

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:

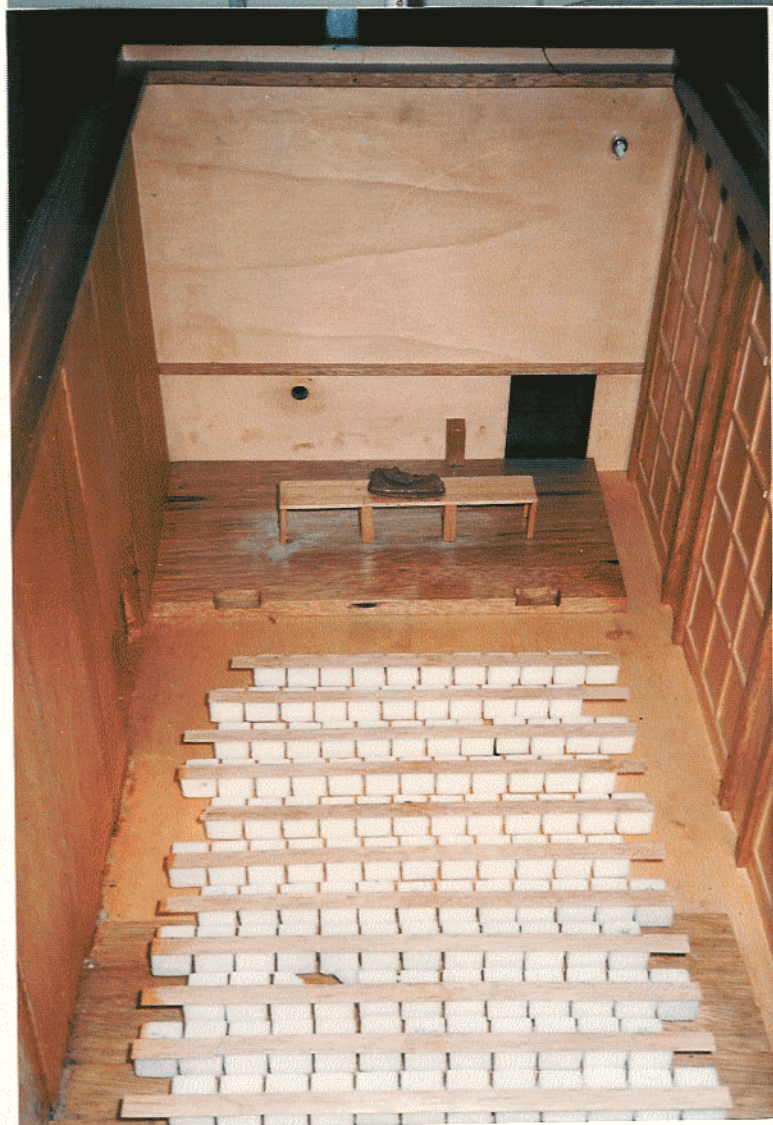
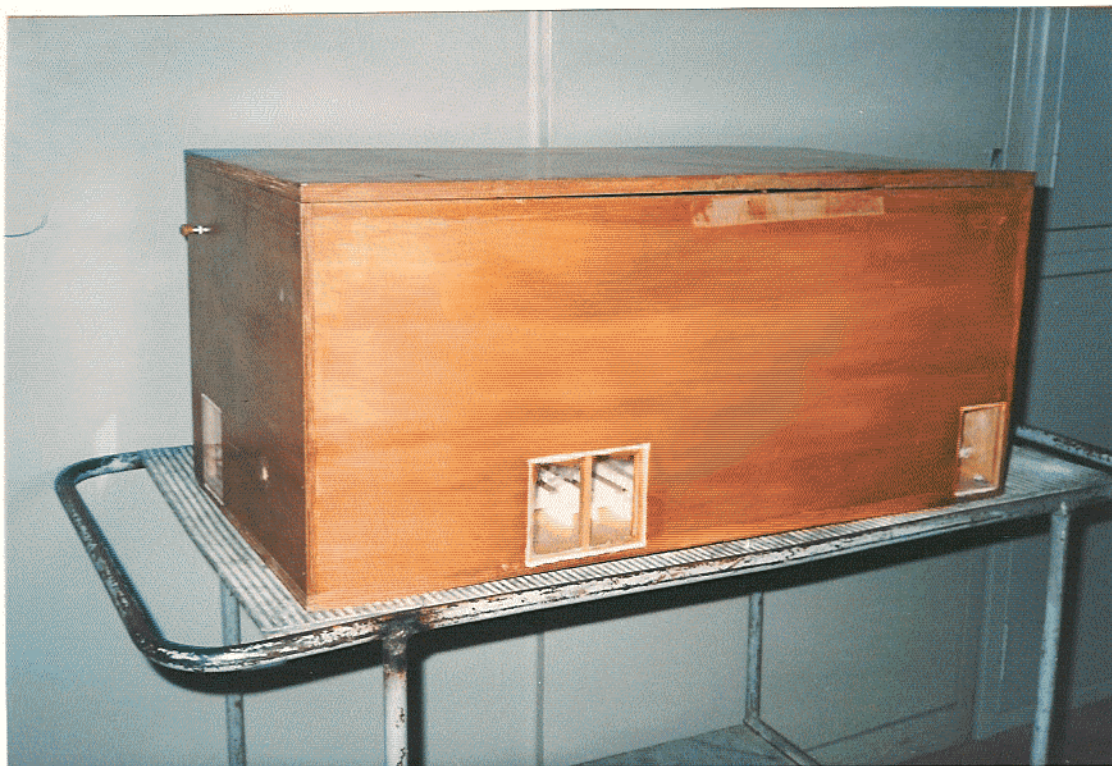
$$\frac{\omega L}{c_0} = \text{cost} \quad \frac{\omega L}{c_0 Z^*} = \text{cost} \quad (3.5)$$

