

PROGETTO FINALIZZATO EDILIZIA

**MANUALE
SULLA QUALITA' FISICO-TECNICA
DELL'AMBIENTE COSTRUITO**

VOLUME II: SIMULAZIONE

Responsabile scientifico: M. Filippi (Torino)

Coordinatore redazionale: V. Corrado (Torino)

**C.III SIMULAZIONE
DELL'AMBIENTE ACUSTICO
CON SORGENTI SONORE INTERNE**

Coordinatore: A. Cocchi (Bologna)
Autori: E. Cirillo (Bari)
A. Farina (Parma)
M. Garai (Bologna)
G. Semprini (Bologna)

C.III SIMULAZIONE DELL'AMBIENTE ACUSTICO CON SORGENTI SONORE INTERNE

1 INTRODUZIONE

- 1.1 Generalità
- 1.2 Requisiti e parametri nei luoghi di lavoro
- 1.3 Requisiti e parametri negli spazi abitati
- 1.4 Requisiti e parametri nei luoghi per spettacolo
 - 1.4.1 La risposta all'impulso
 - 1.4.2 Locali per l'ascolto della parola
 - 1.4.3 Locali per l'ascolto della musica

2 ELEMENTI COSTRUTTIVI CON VALENZA ACUSTICA

- 2.1 Impostazione del problema
- 2.2 Interfaccia aria-solido
 - 2.2.1 Incidenza normale
 - 2.2.2 Incidenza obliqua
- 2.3 Superfici speculari
- 2.4 Superfici diffondenti
- 2.5 Superfici solo parzialmente fonoisolanti
- 2.6 Assorbimento nell'aria

3 PROCEDURE DI CALCOLO

- 3.1 Introduzione ai modelli numerici
- 3.2 L'approssimazione sul dominio: cenni al metodo degli elementi finiti
- 3.3 L'approssimazione geometrica
- 3.4 Acustica statistica
- 3.5 Sorgenti virtuali
 - 3.5.1 Caratteristiche del modello
 - 3.5.2 Un fenomeno tipicamente ondulatorio: la diffusione
 - 3.5.3 L'algoritmo di calcolo
 - 3.5.4 Efficienza del modello
- 3.6 Ray tracing
 - 3.6.1 Caratteristiche del modello
 - 3.6.2 Un fenomeno tipicamente ondulatorio: la diffusione
 - 3.6.3 L'algoritmo di calcolo
 - 3.6.4 Efficienza del modello
- 3.7 Confronto tra sorgenti virtuali e ray tracing
 - 3.7.1 Confronto di tipo qualitativo
 - 3.7.2 Confronto quantitativo
- 3.8 Modelli misti
 - 3.8.1 Sorgenti virtuali modificato
 - 3.8.2 Raggi sonori per la ricerca delle sorgenti virtuali
 - 3.8.3 Fasci divergenti
 - 3.8.4 Il modello ibrido dell'Università di Lyngby

4 MODELLI IN SCALA

- 4.1 Vantaggi e limiti dei modelli in scala
- 4.2 Metodo ottico dei raggi luminosi
- 4.3 Metodo delle onde sulla superficie di un liquido
- 4.4 Metodo ottico Schlieren o strioscopico
- 4.5 Metodo dei modelli acustici in scala
 - 4.5.1 Generalità
 - 4.5.2 Criteri di similitudine
 - 4.5.3 Scelta del rapporto di scala
 - 4.5.4 Strumentazione per modelli acustici in scala
 - 4.5.5 Ripetibilità e riproducibilità
- 4.6 Tecniche miste

5 LINEE GUIDA PER LA PROGETTAZIONE

- 5.1 Introduzione
- 5.2 La progettazione acusticamente orientata
- 5.3 Il processo di progettazione assistita
- 5.4 Utilizzo di modelli numerici
- 5.5 Utilizzo di modelli fisici

6 CODICI DI CALCOLO DISPONIBILI

- 6.1 D1
- 6.2 dBRay
- 6.3 RaysCad +
- 6.4 Modeler
- 6.5 Epidaure
- 6.6 Raynoise
- 6.7 Ramsete
- 6.8 Odeon

7 ESEMPIO DI APPLICAZIONE

- 7.1 Progetto acustico dell'allestimento della ex-chiesa di S.Domenico in Foligno mediante simulazioni al computer
- 7.2 Taratura del modello matematico
- 7.3 Analisi delle possibili configurazioni
- 7.4 Valutazioni su base temporale
 - 7.4.1 Caso "A" (ricevitori 20 e 25)
 - 7.4.2 Caso "B" (ricevitori 4 e 11)
 - 7.4.3 Caso "C" (ricevitori 11 e 22)
 - 7.4.4 Caso "D" (ricevitori 14 e 22)
 - 7.4.5 Caso "E" (ricevitori 14 e 22)
 - 7.4.6 Confronto finale tra i tempi di riverberazione delle cinque ipotesi studiate
- 7.5 Considerazioni conclusive

8 BIBLIOGRAFIA

1 INTRODUZIONE

1.1 Generalità

Allo stato attuale delle conoscenze, non è quasi mai possibile o conveniente prevedere completamente la qualità acustica di uno stabilimento industriale, di un appartamento, di un auditorium, di una sala da concerto o di una sala a vocazione polivalente, partendo da considerazioni teoriche. Infatti nella pratica la complessità dei fenomeni fisici in gioco sconsiglia un approccio analitico diretto. Per questo sono stati sviluppati nel corso del tempo vari sistemi alternativi, che vanno da metodi semplificati di stima di alcuni parametri all'uso di modelli in scala; tuttavia, l'alternativa più potente, flessibile ed esauriente è senza dubbio quella della simulazione numerica.

1.2 Requisiti e parametri nei luoghi di lavoro

Alla luce dei più recenti provvedimenti legislativi e normativi (D.Lgs. 277/91, UNI 9432), si può affermare che in ambiente di lavoro lo scopo principale di un metodo previsionale è quello di stimare con sufficiente approssimazione tre parametri principali:

- 1) il livello di esposizione al rumore dei lavoratori (LEP_d o LEP_w);
- 2) il livello di picco del rumore al quale sono esposti i lavoratori (L_{peak});
- 3) il livello equivalente caratteristico delle varie zone del luogo di lavoro ($L_{Aeq,T}$).

I valori limite di soglia del livello di esposizione quotidiana, o settimanale, al rumore e del livello di pressione sonora di picco sono stabiliti dalle competenti Autorità dello Stato. Attualmente vigono i limiti massimi di 90 dB(A) per il LEP e di 140 dB per l' L_{peak} (D.Lgs. 277/91).

Il livello di esposizione personale quotidiana al rumore di ogni lavoratore è definito come:

$$LEP_d = L_{Aeq, T_e} + 10 \lg \frac{T_e}{T_0} \quad [\text{dB(A)}] \quad (1.1)$$

Quindi per calcolare il LEP occorre conoscere i valori di altri due parametri:

- a) il livello sonoro continuo equivalente ponderato A del rumore:

$$L_{Aeq, T_e} = 10 \lg \left[\frac{1}{T_e} \int_0^{T_e} \left(\frac{p_A(t)}{p_0} \right)^2 dt \right] \quad [\text{dB(A)}] \quad (1.2)$$

dove: $p_0 = 20 \mu\text{Pa}$;

- b) il tempo di esposizione effettiva al rumore, T_e , che viene rapportato al periodo di riferimento $T_0 = 8 \text{ h} = 28800 \text{ s}$.

In regime stazionario, il livello equivalente si può calcolare conoscendo i valori puntuali della pressione sonora, mentre il tempo di esposizione effettiva è un dato di input che occorre conoscere per ogni lavoratore.

E' chiaro che il valore di LEP dipende in misura rilevante dagli spostamenti del lavoratore all'interno del luogo di lavoro. In fase di simulazione tale esposizione variabile viene approssimata calcolando una mappa sufficientemente dettagliata dei livelli equivalenti (1.2) stimati nei vari punti dello stabilimento; disponendo allora dei tempi di permanenza T_k di ciascun lavoratore nelle varie zone ($k = 1, \dots, K$), caratterizzate dai valori L_{Aeq, T_k} di livello equivalente, si può ricostruire il LEP_d come:

$$L_{Aeq, T_e} = 10 \lg \left[\frac{1}{T_e} \sum_{k=1}^K T_k 10^{0,1(L_{Aeq, T_k})} \right] \quad [\text{dB(A)}] \quad (1.3)$$

Tale metodo è comunque limitato ad un regime stazionario di livelli sonori. Qualora lo stabilimento sia caratterizzato da vari cicli operativi ($n = 1, \dots, N$), ciascuno di durata T_n , tali che:

$$T_e = \sum_{n=1}^N T_n \quad (1.4)$$

con livelli di rumorosità non omogenei tra loro, si provvederà alla ricostruzione dei livelli equivalenti per ogni ciclo operativo e per ogni zona nella quale il lavoratore interessato possa transitare, L_{Aeq, T_nk} , per poi sommare i vari contributi ancora con una media ponderata logaritmica del tipo della (1.3).

