importanti erano le forme geometriche più rilevanti e gli effetti acustici degli ascoltatori. Day²² pubblicò uno studio su modelli in scala ridotta di persone sedute che bene rappresentavano sia l'assorbimento che gli effetti di diffrazione e diffusione del pubblico in una sala. Tuttavia, nei modelli meno accurati erano utilizzati pezzi di materiale poroso sagomati (lana di vetro, neoprene, etc.).

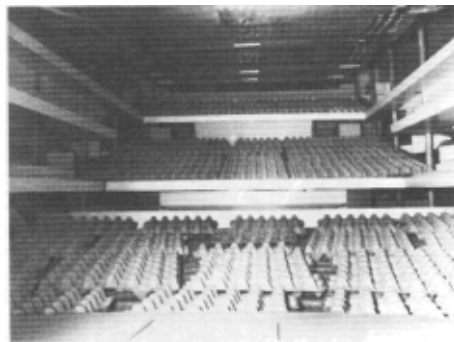


Fig. 16 – Modello di una sala in scala 1:16 in cui il pubblico era realizzato con contenitori di cartone per uova

È singolare l'esempio di Cremer¹¹ che in suo modello di sala in scala 1:16 - non molto dettagliato - trovò nei contenitori di cartone per le uova capovolti idonei rappresentanti acustici del pubblico (Fig. 16).

Spesso la modalità di indagine con questi modelli non del tutto accurati era l'aggiustamento del solo tempo di riverberazione ai valori di progetto alle frequenze medie (scalati) senza curare la disidratazione dell'aria. In certi casi la registrazione delle risposte binaurali con testa artificiale miniaturizzata, ricondotte alla scala reale e convolute con suoni anecoici, consentiva anche delle auralizzazioni approssimate come avveniva in precedenza con la trasposizione in frequenza analogica. La Fig. 17 riporta il modello di una sala in scala 1:50. L'interno del modello è molto semplice in quanto lo scopo era lo studio della prima parte della risposta all'impulso in relazione alle prime riflessioni laterali²⁰.

Ancora oggi i modelli acustici in scala ridotta sono utilizzati per ricerca e da società di consulenza importanti. Tutta-

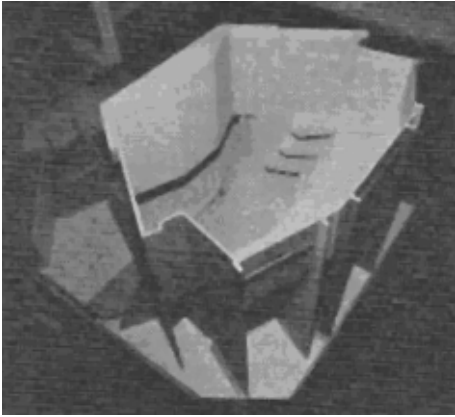


Fig.17 – Modello di una sala in scala 1:50

via, fatta eccezione per i trasduttori, tutte le operazioni sui segnali sono effettuate nel dominio del digitale. Prendendo a prestito le locuzioni introdotte da Burd²⁰, Rindel¹⁰ divide i modelli acustici in scala in tre tipi: *Technicolor*, a *Mezza Tinta* ed in *Bianco e Nero*. Con questa classificazione la Tabella 2 presenta una sintesi sulle caratteristiche di questi modelli.

Modelli al calcolatore

A partire dalla pubblicazione dei lavori sul tempo di riverberazione di Sabine sono state sviluppate formulazioni per il suono negli ambienti chiusi, basate sia su teorie statistiche sia su correlazioni empiriche, utilizzabili per applicazioni ingegneristiche senza la necessità di mezzi di calcolo molto impegnativi. L'applicazione era ed è limitata ad ambienti non sproporzionati nella regione delle frequenze alte (dimensione geometrica \gg lunghezza d'onda).