La prima condizione sancisce la inversa proporzionalità 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 possibilità di realizzare modelli minuscoli di ambienti enormi, poiché così 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 velocità 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 rinviaa 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 $(N+1)$.

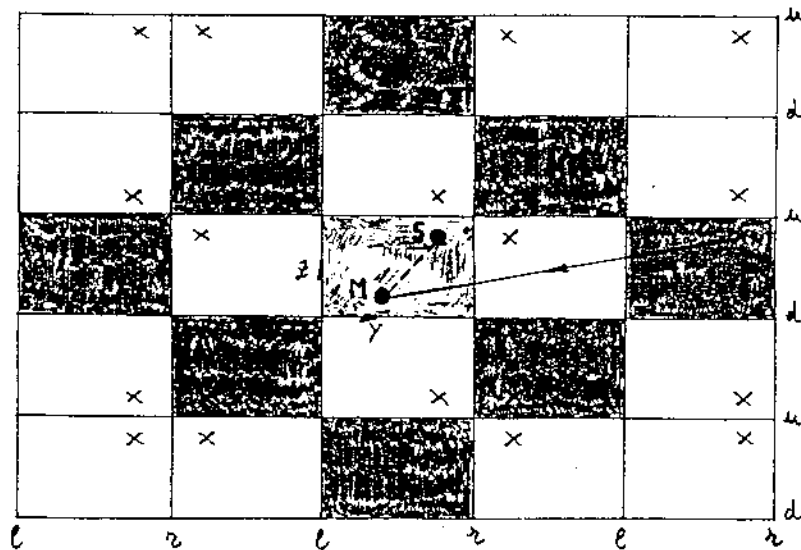


Fig. 3.5: Sorgenti virtuali generate da una camera rettangolare.

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 é puntiforme, e pertanto i risultati dipendono dalla estensione della superficie ricevente S. La scelta della dimensione e forma piú opportune per questa superficie va perciò fatta di volta in volta, e spesso procedendo per tentativi.

Altro inconveniente é poi il tempo di calcolo, che é 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 é elevata, e l' utilizzo di grandi calcolatori é 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 piú 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.