Qualora il livello di esposizione quotidiana LEP_d assuma valori notevolmente diversi nei vari giorni della settimana o la settimana lavorativa non sia di 5 giorni, si utilizza il livello di esposizione professionale settimanale:

$$LEP_w = 10 \lg \left[\frac{1}{5} \sum_{i=1}^m 10^{0,1(LEP_{d_i})} \right] \quad [\text{dB(A)}] \quad (1.5)$$

dove:

- $(LEP_d)_i$: valore di LEP del giorno i -esimo;
- i : indice rappresentativo della giornata lavorativa;
- m : numero delle effettive giornate lavorative settimanali.

Il livello di pressione sonora di picco L_{peak} , in dB, si intende misurato con caratteristica temporale *peak e non ponderato* (D.Lgs. 277/91). Esso è legato ad innumerevoli dettagli pratici, dipendenti dalla storia di ogni singola macchina, dal suo stato di manutenzione, dalle particolarità del pezzo in lavorazione, ecc. in maniera tale che non è possibile prevederlo con i metodi di simulazione attuali.

Infine, la mappa dei livelli equivalenti è il risultato più facilmente ottenibile con i programmi di simulazione, e di fatto deve comunque essere prodotto per poter procedere alla determinazione dei LEP_d come sopra specificato. I programmi di calcolo forniscono i valori di $L_{Aeq, T}$ nei nodi di un reticolo di punti sovrapposto alla mappa del luogo di lavoro, valori che vengono in genere passati ad una routine di interpolazione che genera le curve isolivello.

1.3 Requisiti e parametri negli spazi abitati

In materia di acustica edilizia è ormai consolidata la tendenza ad emanare normativa di tipo esigenziale, vale a dire incentrata sui requisiti giudicati importanti dagli esseri umani che occupano gli spazi abitati e sui valori ottimali di tali requisiti. Questi sono correlati con le prestazioni globali dell'edificio, le quali sono a loro volta funzioni complesse delle prestazioni dei singoli componenti della struttura. Continua quindi ad avere una sua validità una normativa di tipo prestazionale, vista come base operativa di una più generale normativa esigenziale.

Non interessa a questo punto approfondire la problematica di interconnessione tra normativa esigenziale e prestazionale, alla luce anche di quanto espresso nella Direttiva CEE 89/106, per una trattazione della quale si rimanda al capitolo *Comfort acustico, sezione Normativa tecnica e legislazione*. Qui interessa solo ricordare sinteticamente che le prestazioni globali che l'edificio deve fornire, sia per quanto riguarda gli spazi di vita che quelli per il riposo, sono:

- 1) isolamento contro il rumore aereo proveniente dall'ambiente esterno;
- 2) isolamento contro il rumore aereo proveniente da un altro spazio chiuso attiguo;
- 3) isolamento contro il rumore da calpestio;
- 4) protezione contro il rumore di apparecchiature;
- 5) protezione contro il rumore riverberante eccessivo;
- 6) protezione dell'ambiente contro il rumore prodotto da sorgenti interne o associate all'opera.

Come si può vedere, tutti gli obiettivi ad eccezione del terzo riguardano la problematica del fonoisolamento, sia per via aerea che per via strutturale, per la quale si rimanda al capitolo *Simulazione dell'ambiente acustico con sorgenti sonore esterne*.

La simulazione dell'ambiente acustico con sorgenti sonore interne può invece permettere di ottimizzare le prestazioni in relazione al terzo obiettivo, cioè il controllo della riverberazione. D'altra parte, si applicano in questo caso gli stessi metodi utilizzati anche per le sale per spettacolo. Poiché per queste ultime l'argomento ha una maggiore importanza e viene trattato estesamente nei paragrafi seguenti, si rimanda senz'altro ad essi anche per quanto riguarda l'acustica degli ambienti abitati, con l'unica avvertenza di mantenere le debite proporzioni. Infatti, mentre per lo studio dei grandi ambienti chiusi (teatri, auditoria, ecc.) sono stati sviluppati descrittori e metodi di analisi estremamente sofisticati, per gli ambienti abitativi è in genere sufficiente assicurare un opportuno valore del tempo di riverberazione. Le norme tecniche assumono usualmente che in una stanza ammobiliata il tempo di riverberazione sia dell'ordine di $T_0 = 0,5$ s, indipendentemente dalla frequenza.

1.4 Requisiti e parametri nei luoghi per spettacolo

L'acustica delle grandi sale è stata ed è tuttora un argomento in grado di stimolare studi e discussioni. W.C. Sabine (1924), colui che è ritenuto il fondatore dell'acustica degli ambienti chiusi in termini scientifici, già agli inizi del novecento definì chiaramente i requisiti fondamentali per ottenere una buona acustica in un auditorium qualsiasi:

"... è necessario 1) che il suono sia sufficientemente forte, 2) che le componenti contemporanee di un suono complesso mantengano un rapporto appropriato tra le loro intensità e 3) che suoni successivi nella loro rapida articolazione, sia che si tratti di parlato, sia che si tratti di musica, siano chiari e distinti, liberi da sovrapposizione mutua e da rumori estranei. Queste sono le condizioni necessarie, nonché del tutto sufficienti, per una buona acustica".

Per esprimere questi requisiti intuitivi in termini oggettivamente misurabili è risultato necessario sviluppare il ragguardevole apparato teorico esposto qui di seguito.

1.4.1 La risposta all'impulso

Il contenuto informativo necessario e sufficiente per una completa caratterizzazione dell'acustica di una sala è racchiuso nella sua risposta all'impulso, che è una funzione della posizione all'interno dell'ambiente e che può essere misurata mediante apparecchiature elettroniche o anche simulata con sufficiente approssimazione al calcolatore (Barron 1984), (Ando 1985).

La risposta all'impulso è, in generale, una funzione che caratterizza nel dominio del tempo il comportamento di un sistema lineare; nel presente caso si assume come sistema il comportamento acustico del locale fra sorgente e punto d'ascolto.

Con riferimento allo schema di fig. 1.1, sia $a(t)$ il segnale emesso dalla sorgente; il rettangolo rappresenta il sistema fisico (l'ambiente) e $b(t)$ è il risultato delle modifiche prodotte dal sistema sul segnale in ingresso (il segnale raccolto dall'ascoltatore). La risposta all'impulso $h(t)$ è la risposta del sistema nell'ipotesi che la sorgente sonora generi un segnale $a(t)$ conforme alla cosiddetta *funzione delta di Dirac*:

$$\delta(t) = 0 \text{ per } t \neq 0 \quad \int_{-\infty}^{+\infty} \delta(t) dt = 1 \quad (1.6)$$

Qualche che sia il segnale $a(t)$, se è nota la funzione $h(t)$, è sempre possibile determinare il valore della corrispondente uscita $b(t)$ tramite il cosiddetto *integrale di convoluzione*, rappresentato dall'espressione:

$$b(t) = a(t) \cdot h(t) = \int_{-\infty}^{+\infty} a(\tau) h(t - \tau) d\tau \quad (1.7)$$

La *risposta in frequenza* $H(f)$ è la trasformata di Fourier di $h(t)$. Si dimostra che nel dominio della frequenza la convoluzione (1.7) si traduce in un semplice prodotto fra gli spettri delle funzioni di partenza:

$$B(f) = A(f) \cdot H(f) \quad (1.9)$$

In base a queste considerazioni, tutta la problematica della simulazione acustica può essere ricondotta alla determinazione della risposta all'impulso: quando $a(t)$ è la pressione sonora alla sorgente, l'uscita $b(t)$ è la pressione sonora al ricevitore, nota la quale si possono calcolare i parametri acustici di interesse, come di seguito descritto.

1.4.2 Locali per l'ascolto della parola

1.4.2.1 Test fonetici di intelligibilità

Esistono diversi metodi per valutare le qualità di ascolto del parlato in una sala; in linea di principio, la metodologia di riferimento è quella che consiste nel realizzare dei *test di intelligibilità* (espressa in percentuale) con gruppi diversi di oratori ed ascoltatori, utilizzando frasi, parole in rima e sillabe foneticamente bilanciate. Si tratta tuttavia di un sistema di valutazione di tipo soggettivo, valido a rigore solo su base statistica e, soprattutto, estremamente lento ed oneroso (Bradley 1986). Non meraviglia pertanto il fatto che con il tempo siano state sviluppate tecniche alternative che permettono di stimare l'intelligibilità mediante altri parametri ausiliari oggettivamente misurabili.

1.4.2.2 Indice di articolazione

Le prime tecniche di tipo oggettivo si basavano sull'individuazione di un parametro di valutazione ausiliario, facilmente correlabile con l'intelligibilità: l'*indice di articolazione* (*articulation index AI*).