La potenza descrittiva della teoria ondulatoria per il suono negli ambienti

chiusi raggiunge un buon grado di maturazione teorico-sperimentale nella prima metà del novecento. Tuttavia, le soluzioni analitiche dell'equazione delle onde erano ristrette a pochi casi alquanto idealizzati. L'avvento diffuso dei mezzi di calcolo automatico ha permesso lo sviluppo di procedure di calcolo numerico in grado di risolvere l'equazione delle onde per problemi ingegneristici inerenti al campo sonoro in un ambiente chiuso. Le modellazioni con metodi quali gli Elementi Finiti (FEM), gli Elementi di Contorno (BEM) e le Differenze Finite (FDM) sono impiegate per ambienti chiusi di dimensioni piccole o paragonabili con la lunghezza d'onda. Inconvenienti legati alla limitazione della potenza di calcolo disponibile, alla difficoltà della descrizione di certi particolari geometrici e del comportamento acustico dei materiali ne impediscono l'uso per auditori ed altri ambienti di dimensioni grandi ancora oggi.

Idealmente, lo scopo ottimale sarebbe la descrizione del campo sonoro in termini di conoscenza della risposta all'impulso, ovvero della risposta in frequenza, per ogni coppia sorgente/ricevitore all'interno dello spazio chiuso. La risposta all'impulso permette di ricavare i descrittori della qualità del suono in una sala per cui tutti i metodi al calcolatore, per quanto approssimati, tendono alla valutazione di questa informazione che caratterizza la trasmissione del suono tra una sorgente ed un ricevitore.

Il preludio all'uso del calcolatore per la progettazione acustica di sale ed auditori è ravvisabile nei lavori di M.

	Modelli Technicolor Sorgente elettrodinamica	Modelli Technicolor Sorgente impulsiva	Modelli a mezza tinta	Modelli in bianco e nero
Anno della prima pubblicazione	1934	1956	1968	1979
Rapporto di scala tipico	1:8 - 1:20	1:8 - 1:20	1:8 - 1:20	1:50
Tipo di sorgente	Altoparlante	Scintilla elettrica	Scintilla elettrica	Scintilla elettrica
Direttività della sorgente	X	(X)		
Ricevitore: microfono	X	X	X	X
Ricevitore: testa artificiale mini	X	X	(X)	
Assorbimento delle superfici	X	X	(X)	((X))
Riflessioni iniziali	X	X	X	X
Effetti di diffusione	X	X	X	X
Effetti di diffrazione	X	X	X	X
Risposta all'impulso	X	X	X	X
Tempo di riverberazione	X	X	(X)	(X)
Parametri ISO 3382	X	X	X	(X)
Auralizzazione	X	X	(X)	
Tempo per la costruzione	12-24 settimane	12-24 settimane	8-20 settimane	3 settimane
Tempo per le misure	4-8 settimane	4-8 settimane	3-8 settimane	1 settimana

Tab. 2 – Caratteristiche dei modelli acustici in scala ridotta (Da Rindel modificata)

Schroeder e colleghi²¹ presso i Laboratori della Bell Telephone negli Stati Uniti e di Krokstad, Ström e Sördsdal²² in Norvegia. I metodi utilizzati sono basati sui presupposti dell'acustica geometrica che non tiene conto dei fenomeni legati alla natura ondosa del suono ma solo dell'energia. I metodi geometrici del tracciamento dei raggi e delle immagini sono stati usati da lungo tempo nella loro versione manuale 2D operando su piante e sezioni di una sala con matita e tecnigrafo per lo studio delle riflessioni iniziali limitatamente ai piani disponibili.

Metodo del tracciamento dei raggi e delle particelle di energia

Il concetto del tracciamento dei raggi nella sua versione fondamentale è alquanto semplice. Come è rappresenta-

to nella Fig. 18²¹ in 2D l'energia emessa da una sorgente puntiforme è inviata lungo un numero finito di direzioni. L'energia assegnata a ciascuna direzione viaggia alla velocità del suono nel mezzo lungo traiettorie rettilinee (raggi) ed interagisce con i confini dell'ambiente. Ad ogni interazione il corredo di energia (detto anche particella di energia) è depauperato in ragione del coefficiente di assorbimento della superficie impattata. L'energia residua è rinviata lungo la direzione speculare ed il processo dello specifico raggio continua fino a quando la sua energia non è giudicata trascurabile. Durante il percorso a tratti rettilinei l'energia è decrementata a causa dell'assorbimento dell'aria. La stessa vicenda è seguita da tutti gli altri raggi emessi.