Per esempio, secondo il metodo elaborato da Kryter (1962), il calcolo dell'indice di articolazione viene realizzato in quattro fasi:

- 1) si determina il valore del rapporto segnale-disturbo $(S/N)_i$ in dB per ogni banda d'ottava da 125 Hz a 8 kHz;
- 2) i vari valori di $(S/N)_i$ vengono eventualmente troncati per rientrare nell'intervallo $0 \leq (S/N)_i \leq 30$ dB;
- 3) ciascuno di questi valori viene poi moltiplicato per una opportuna funzione peso w_i (variabile con la frequenza, ed eventualmente anche con il tempo di riverberazione e con la visibilità tra sorgente e ricevitore);
- 4) infine, i valori pesati $(S/N)_i w_i$ vengono sommati, ottenendo un valore di AI variabile tra 0 ed 1 (fig. 1.2):

$$AI = \sum_{i=1}^n (S/N)_i w_i \quad (1.10)$$

1.4.2.3 Funzione di trasferimento della modulazione

La principale tecnica di valutazione dell'intelligibilità fa riferimento ad un modello lineare della trasmissione dell'informazione tra sorgente e ricevitore, secondo il quale il parlato continuo viene sinteticamente ricondotto ad una trasmissione a modulazione d'ampiezza (Houtgast e Steeneken 1973).

Da un punto di vista anatomico-funzionale la modulazione interverrebbe quando lo spettro a banda larga creato dal tratto vocale viene trasformato in fonemi dall'azione dell'apparato boccale: tale fenomeno ha luogo su di un campo di frequenze di modulazione che va da 0 a 12,5_Hz circa.

Una sala in grado di mantenere invariate le caratteristiche iniziali di modulazione di un segnale che viene trasferito attraverso di essa è una buona sala per l'ascolto del parlato. Per una generica coppia oratore-ascoltatore l'ambiente, indipendentemente da forma e dimensioni, risulta quindi essere un sistema lineare passivo di trasmissione del suono. Tuttavia, in genere il segnale ricevuto non è mai l'esatta copia di quello trasmesso, in quanto intervengono dei disturbi che riducono la modulazione del segnale, cioè l'ambiente *filtra* (modifica) la modulazione del parlato secondo una certa funzione di trasferimento della modulazione (*modulation transfer function MTF*). I fenomeni in grado di pregiudicare le caratteristiche di intelligibilità in un dato ambiente possono essere divisi in due gruppi:

- 1) rumore di fondo indipendente dal segnale trasmesso (rumori dovuti al traffico, alla presenza del pubblico, ai condizionatori d'aria, ecc.);
- 2) disturbi legati al segnale stesso (echi e riverberazione).

In linea di principio, la MTF può essere determinata comparando la modulazione dell'intensità sonora del segnale ricevuto con quella del segnale emesso. Si consideri un segnale di input (emesso) caratterizzato dalla legge di variazione dell'intensità sonora:

$$I(t) = I[1 + \cos 2\pi Ft] \quad (1.11)$$

Il relativo segnale di output (ricevuto) sarà:

$$I(t) = I[1 + m(F)\cos 2\pi(Ft + \phi)] \quad (1.12)$$

dove F è la frequenza di modulazione e $m(F)$ è la funzione di trasferimento della modulazione (Houtgast 1985):

$$m(F) = \frac{1}{\sqrt{1 + \left[2\pi F \frac{T}{13.8}\right]^2}} \cdot \frac{1}{1 + 10^{(-S/N)/10}} \quad (1.13)$$

I due fattori che compongono il prodotto rappresentano rispettivamente gli effetti dovuti al tempo di riverberazione T (in s) e al rapporto tra segnale e rumore di fondo, S/N (in dB). La funzione $m(F)$ può variare fra 0 e 1 ed assume questi due valori limite rispettivamente nei due casi di perdita totale e di perfetta trasmissione della modulazione iniziale (fig. 1.5).

L'esempio di fig. 1.3 indica come, per una frequenza di modulazione $F = 2,5$ Hz, un tempo di riverberazione $T = 1,5$ s sia dannoso al pari di un rapporto $S/N = 0$ dB, comportando entrambi un valore di $m = 0,5$. Si può quindi assumere, in termini generali, che un valore di $m(F)$ ottenuto in condizioni non definite (qualunque sia, cioè, la combinazione dei fenomeni di riverberazione ed eco e del rumore di fondo) può sempre essere attribuito a quel valore equivalente del rapporto S/N che da solo, cioè in assenza di riverberazione, avrebbe fornito il medesimo risultato (Houtgast 1985).

Si dimostra che la MTF può essere calcolata partendo dalla risposta all'impulso:

$$m(F) = \frac{\int_0^{+\infty} h^2(t) e^{-j2\pi Ft} dt}{\int_0^{+\infty} h^2(t) dt} \quad (1.14)$$

Nota $h(t)$ dalla simulazione e calcolata $m(F)$, la valutazione dell'intelligibilità vera e propria viene compiuta come segue.

1.4.2.4 STI e RASTI

Si è visto che le prestazioni del sistema di trasmissione ambientale possono venire quantificate mediante una famiglia di curve della MTF, una per ognuna delle 7 bande d'ottava da 125 Hz a 8 kHz e ciascuna definita dai valori che assume in 14 punti della scala delle frequenze di modulazione, valori che vanno da 0,63 Hz a 12,5 Hz in intervalli di 1/3 d'ottava (fig. 1.4). Ovvero, la qualità della trasmissione del parlato è caratterizzata da $7 \cdot 14 = 98$ valori di $m(F)$. Houtgast e Steeneken hanno fornito una procedura normalizzata per condensare questa serie di dati in un singolo indice di valutazione, detto *speech transmission index (STI)*.

Alla base di tale conversione, sta la possibilità di scrivere ciascuno dei 98 valori di $m(F)$ come degli apparenti rapporti segnale-rumore $(S/N)_{app}$, indipendentemente dalla effettiva natura del disturbo che ha originato tale valore di $m(F)$:

$$(S/N)_{app} = 10 \lg \frac{m(F)}{1-m(F)} \quad [\text{dB}] \quad (1.15)$$

Una media pesata dei 98 (S/N) così calcolati permette di ottenere il valore cercato dello STI, tenendo comunque conto di una appropriata normalizzazione:

STI = 1 quando $(S/N)_{app} \geq +15$ dB su tutti i 98 punti;

STI = 0 quando $(S/N)_{app} \leq -15$ dB su tutti i 98 punti.

Attraverso questo schema di calcolo ogni famiglia di curve MTF può essere riportata, senza alcuna ambiguità, ad un unico valore di STI, attraverso il quale si riesce a quantificare il comportamento del sistema di trasmissione (Houtgast 1985). Esiste una larga gamma di risultati sperimentali che dimostrano l'ottima correlazione dei valori dello STI con i dati di intelligibilità ricavati mediante test di ascolto nell'ambiente (Houtgast 1985).

In genere, per valutare il comportamento di un auditorium, l'insieme dei 98 valori di STI per ogni punto di ricezione considerato costituisce una griglia di analisi fin troppo dettagliata. E' stata quindi sviluppata una procedura semplificata decisamente più veloce. Il segnale di prova viene emesso in due sole bande d'ottava (frequenze di centro banda 500 Hz e 2 kHz) e, per ognuna di esse, si considerano solo quattro o cinque frequenze di modulazione (fig. 1.5). Ciò non implica però una grave perdita di dati, in quanto lo spettro di inviluppo del parlato ha un proprio andamento caratteristico, per cui basta fissarne il livello relativamente a due bande d'ottava per definirlo (fig. 1.6). In altri termini, l'insieme dei 98 valori di STI risulterebbe essere decisamente ridondante (Houtgast 1985).

L'indice risultante dalla procedura semplificata è definito RASTI (Rapid STI), e viene calcolato in una maniera molto simile a quella già vista per lo STI:

- 1) si identificano i 9 valori di $m(F)$ necessari;
- 2) si calcolano i 9 valori di $(S/N)_{app}$ secondo la (1.15);
- 3) i 9 valori di $(S/N)_{app}$ vengono troncati qualora non rientrino nell'intervallo ± 15 dB;
- 4) si calcola la media $(S/N)_{app}$ dei nove termini così ottenuti;
- 5) il risultato viene normalizzato ad un valore compreso tra 0 e 1:

$$RASTI = \frac{\overline{(S/N)_{app}} + 15}{30} \quad (1.16)$$

I valori di RASTI ottenuti in vari punti possono essere interpolati per tracciare su una pianta della sala le cosiddette curve *iso-RASTI*.

1.4.3 Locali per l'ascolto della musica

1.4.3.1 Il livello di pressione sonora

Il campo sonoro che tende a stabilirsi all'interno di un ambiente chiuso è dato dalla sovrapposizione del campo diretto, costituito dalle onde provenienti direttamente dalla sorgente, e del campo di riverberazione, costituito dall'insieme di tutte le onde riflesse. Si dimostra che in un ambiente semiriverberante e in regime stazionario il livello di pressione sonora si può esprimere come (Cremer 1982):

$$L_p(r) = L_w + 10 \lg \left(\frac{Q}{4\pi r^2} + \frac{4}{R} \right) \quad [\text{dB}] \quad (1.17)$$

dove:

- L_w : livello di potenza sonora della sorgente;
- Q : fattore di direttività della sorgente;
- r : distanza della sorgente dal punto di ricezione;

$$R = \frac{S\bar{\alpha}}{1 - \bar{\alpha}} \quad (1.18)$$

è la costante dell'ambiente, S è la superficie interna totale e $\bar{\alpha}$ è il valor medio del coefficiente di assorbimento acustico delle superfici che compongono S .

Il livello sonoro ricevuto in un qualsiasi punto all'interno dell'ambiente dipende quindi, oltre che dalle caratteristiche della sorgente, anche e in modo rilevante, dalle caratteristiche fisiche e geometriche dell'ambiente.

1.4.3.2 Il tempo di riverberazione

Proposto agli inizi del 1900 da W.C. Sabine (1924) il tempo di riverberazione, anche noto come durata convenzionale della coda sonora, è stato il primo importante parametro fisico in grado di fornire delle informazioni sulla qualità acustica di un ambiente chiuso. Si definisce *tempo di riverberazione* T l'intervallo di tempo necessario affinché, all'improvviso cessare dell'attività della sorgente sonora operante in regime stazionario, la densità di energia sonora si riduca ad un milionesimo del valore iniziale, o, in maniera equivalente, affinché il livello sonoro decada di 60 dB. Sabine, in base ad una serie di rilievi sperimentali, concluse che il parametro da lui definito poteva esprimersi come:

$$T = 0,16 \frac{V}{\alpha S} \quad (1.19)$$

dove V è il volume dell'ambiente.

Non deve meravigliare il fatto che per l'ascolto della parola sia preferibile un tempo di riverberazione minore che per la musica. Nel primo caso l'ascoltatore è interessato a percepire ogni fonema con la massima chiarezza, cioè non mascherato dalla coda sonora dei precedenti, mentre nel caso della musica un certo grado di riverberazione ha effetti benefici sul mescolamento dei suoni, sulla loro intensità, sulla ricchezza e sul collegamento delle note, ecc. (Beranek 1992)

Il valore più opportuno del tempo di riverberazione, cioè quello che è in grado di conferire ad una sala le migliori caratteristiche di ascolto, escludendo i casi di amplificazione artificiale del suono, è il risultato di un compromesso fra due esigenze contrapposte:

- 1) riduzione degli effetti dannosi di un eccesso di riverberazione;
- 2) garanzia di avere in tutti i punti della sala un livello sonoro sufficiente per un'audizione senza sforzo.

Infatti il tempo di riverberazione e il livello sonoro, a parità di altre condizioni, si mantengono l'uno inversamente e l'altro direttamente proporzionali all'assorbimento acustico globale dell'ambiente, per cui una variazione di tale assorbimento si ripercuote, in termini di qualità acustica, positivamente sull'uno, ma negativamente sull'altro.

Indagini sperimentali effettuate con il passare degli anni su numerose sale destinate all'ascolto della musica e del parlato, unite ai giudizi espressi da critici e musicisti, hanno permesso di definire con buona approssimazione degli intervalli di variabilità ottimale per il tempo di riverberazione (Knudsen 1932), (Beranek 1962). Si passa da poco meno di un secondo a poco più di due secondi, con i valori più elevati per la musica organistica e i valori più bassi per il parlato.

1.4.3.3 I tempi di prima riverberazione

La misura sperimentale del tempo di riverberazione difficilmente avviene nel pieno rispetto della definizione data da Sabine, poichè raramente si può arrivare a registrare un decadimento di 60 dB: sarebbe infatti necessario utilizzare una sorgente in grado di sovrastare il rumore di fondo di oltre 60 dB, cosa che in genere non è possibile. Pertanto si accetta usualmente come tempo di riverberazione classico, direttamente rapportabile alla definizione di Sabine (Beranek 1992), quel valore che si ricava dall'estrapolazione a 60 dB della pendenza media della curva di decadimento, nell'intervallo che va dai 5 ai 35 dB al di sotto del livello di regime (T_{30}).

E' poi nata in seguito tutta una famiglia di tempi estrapolati che fanno riferimento ad intervalli ancora più ridotti:

- 1) tempo di riverberazione iniziale IRT (*Initial Reverberation Time*) o T_{15} , proposto da Atal, Schroeder e Sessler (1966); calcolato estrapolando a 60 dB la pendenza media relativa all'intervallo -5, -20 dB del decadimento del livello sonoro (normalizzando a 0 dB il livello di regime permanente prima dell'interruzione del funzionamento della sorgente sonora).
- 2) Tempo di riverberazione iniziale ANZ (*Anfangsnachhallzeit*) o T_{20} , proposto da Kürer e Kurze (1967/68); calcolato estrapolando la pendenza media relativa all'intervallo -5, -25 dB del decadimento sonoro.
- 3) Tempo di primo decadimento EDT (*Early Decay Time*), o T_{10} , proposto da Jordan (1968); calcolato estrapolando la pendenza media relativa all'intervallo 0, -10 dB del decadimento sonoro.

Rispetto al tempo di riverberazione classico, o al T_{30} , questi criteri, e l'EDT in particolare, sono parametri più sensibili alla posizione del punto di ascolto ed alla geometria della sala; essi sono correlati all'effettiva sensazione di riverberazione percepita dall'orecchio umano, più di quanto lo sia il tempo di riverberazione di Sabine; ciò deriva dal fatto che in un passaggio musicale articolato si percepisce solamente la parte iniziale del decadimento dei picchi più elevati della pressione sonora, mentre la parte restante viene mascherata dagli eventi successivi.

1.4.3.4 L'integrale di Schroeder

Per calcolare il tempo di riverberazione occorre sapere come decade l'energia sonora, proporzionale a $p^2(t)$, nel punto di ricezione subito dopo l'interruzione di un rumore stazionario. Schroeder (1965) ha dimostrato che il tradizionale decadimento riverberante prodotto dallo spegnimento di una sorgente di rumore stazionaria è ricostruibile attraverso la tecnica di integrazione all'indietro della risposta all'impulso $h(\tau)$ tramite la relazione:

$$\langle p^2(t) \rangle = \int_t^{\infty} h^2(\tau) d\tau \quad (1.20)$$

Qui $h(\tau)$ dipende non solo all'ambiente, ma anche dalle caratteristiche della sorgente (in termini di spettro di emissione) e del ricevitore.

Con il metodo tradizionale del rumore stazionario interrotto, bisogna mediare un numero sufficientemente elevato di misure del decadimento sonoro per ogni posizione, dal momento che esso contiene fluttuazioni casuali dovute alla storia del segnale immediatamente precedente allo spegnimento della sorgente. Con il metodo di Schroeder, invece, viene effettuata una singola misura con un segnale impulsivo (in genere si utilizza un colpo di pistola a salve con uno spettro sufficientemente piatto), in grado di fornire la stessa curva di decadimento che si otterrebbe come media $\langle p(t) \rangle$ delle curve fornite da una serie di misure realizzate nello stesso ambiente e con un filtro passa-banda applicato ad una sorgente di rumore bianco.

In fig. 1.7 è visibile la rappresentazione grafica dell'integrazione di Schroeder: la ricostruzione della curva di decadimento avviene mediante l'integrazione all'indietro della risposta all'impulso quadrata, fino a raggiungere il livello di energia stazionario.

La curva di Schroeder si presta bene al calcolo dei tempi di prima riverberazione poichè è monotona decrescente, non fluttuante e ben dettagliata; si presta invece meno bene al calcolo del tempo di riverberazione classico, poichè in tal caso l'intervallo di variazione utile del livello di energia rimane vincolato alla lunghezza della risposta all'impulso, dipendente a sua volta dai limiti temporali imposti alla simulazione. Nel caso poi di decadimento non esponenziale, si possono riscontrare differenze non trascurabili tra tempi calcolati con il metodo tradizionale e tempi ricavati dalla curva di Schroeder (secondo Schroeder sono comunque i valori derivati dalla risposta all'impulso integrata ad essere meglio correlati con la sensazione soggettiva).

1.4.3.5 Il tempo di ritardo iniziale

Caratterizzando il campo riverberante attraverso il valore che assume il tempo di riverberazione, non si fa alcuna distinzione fra la parte di energia utile all'ascolto che perviene agli ascoltatori con un ritardo modesto rispetto all'onda diretta e la parte di energia più ritardata prevalentemente disturbante. Sono stati perciò introdotti altri criteri di analisi della struttura temporale della risposta all'impulso.