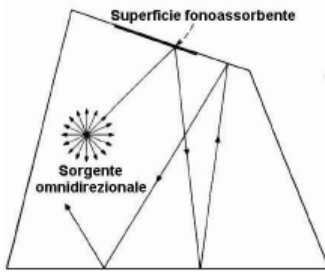


Fig. 18 – Principio del tracciamento dei raggi (particelle di suono)

La Fig. 19 mostra il decadimento nel tempo del livello dell'energia di due raggi (gradinate) e quello dell'energia media dei trecento raggi emessi complessivamente dalla sorgente.

La prima versione tridimensionale di una procedura di tracciamento dei raggi utile per la progettazione acustica di una sala fu pubblicata da Krokstad, Ström e Sörnsdal²². La sala in studio era modellata con poligoni piani connessi in modo da approssimare la geometria delle superfici di confine dell'aria interna. Utilizzando relazioni classiche della geometria analitica venivano simulati i processi prima accennati: la sorgente che emetteva un grande numero di raggi prefissato, i raggi che erano riflessi specularmente quando intercettavano una

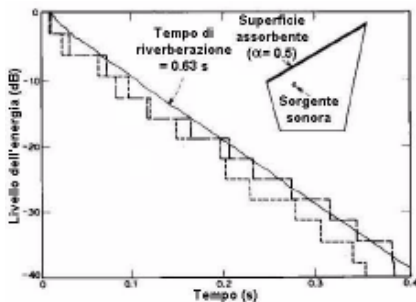


Fig.19 – Decadimento del livello dell'energia delle particelle

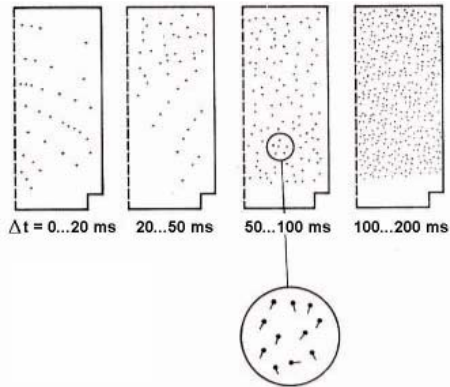


Fig.20 – Tracce dei raggi sulla superficie del pubblico in intervalli di tempo consecutivi

faccia del confine e la raccolta dell'energia sui piani occupati dal pubblico. La Fig. 20²² mostra un esempio grafico dei risultati del tracciamento dei raggi nella metà della pianta di una sala pressoché rettangolare. I punti rappresentano gli impatti sulla superficie occupata dal pubblico in determinati intervalli di tempo rispetto all'istante di attivazione della sorgente. Nell'ingrandimento sono riconoscibili anche le proiezioni delle direzioni secondo le quali l'energia del raggio giunge sul piano dell'uditorio. L'ordinamento temporale dell'energia su una certa area consentiva di visualizzare anche una forma grossolana di ecogramma energetico locale (idealmente corrisponde al quadrato della risposta all'impulso).

La discretizzazione della sorgente con un numero di raggi finito comporta che il ricevitore non può essere un punto. Una superficie opportuna può rivelare e consentire la registrazione della sequenza temporale dell'energia ricevuta. Per ottenere informazioni più preci-

se sull'ecogramma sono stati introdotte successivamente superfici e volumi di "cattura" dell'energia dei raggi in progresso. Erano ottenuti ecogrammi più accurati che permettevano una migliore valutazione di descrittori della qualità del suono^{23, 24}.

Metodo delle sorgenti immagine

Questo metodo è basato sul fatto che la riflessione da un piano può essere costruita considerando l'immagine speculare della sorgente reale nel piano. Per un ambiente a forma di parallelepipedo è facile costruire tutte le immagini di una sorgente puntiforme interna (teoricamente un numero infinito) fino ad un ordine di riflessione desiderato^{25, 26}. Per un ambiente di forma qualsiasi²⁷ la costruzione delle immagini è molto laboriosa in quanto specchiando la sorgente reale in tutte le giaciture delle facce piane costituenti l'involucro della sala fino all'ordine desiderato per la durata scelta dell'ecogramma, non tutte le sorgenti immagine rappresentano cammini effettivi di raggi sonori che interessano un determinato ricevitore. La Fig. 21 riporta un esempio elementare di applicazione del metodo in parola. Si nota che l'immagine del primo ordine S_p non vede l'ascoltatore A, tuttavia è valida in quanto genera l'immagine del secondo ordine S_{p-s} che corrisponde ad una riflessione doppia che raggiunge l'ascoltatore. Il processo di scarto delle immagini non valide è oneroso. Una volta determinata la costellazione di immagini valide per la lunghezza della risposta desiderata, la sala vera e propria non ha più un ruolo