Uno dei primi e più utilizzati è quello che si basa sull'analisi dell'andamento delle prime riflessioni. Beranek (1962), in seguito ad una ricerca condotta su numerose sale, concluse che altre caratteristiche di un campo riverberante possono compensare tempi di riverberazione non adeguati; fra queste trovò che la più importante è il tempo di ritardo della prima riflessione energeticamente importante rispetto al suono diretto: questo parametro è conosciuto come intervallo temporale di ritardo iniziale ITDG (*Initial Time Delay Gap*) ed è legato all'aspetto della sensazione uditiva in base al quale l'ascoltatore ha la percezione delle dimensioni della sala (*intimacy*). Il successo dell'ITDG è da attribuire in parte alla possibilità di prevederne facilmente il valore anche mediante semplici costruzioni geometriche; infatti fu proprio in relazione al tracciamento dei raggi sui disegni delle sale da lui esaminate che Beranek (1962) stabilì dei valori di riferimento: 20÷30 ms per sale molto buone, 30÷60 ms per sale discrete e oltre 60 ms per sale scarse dal punto di vista dell'acustica.

il cui valore ottimale, per una sala da concerto, si aggira su 0,34. Il rapporto R tra l'energia riverberante e l'energia iniziale è stato proposto da Beranek e Schultz (1965) come misura fisica dell'equilibrio tra il buon mescolamento dei suoni dei vari strumenti dell'orchestra (*blend*) e la chiarezza (*definition, clarity*), attributi tipicamente soggettivi:

$$R = 10 \lg \frac{\int_{50ms}^{\infty} p^2(t) dt}{\int_0^{50ms} p^2(t) dt} = 10 \lg \frac{1-D}{D} \quad (1.24)$$

1.4.3.7 Criteri per la sensazione spaziale

I criteri considerati in precedenza sono di tipo monoaurale: un solo microfono è sufficiente alla loro determinazione. Viceversa la sensazione acustica che un individuo prova in un ambiente chiuso, una volta raggiunto da un certo messaggio sonoro, dipende, oltre che dalla intensità e dalla caratterizzazione temporale del segnale, anche dalla sua caratterizzazione spaziale.

Fatta eccezione per alcuni fenomeni di eco, il sistema uditivo umano non riesce ad identificare la direzione di provenienza di ogni riflessione della moltitudine che lo sollecita, ma elabora quella particolare sensazione a cui si fa riferimento con il termine di *impressione spaziale*. Si tratta dell'impressione acustica di essere in uno spazio tridimensionale chiuso, di sentirsi avvolti dal suono e di percepire la fonte sonora più estesa di quanto lo sia in realtà.

E' noto che per elaborare questa sensazione di spazialità l'udito richiede la presenza di forti riflessioni laterali nell'intervallo di tempo utile all'ascolto (circa 100_ms dall'arrivo dell'onda diretta); controproducenti da questo punto di vista risultano invece le riflessioni provenienti dall'alto, perchè "allontanano" la sorgente sonora determinando una sensazione di distacco.

L'evidenziazione di questo aspetto dell'udito ha inevitabilmente ridimensionato il valore attribuito all'ITDG di Beranek nello studio delle sale da concerto ed ha portato alla definizione di altri descrittori, fra i quali emergono, come più significativi, l'efficienza laterale e la coerenza mutua inter-aurale. L'efficienza laterale LE (*lateral efficiency*) è stata definita da Jordan (1980) come segue:

$$LE = \frac{\int_0^{80ms} p_{\infty}^2(t) dt}{\int_0^{80ms} p_0^2(t) dt} = \frac{\int_0^{80ms} h^2(t) \cos^2 \vartheta dt}{\int_0^{80ms} h^2(t) dt} \quad (1.25)$$

dove $p_{\infty}^2(t)$ rappresenta la pressione sonora rilevata con un microfono a caratteristica di sensibilità angolare di tipo dipolare (*a figura di otto*) orientato a sensibilità nulla verso la sorgente e $p_0^2(t)$ la pressione sonora rilevata nella stessa posizione però con un microfono omnidirezionale. L'efficienza laterale LE quantifica la frazione di energia sonora utile ai fini della manifestazione della sensazione di spazialità rispetto al totale che perviene nel punto di ascolto considerato. La seconda espressione mostra come calcolare LE a partire dalla risposta all'impulso, essendo ϑ l'angolo tra la direzione di arrivo del suono e la retta congiungente le orecchie del ricevitore.

Jordan, facendo riferimento a risposte impulsive filtrate nel campo delle frequenze interessanti le bande di ottava centrate sui 500 Hz e 1 kHz, suggerisce come ottimali valori di LE superiori a $0,2 \div 0,3$.

La coerenza mutua inter-aurale IACC (inter aural cross correlation) proposta dal gruppo di Gottingen (Gottlob 1973), è un indice della similarità dei segnali captati dalle due orecchie di un ascoltatore. Definita matematicamente la funzione di correlazione mutua con l'espressione normalizzata:

$$\Phi_{LR}(\tau) = \frac{\int_{-T}^{+T} p_L(t) p_R(t+\tau) dt}{\left[\int_{-T}^{+T} p_L^2(t) dt \int_{-T}^{+T} p_R^2(t) dt \right]^{\frac{1}{2}}} \quad (1.26)$$

che rappresenta il grado di somiglianza dei segnali sonori raccolti dall'orecchio sinistro, $p_L(t)$, e destro, $p_R(t)$, la IACC corrisponde al valore massimo assunto nell'intervallo ± 1 ms dalla funzione normalizzata di correlazione mutua:

$$IACC = \max |\Phi_{LR}(\tau)| \quad |\tau| < 1 \text{ ms} \quad (1.27)$$

Il calcolo della IACC richiede di ricostruire per ogni punto di ricezione i due segnali $p_L(t)$, e $p_R(t)$, cioè di eseguire una simulazione *binaurale*; bisogna quindi tenere traccia non solo dell'intensità e del tempo di ritardo, ma anche della direzione di provenienza di ogni riflessione.

I valori della IACC che assicurano una buona sensazione di immersione nel suono si mantengono attorno a $0,4 \div 0,5$; valori superiori (comunque ≤ 1) comportano un ascolto privo di spazialità, mentre i valori inferiori (comunque ≥ 0) testimoniano un'eccessiva direttività laterale del messaggio sonoro, ugualmente poco gradevole.

Lavori successivi a quelli del gruppo di Gottingen hanno portato poi ad alcune varianti nella definizione e nell'interpretazione della IACC, in base ai valori da essa assunti relativamente alle prime e alle ultime riflessioni. Hidaka (1991) distingue tra una $IACC_E$, relativa ad un intervallo di integrazione che va da 0 a 80 ms, ed una $IACC_L$, relativa all'intervallo $80 \text{ ms} \div 3 \text{ s}$. Il primo parametro si dimostra ben correlato col concetto soggettivo di impressione spaziale (*spaciousness*), mentre il secondo fa riferimento al grado di diffusione dovuto al campo riverberante (*diffusion*).

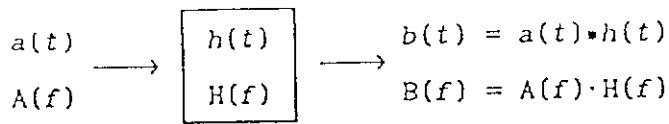


Fig. 1.1. Schema di sistema lineare.

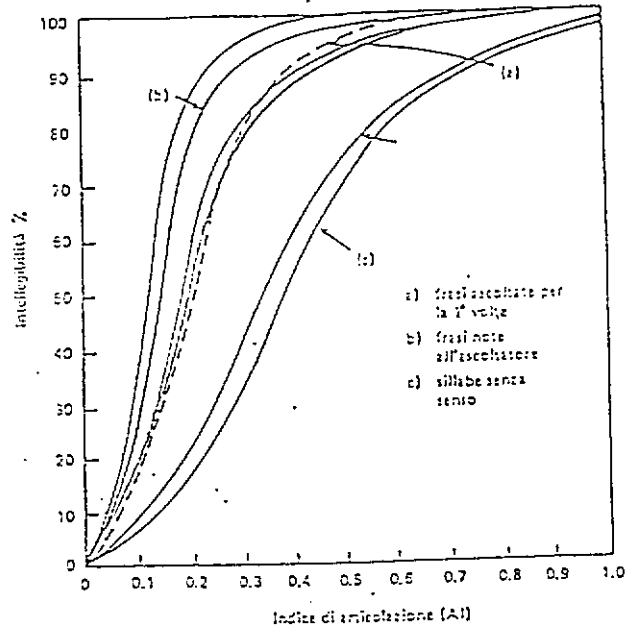


Fig. 1.2. Andamento dei valori di intelligibilità percentuale in funzione dell'indice di articolazione (Houtgast 1985).

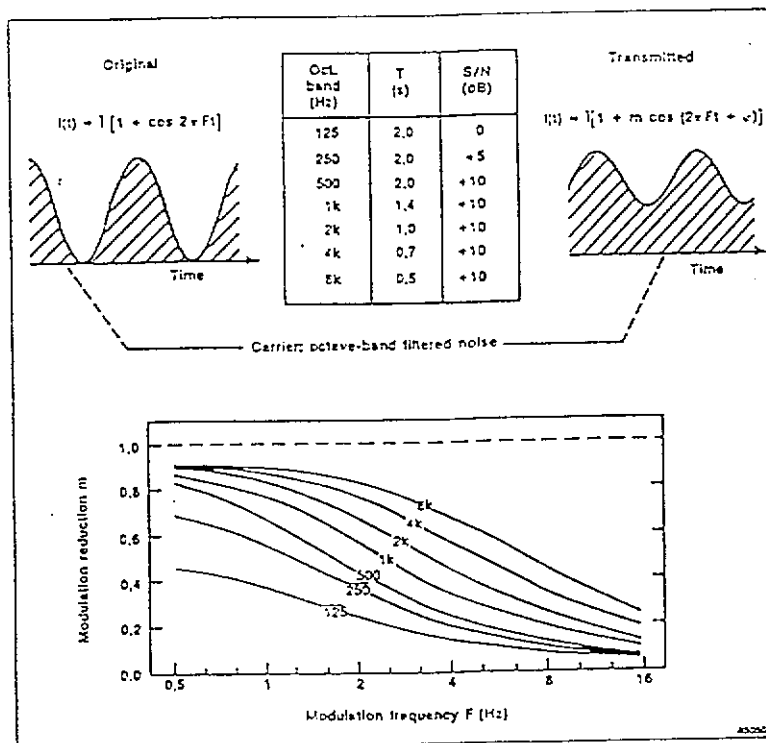


Fig. 1.4. Esempio di valutazione della MTF (Houtgast 1985).

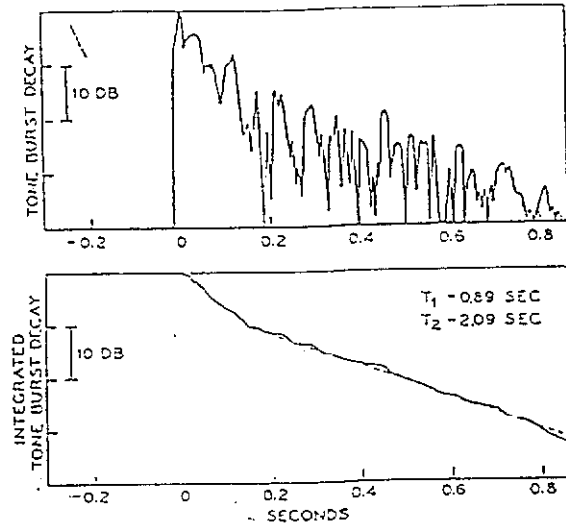


Fig. 1.7. Risposta all'impulso in dB e relativa curva di decadimento (Schroeder 1965).

2 ELEMENTI COSTRUTTIVI CON VALENZA ACUSTICA

2.1 Impostazione del problema

Quando le onde sonore che si propagano in un mezzo materiale incontrano un diverso mezzo, si originano, in funzione delle caratteristiche fisiche dei due mezzi, i fenomeni di riflessione, trasmissione, assorbimento e diffusione del suono. Se il primo mezzo è costituito dall'aria le proprietà d'interazione trovate vengono attribuite al secondo mezzo.

Per studiare il comportamento delle onde sonore all'interfaccia occorre specificare:

- 1) il tipo di onde (in base al teorema di Fourier la trattazione può in linea di principio essere limitata alle onde piane);
- 2) le modalità di incidenza delle onde all'interfaccia (normale od obliqua);
- 3) lo stato fisico dei mezzi attraversati;
- 4) l'eventuale esistenza di fenomeni dissipativi.

In generale, nell'incontrare l'interfaccia tra due mezzi diversi - caratterizzati dalle impedenze acustiche specifiche z_1 e z_2 e dalle velocità di fase c_1 e c_2 - l'onda incidente p_i può dare origine ad un'onda riflessa p_r , ad un'onda trasmessa p_t , ed eventualmente ad un'onda assorbita p_a (fig. 2.1). Con riferimento alle variabili acustiche pressione ed intensità si definiscono allora i fattori complessi di riflessione r , di trasmissione t e di assorbimento a come segue (Kinsler 1982):

$$\text{pressione sonora:} \quad r_p = \frac{p_r}{p_i}, \quad t_p = \frac{p_t}{p_i}, \quad a_p = \frac{p_a}{p_i} \quad (2.1)$$

$$\text{intensità sonora:} \quad r_I = \frac{I_r}{I_i}, \quad t_I = \frac{I_t}{I_i}, \quad a_I = \frac{I_a}{I_i} \quad (2.2)$$

Riferendosi ad una generica superficie d'impatto S di estensione finita sulla faccia del piano di separazione tra i due mezzi rivolta al mezzo 1, è possibile descrivere la potenza sonora incidente mediante il prodotto $W_i = I_i S_i$, essendo I_i l'intensità acustica dell'onda incidente. Analogamente è possibile descrivere la potenza riflessa come $W_r = I_r S_r$, la potenza trasmessa come $W_t = I_t S_t$ ed, eventualmente, la potenza assorbita come $W_a = I_a S_a$; ovviamente $S_r = S_i$. Allora si possono definire anche i fattori per la potenza sonora:

$$\text{potenza sonora:} \quad r_W = \frac{W_r}{W_i}, \quad t_W = \frac{W_t}{W_i}, \quad a_W = \frac{W_a}{W_i} \quad (2.3)$$

Per la conservazione dell'energia, deve valere la relazione:

$$r_W + t_W + a_W = 1 \quad (2.4)$$

Tra fattori non omogenei, cioè riferiti a grandezze acustiche diverse, valgono le relazioni:

$$t_I = t_p^2 \frac{z_1}{z_2}, \quad r_I = r_p^2 \quad (2.5)$$

$$t_W = t_p^2 \frac{S_t}{S_i} \frac{z_1}{z_2}, \quad r_W = r_p^2 \quad (2.6)$$

2.2 Interfaccia aria-solido

Questo è il caso più importante in molte applicazioni pratiche, dove si tratta in genere di considerare l'interazione tra il suono propagantesi per via aerea ed una parete solida.

L'aria è caratterizzata da un'impedenza acustica reale $\rho_0 c$. Per quanto riguarda il mezzo solido, la sua reazione può essere notevolmente complessa; perciò, si usa tralasciare l'analisi dell'onda che penetra nel materiale e si cerca di descriverne il comportamento mediante l'impedenza acustica specifica normale z , definita come rapporto tra la rappresentazione complessa della pressione e la rappresentazione complessa della componente normale della velocità alla superficie del solido stesso:

$$z = \frac{P}{u \cdot \hat{n}} \quad (2.7)$$

dove \hat{n} è un vettore unitario normale alla superficie. z viene spesso normalizzata rispetto all'impedenza dell'aria, dando la cosiddetta impedenza acustica specifica *normalizzata*:

$$\zeta = \zeta_R + j\zeta_I = \frac{z}{\rho_0 c} \quad (2.8)$$

2.2.1 Incidenza normale

Il fattore complesso di riflessione in pressione alla superficie del solido è (Kuttruff 1991)

$$r_p = |r_p| e^{j\psi} = \frac{z_n - \rho_0 c}{z_n + \rho_0 c} = \frac{\zeta_n - 1}{\zeta_n + 1} \quad (2.9)$$

Spesso interessa semplicemente dividere la potenza sonora incidente sulla superficie solida in due parti: quella riflessa e quella che non viene riflessa (assorbita o trasmessa); si definisce allora il *coefficiente di assorbimento acustico apparente*:

$$\alpha = a_w + t_w = 1 - r_w = 1 - |r_p|^2 \quad (2.10)$$

che è un numero reale compreso tra zero ed uno. Utilizzando la (2.9) si può esprimere α_n in funzione di ζ_n :

$$\alpha_n = \frac{4\zeta_{nR}}{|\zeta_n|^2 + 2\zeta_{nR} + 1} \quad (2.11)$$

Le relazioni (2.9) e (2.11) permettono di esprimere le proprietà acustiche di un materiale più importanti nella pratica, e cioè il fattore di riflessione in pressione ed il coefficiente di assorbimento apparente, in funzione dell'impedenza acustica specifica, che risulta così la grandezza fondamentale atta a caratterizzare il comportamento di un materiale rispetto alle onde sonore incidenti.

Nelle applicazioni si usa spesso definire anche il *poterefonoassorbente* A di una superficie solida di estensione S e coefficiente di assorbimento apparente α come:

$$A = \alpha S \quad (2.12)$$

espresso in m^2 o nell'unità equivalente *Sabin*, che rappresenta l'area equivalente di un ipotetico assorbitore acustico perfetto.

Si possono distinguere tre categorie di materiali in funzione dei valori assunti dal fattore complesso di riflessione r_p per incidenza normale (Kuttruff 1991):

1) *materiali (completamente) fonoassorbenti*:

$$r_p = 0e^{j\psi} = 0 \Rightarrow \alpha_n = 1 \text{ e } \zeta_n = 1 \quad (2.13)$$

il valore di ζ_n evidenzia che il mezzo solido è perfettamente accoppiato con il mezzo fluido;

2) *materiali (completamente) fonoriflettenti*:

$$r_p = 1e^{j0} = 1 \Rightarrow \alpha_n = 0 \text{ e } \zeta_n = +\infty \quad (2.14)$$

il valore di ζ_n evidenzia che il mezzo solido è rigido (*hard o rigid*);

3) *materiali cedevoli*:

$$r_p = 1e^{j\pi} = -1 \Rightarrow \alpha_n = 0 \text{ e } \zeta_n = 0 \quad (2.15)$$

il modulo del coefficiente di riflessione assume il valore massimo e l'onda incidente viene sfasata di π rad prima di essere riflessa.