nel calcolo. Congiungendo una sorgente immagine valida con il ricevitore si determina il ritardo e l'ampiezza di una riflessione che va a costituire un contributo all'ecogramma energetico. Un vantaggio del metodo delle immagini rispetto al tracciamento dei raggi è che, trovate le immagini valide, è possibile valutare precisamente la trasmissione tra un punto sorgente ed un punto ricevitore.

Metodo del tracciamento dei coni e delle piramidi

Il tracciamento dei coni è un'alternativa all'uso di volumi e superfici per la registrazione del passaggio dei raggi. Il ricevitore è considerato puntiforme ed è investito dalla base del cono il cui asse è la traiettoria del raggio (Fig.22)³⁰.

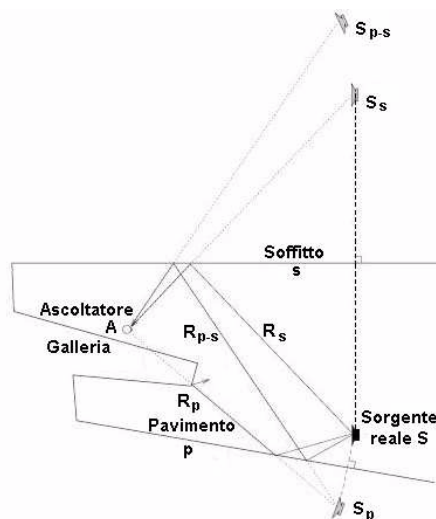


Fig.21 – Esempio di tracciamento delle immagini. La retta congiungente un'immagine valida con il ricevitore equivale alla traiettoria di un raggio

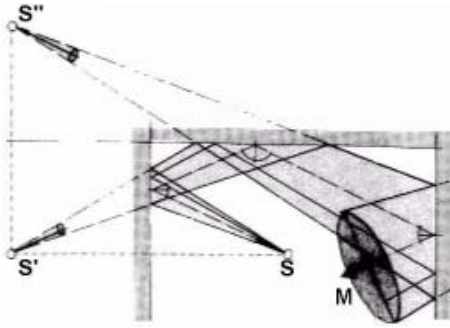


Fig. 22 – Tracciamento dei coni

Il metodo ha il problema della sovrapposizione di coni adiacenti. Questo problema specifico è risolto con coni a base triangolare³¹ (piramidi), tuttavia è difficile ottenere risultati affidabili solo con questo metodo.

Modelli ibridi

All'avanzare degli sviluppi nel settore sono state evidenziate diverse carenze dei metodi appena menzionati. Gli aspetti "migliori" dei metodi di base sono stati combinati²⁹⁻³². Il comportamento speculare delle superfici da solo è apparso insufficiente a rendere la complessità dell'interazione energetica. Nella realtà il suono rinviato è un misto di contributo secondo la legge di Snell e di contributi di suono diffuso rinviato lungo direzioni molteplici in dipendenza della natura della superficie, della frequenza e dell'angolo di incidenza. Varie tecniche sono state proposte per integrare

questo aspetto nelle procedure di calcolo. La diffrazione da bordo è pur essa apparsa una necessità per la previsione più accurata delle risposte in una sala. Il tasso di sviluppo e delle proposte in questa materia cresce a valanga ed è impossibile riportare qui qualche dettaglio. La tematica interessa non solo la progettazione acustica degli auditori ma presenta sviluppi incrociati anche con la realtà virtuale acustica che richiede un compromesso tra l'accuratezza dei risultati e la velocità del calcolo³³. La Tabella 3 mostra un tentativo di inquadramento storico, delle caratteristiche e delle prestazioni dei modelli di calcolo. La scala qualitativa dei tempi di lavoro a cinque gradi va da 1 (molto veloce) a 5 (molto lento).

Conclusione

Questo resoconto molto sintetico porge un'idea dell'evoluzione nell'ultimo secolo dei mezzi per la previsione dell'acustica di grandi sale per pubblico spettacolo dove è importante la qualità del suono. Gli approcci attuali fondano prevalentemente sull'uso del calcolatore. Dal disegno digitale giungono a parametri descrittivi della qualità del suono nonché ad auralizzazioni realistiche. Date le diversità di impostazione di procedure diverse è indispensabile la competenza e la sensibilità del progettista nel loro uso.

¹ M. FORSYTH, *Edifici per la musica*, Zanichelli, Bologna, 1991, p. 174.

² W.C. SABINE, *Collected Papers on Acoustics*. Edizione Dover, New York, 1964.

³ W.C. SABINE, *The American Architect*, Vol.104, 1913, p. 257, riportato nel riferimento 2, p. 180.

	Equazioni basate sulla statistica	Equazione delle onde	Sorgenti immagine	Tracciamento delle particelle	Tracciamento dei raggi	Tracciamento dei coni	Modelli ibridi
	1900	1972	1970	1968	1986	1989	
Prima pubblicazione							
Frequenze basse		X	(X)				
Frequenze alte	X		X	X	X	X	X
Sorgente puntiforme		X	X	X	X	X	X
Direttività sorgente			X		X	X	X
Punto ricevitore		X	X		(X)	X	X
Griglia di ricevitori		X			X	X	X
Distribuzione suono					X	X	X
Media nel volume	X			X			
Assorb. superfici	X	X	X	X	X	X	X
Riflessioni iniziali			X		X	X	X
Tracciamento eco 3D			X		(X)	(X)	X
Effetti scattering				X	X	X	X
Effetti diffrazione		X					X
Spazi accoppiati		X		X	X	X	X
Risposta all'impulso			(X)		(X)	(X)	X
Tempo di riverberaz.	X			X	(X)	(X)	X
Parametri ISO 3382					(X)	(X)	X
Auralizzazione			(X)		X	X	X
Tempo modello (1-5)	1	5	3	3	3	3	3
Tempo calcolo (1-5)	1	5	5	1	4	4	2

Tab. 3 – Caratteristiche dei modelli di calcolo (Da Rindel modificata)

⁴ T. NEUMANN and H. ERMERT, *Schlieren visualization of ultrasonic wave fields with high spatial resolution*, Ultrasonics, Vol. 44, Supplement 1, 22 December 2006, pp. e1561-e1566.

⁵ J. ENGL, *Raum und Bauakustik*, Akademische Verlagsgesellschaft, Leipzig, 1939.

⁶ A.H. DAVIS and G.W.C. KAYE, *The Acoustics of Buildings*, Bell, London, 1927.

⁷ T. SATOW, *Acoustics of Auditorium Ascertained by Optical Treatment in Models*, World Engineering Congress, Paper N. 118, 1929.

⁸ R. VERMEULEN and J. DE BOER, Philips Technical Review, Vol. 1, 1936, p. 46.

⁹ L. CREMER and H. A. MÜLLER Translated by T. J. SCHULTZ, *Principles and Applications of Room Acoustics Vol. 1*, Applied Science Publishers, London and New York, 1982, Chap. 1.7.

¹⁰ J. H. RINDEL, *Modelling in auditorium acoustics – From ripple tank and scale models to computer simulations*, Proc. Forum Acusticum, Sevilla, Sept. 2002, paper KL-04.

¹¹ J.D. POLACK, A.H. MARSHALL and G. DODD, *Digital evaluation of the acoustics of small models: The MIDAS Package*, J. Acoust Soc. Am., Vol.85, N.1, Jan, 1989, pp. 185 – 193.

¹² F. SPANDÖCK, *Akustische Modellversuche*, Ann. Phys., vol.20 (5) (1934) pp. 345 - 360.

¹³ V.L. JORDAN, *Tesi di Dottorato*, Copenhagen 1941 citato in [10].