2.2.2 Incidenza obliqua

Non esiste un metodo semplice per studiare la reazione di un solido qualunque ad un'onda sonora incidente obliquamente sulla sua superficie. In genere, si suddividono i solidi in due grandi categorie:

1) solidi *localmente, o normalmente, reagenti (locally or normally reacting)*, per i quali l'impedenza è indipendente dalla direzione d'incidenza del suono, $z = z_n$, ovvero la reazione di ogni elementino di superficie dS dipende solo dalla pressione locale esercitata su di esso;

2) solidi *non localmente reagenti, od a reazione estesa (extended reaction)*, per i quali l'impedenza $z = z(\vartheta)$ dipende dall'angolo ϑ d'incidenza del suono, ovvero la reazione di ogni elementino di superficie dS dipende non solo dalla pressione locale esercitata su di esso, ma anche dal comportamento degli altri elementi di superficie.

Mentre per la prima categoria è possibile mantenere la trattazione in termini semplici, i materiali del secondo tipo richiedono un'analisi matematicamente piuttosto complicata. Comunque, si dimostra (Morse 1968) che si ottengono le più generali espressioni:

$$r_p(\vartheta) = \frac{\zeta(\vartheta) \cos \vartheta - 1}{\zeta(\vartheta) \cos \vartheta + 1} \quad (2.16)$$

$$\alpha(\vartheta) = \frac{4\zeta_R(\vartheta) \cos \vartheta}{(|\zeta(\vartheta)| \cos \vartheta)^2 + 2\zeta_R(\vartheta) \cos \vartheta + 1} \quad (2.17)$$

Per i materiali *localmente reagenti* (e solo per questi) risulta $\zeta = \zeta_n = \zeta(0)$ indipendentemente da ϑ .

In generale, la dipendenza da ϑ complica non poco la simulazione acustica, tanto più che le grandezze z , ζ , r_p , e α sono anche *funzioni della frequenza f* delle onde sonore. Perciò, molti programmi utilizzano per ogni superficie un solo valore di α , supposto rappresentativo di un comportamento medio quando il numero di raggi sonori (cfr. poi) è sufficientemente elevato. In pratica, questi valori sono reperiti in letteratura, dove vengono per lo più riportati i risultati di misure eseguite in camera riverberante secondo una ben precisa metodologia, le cui ipotesi di base possono non coincidere con quelle del metodo di simulazione. Occorre pertanto fare molta attenzione ai valori di α da introdurre nel calcolo.

2.3 Superfici speculari

In generale, poiché le modalità di riflessione di un'onda sonora da parte di una superficie sono variabili come sopra specificato, la distribuzione spaziale dell'energia riflessa si dovrebbe ottenere dalla soluzione dell'equazione di D'Alembert con condizioni al contorno che tengano conto dell'impedenza della superficie stessa. In pratica, accade spesso che risultino verificate le condizioni per l'*approssimazione iconale* dell'equazione d'onda (cfr. § 3.3):

- 1) l'ampiezza dell'onda non cambia apprezzabilmente su distanze comparabili alla lunghezza d'onda;
- 2) la velocità di fase dell'onda non cambia apprezzabilmente su distanze comparabili alla lunghezza d'onda.

Ciò permette una drastica semplificazione del problema, trascurando la natura ondulatoria del suono e lavorando in *approssimazione geometrica*: si può cioè pensare che l'energia sonora associata ad una data porzione di un fronte d'onda si propaghi lungo un *raggio sonoro* orientato come il gradiente locale delle superfici di fase.

In generale, queste due condizioni sono ben approssimate nel *limite delle alte frequenze*, cioè delle piccole lunghezze d'onda.

Se inoltre le superfici materiali considerate hanno:

- 3) una dimensione caratteristica L_1 molto maggiore della lunghezza d'onda λ del suono: $L_1 \gg \lambda$;
- 4) una dimensione caratteristica L_2 delle irregolarità superficiali molto minore della lunghezza d'onda del suono: $L_2 \ll \lambda$ (in genere si pone $L_2 < \lambda/8$);

allora il fenomeno della riflessione si riduce al caso limite della *riflessione speculare*, descritta dalla ben nota legge di Cartesio:

$$\vartheta_i = \vartheta_r \quad (2.18)$$

essendo ϑ_i l'angolo di incidenza e ϑ_r l'angolo di riflessione (fig. 2.2)

La condizione 3 significa che si possono trascurare i fenomeni di diffrazione ai bordi dovuti alle dimensioni finite delle superfici reali. La condizione 4 significa che si possono trascurare i fenomeni di diffusione che insorgono a causa della rugosità delle superfici reali.

Considerando le frequenze caratteristiche principali del parlato e della musica, variabili fra le bande d'ottava dei 250 Hz e dei 4 kHz, il fenomeno della riflessione speculare si instaura per superfici con dimensioni superiori a 1,5 m e asperità inferiori ai 20 mm).

2.4 Superfici diffondenti

Le superfici materiali sono caratterizzate non solo dalla loro capacità di riflettere o meno le onde sonore che incidono su di esse, ma anche dalla capacità di ridistribuire a vari angoli l'energia riflessa. Infatti, la riflessione speculare descritta dalla (2.22) è un caso limite, quasi mai realizzato in pratica. Come si è detto, ciò è dovuto al fatto che, poiché le superfici riflettenti reali hanno *dimensioni finite* e non infinite, ai bordi delle stesse insorgono fenomeni di diffrazione che modificano le modalità di diffusione dell'energia riflessa. Tali fenomeni possono essere trascurati solo se non risulta verificata la condizione 3 del § 2.3. Inoltre, se la superficie riflettente non è liscia, ma *movimentata*, i fenomeni di diffrazione ed interferenza prodotti dalle irregolarità contribuiscono ad aumentare la diffusione dell'energia riflessa. Tali fenomeni possono essere trascurati solo se non risulta verificata la condizione 4 del § 2.3.

Al limite, si può immaginare il caso opposto a quello di una superficie speculare, il caso cioè di una superficie *perfettamente diffondente* che riflette egualmente il suono in tutte le direzioni, come avviene in ottica per la diffusione della luce da parte delle superfici che seguono la legge di Lambert, o del coseno.

Supponendo di considerare un'area elementare dS investita da onde sonore incidenti secondo l'angolo ϑ_0 e caratterizzate da un'intensità pari a I_0 , l'intensità del suono riflesso secondo l'angolo ϑ e misurato ad una distanza r dalla superficie è (fig. 2.3):

$$dI(r, \vartheta) = I_0 \cos \vartheta_0 dS \frac{\cos \vartheta}{\pi r^2} = I_0 dS \frac{\cos \vartheta \cos \vartheta_0}{\pi r^2} \quad (2.19)$$

In pratica, ogni superficie tende ad avere un comportamento in vario grado intermedio tra quelli sopra schematizzati (cfr. fig. 2.4), e ciò complica la previsione del campo sonoro all'interno degli ambienti chiusi.

D'altra parte, esiste un differente ordine di fenomeni che viene sfruttato per controllare a piacere le proprietà diffondenti delle superfici. Una parziale diffusione dell'energia riflessa può essere causata non solo da irregolarità geometriche, ma anche da una *disuniforme distribuzione dell'impedenza* di superfici peraltro lisce. Infatti, durante la riflessione viene modificata non solo l'ampiezza, ma anche la fase delle onde, eq. (2.9); dunque una superficie con impedenza variabile da punto a punto riemetterà tante onde elementari con fasi differenti tra loro che interferiranno per formare un campo sonoro complesso.

Per illustrare il fenomeno si assuma una superficie suddivisa in strisce di ampiezza costante d , con differenti impedenze, ovvero differenti fattori complessi di riflessione r_p , sottoposta ad un'onda sonora incidente normalmente (fig. 2.5). Esempio tipico di questa configurazione è il rivestimento in legno delle pareti di certe sale, dove le assi sono tenute discoste dalla parete retrostante mediante listelli.

L'onda acustica incidente eccita ogni striscia con egual ampiezza e fase. Le onde elementari riflesse secondo l'angolo ϑ vengono sfasate secondo le rispettive differenze di percorso, multiple di quella tra due onde elementari riflesse da due strisce adiacenti, $d \sin \vartheta$, e secondo le variazioni di fase ψ_n causate dal materiale. Lontano dalla superficie, la pressione acustica riflessa totale sarà (Kuttruff 1991):

$$p = e^{j\omega t} \sum_n |r_p| e^{j(nkd \sin \vartheta + \psi_n)} \quad (2.20)$$

Se lo sfasamento per riflessione ψ_n fosse lo stesso per tutte le strisce, allora per $\vartheta = 0$ tutti i contributi sarebbero identici e l'onda sarebbe particolarmente intensa (riflessione speculare). L'effetto di uno sfasamento variabile ψ_n è quindi quello di distruggere parzialmente la riflessione speculare e diffondere le riflessioni in direzioni non speculari. Se il modulo $|r_p| = 1$, la superficie non assorbe l'onda sonora e funziona da *reticolo di fase per riflessione*.