¹⁴ V.L. JORDAN, *Acoustical Design Considerations of the Sydney Opera House*, Journal and Proceedings of the Royal Society of New South Wales, vol. 106 pts 1-2, 1973, pp. 33 - 53

¹⁵ W. REICHARDT, *Die Akustik des Zuschauerraumes der Staatsoper Berlin Unter den Linden*, Hochfrequenztechnik und Elektroakustik, vol. 64, 1956, p. 134.

¹⁶ W. FASOLD, E. SONNTAG AND H. WINKLER, *Bau und Raumakustik*, Verlag für Bauwesen, Berlin, 1987.

- ¹⁷ C. D. MATHERS, *Acoustic Scaling: The Development of improved Instrumentation*, BBC Report BBC RD August 1985 (PH 272).
- ¹⁸ M. BARRON and C.B. CHINOY, *1:50 Scale Acoustic Models for Objective Testing of Auditoria*, *Applied Acoustics*, vol. 12, 1979, pp.361-375.
- ¹⁹ B.F. DAY, *A tenth-scale model audience*, *Applied Acoustics*. Vol. 1, 1968, pp.121-135.
- ²⁰ A.N. BURD, *Acoustic Modelling-Design Tool or Research Project?* in “Auditorium Acoustics” R. Mackenzie (ed.), *Applied Science Publishers, London*, 1975, pp. 73 – 85.
- ²¹ M.R. SCHROEDER, *Digital Simulation of Transmission in Reverberant Spaces*, *J. Acoust. Soc. Am.*, Vol.47, N.1, 1970, pp. 424-431.
- ²² A. KROKSTAD, S. STRÖM and S. SÖRSDAL, *Calculating the Acoustical Room Response by the Use of a Ray Tracing Technique*, *J. Sound and Vibration* , vol. 8 (1), 1968, pp. 118-125.
- ²³ U. STEPHENSON, *Eine Schallteilchen-Computersimulation zur Berechnung der für die Hörsamkeit in Konzertsälen massgebenden Parameter*, *Acustica*, vol. 59, 1985, pp. 1-20.
- ²⁴ P.A. FORSBERG, *Fully Discrete Ray Tracing*, *Applied Acoustics*, vol.18, 1985, p. 393-397.
- ²⁵ B.M. GIBBS and D.K. JONES, *A Simple Image Method for Calculating the Distribution of Sound Pressure Levels within an Enclosure*, *Acustica*, vol. 26, 1972, pp. 24-32.
- ²⁶ J. ALLEN and D.A. BERKLEY, *Image method for efficiently simulating small-room acoustics*. *J. Acoust. Soc. Am.*, vol. 65, 1979, pp. 943-950.
- ²⁷ J. BORISH, *Extension of the image model to arbitrary polyhedra*, *J. Acoust. Soc. Am.*, vol. 75, 1984, pp. 1827-1836.
- ²⁸ J.P. VIAN and D. VAN MAERCKE. *Calculation of the room impulse response using a ray-tracing method*, *Proceedings of 12th ICA Symposium, Vancouver*, 1986, pp. 74-78.
- ²⁹ T. LEWERS, *A Combined Beam Tracing and Radiant Exchange Computer Model of Room Acoustics*, *Applied Acoustics*, vol. 38, 1993, pp.161-178.
- ³⁰ M. VORLANDER, *Simulation of the transient and steady- state sound propagation in rooms using a new combined ray-tracing/image-source algorithm*, *J. Acoust. Soc. Am.*, vol. 86, 1989. pp. 172–178.
- ³¹ Y.W. LAM, *A comparison of three diffuse reflection modelling methods used in room acoustics computer models*, *J. Acoust. Soc. Am.*, vol. 100 (4) Pt.1, 1996, pp. 2181- 2192.
- ³² M.J. HOWHARTH, Y.W. LAM, *An assessment of the accuracy of hybrid room acoustics model with surface diffusion facility*, *Applied Acoustics*, vol. 60, 2000, pp. 237 – 251.
- ³³ T. LENZ, D. SCHRÖDER, M. VORLANDER, I. ASSENMACHER, *Virtual Reality System with Integrated Sound Field Simulation and Reproduction*, *EURASIP Journal on Advances in Signal Processing*, Volume 2007, Article ID 70540, 19 pages.