La diffusione sarà massima per una distribuzione casuale degli sfasamenti ψ_n , ma poiché la completa casualità è difficile da ottenere con un numero non enorme di elementi, si ricorre in pratica a successioni pseudocasuali a carattere periodico.

Questo è il principio dei *diffusori di Schroeder*. Essi vengono realizzati con pannelli costituiti da un materiale totalmente riflettente, nei quali si realizzano delle piccole cavità a profondità diversa (fig.2.6), le quali permettono il rinvio delle onde incidenti secondo un *salto di fase* legato alla profondità delle cavità stesse. In tal modo, la componente speculare dell'onda incidente è pressochè eliminata, mentre l'energia si fraziona su angoli di riflessione diversi, permettendo così una buona diffusione a tutte le frequenze (Kuttruff 1991). E' da notare che si possono realizzare anche diffusori di Schroeder bidimensionali, scavando una superficie rigida secondo opportuni schemi pseudocasuali bidimensionali.

2.5 Superfici solo parzialmente fonoisolanti

Nell'acustica degli ambienti chiusi accade di dover considerare delle superfici che presentano caratteristiche fonoassorbenti accompagnate da un certo potere fonoisolante. un esempio tipico sono le tende spesse in tessuto pesante; il suono che incide su di esse viene sia assorbito, sia trasmesso attenuato dall'altra parte delle tende e rimesso in circolo nell'ambiente.

In questi casi non si riesce a descrivere correttamente il fenomeno utilizzando il coefficiente di assorbimento acustico apparente α , ma bisogna tenere in conto separatamente sia l'assorbimento acustico, espresso per esempio dal coefficiente a_w , sia il potere fonoisolante della superficie, espresso in funzione del coefficiente di trasmissione t_w . Si tratta tuttavia di un accorgimento ancora poco diffuso negli attuali codici di simulazione.

2.6 Assorbimento nell'aria

Finora si è assunto che le onde sonore si propagassero attraverso l'aria senza dissipazione. In realtà questa dissipazione esiste e, indebolendo l'onda, produce un effetto assimilabile all'assorbimento acustico di un materiale poroso. Tuttavia, l'entità del fenomeno è piccola, cosicché esso può essere trascurato in molte applicazioni, per distanze non troppo grandi e frequenze non troppo alte. Quando invece è necessario, si utilizza una semplice legge semiempirica per l'attenuazione del modulo dell'intensità sonora I con la distanza r :

$$I(r) = I_0 e^{-m_a r} \quad I_0 = I(r = 0) \quad (2.22)$$

m_a è funzione della frequenza del suono, della temperatura e dell'umidità dell'aria (fig. 2.7).

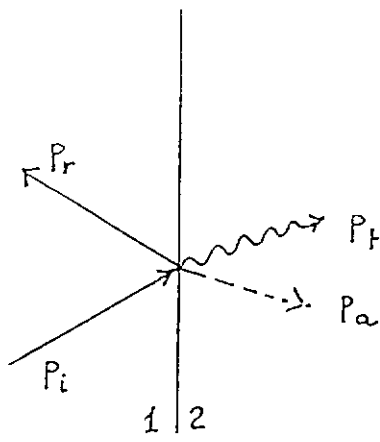


Fig. 2.1. Onde sonore all'interfaccia tra due mezzi.

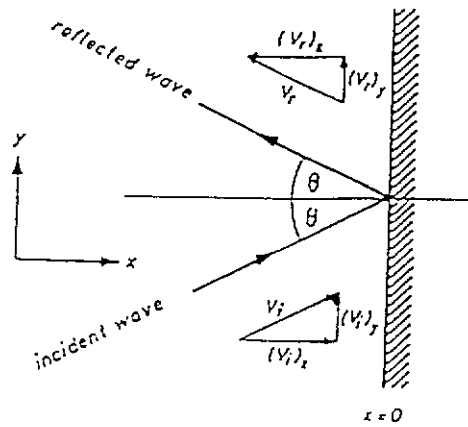


Fig. 2.2. Riflessione speculare (Kuttruff 1991).

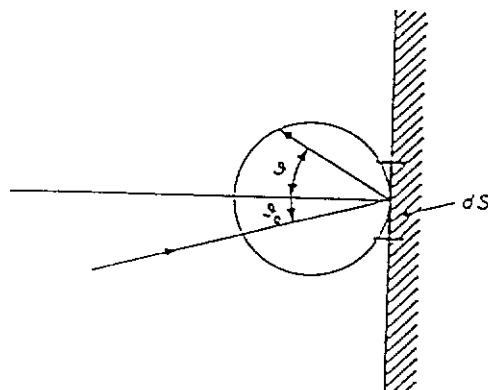


Fig. 2.3. Diffusione uniforme ideale (Kuttruff 1991).

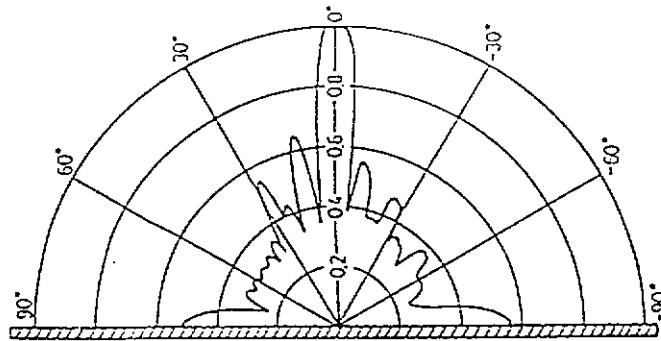


Fig. 2.4. Diagramma polare dell'ampiezza della pressione sonora riflessa da una superficie fortemente irregolare. Incidenza normale; $f = 1$ kHz (Kuttruff 1991).

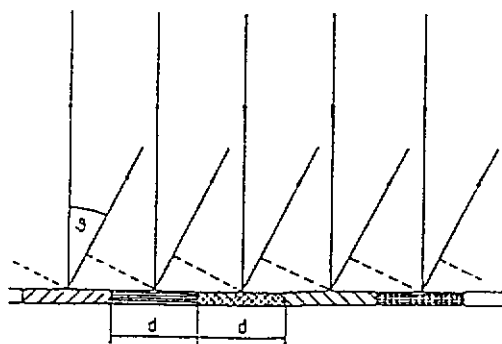


Fig. 2.5. Riflessione sonora da un'insieme di strisce di ugual larghezza d con differenti coefficienti complessi di riflessione (Kuttruff 1991).

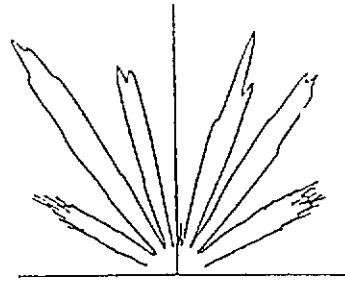


Fig. 2.6. Esempio di successione delle cavità e relativa distribuzione angolare dell'energia in un diffusore di Schroeder monodimensionale (Kuttruff 1991).

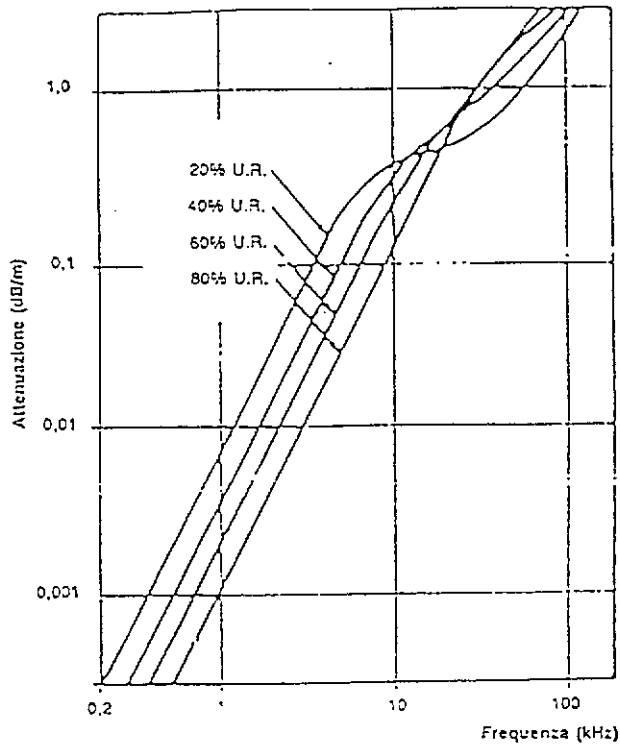


Fig. 2.7. Attenuazione del suono nell'aria (Cocchi 1990).

3 PROCEDURE DI CALCOLO

3.1 Introduzione ai modelli numerici

L'impiego di modelli numerici per studiare l'acustica degli ambienti chiusi diventa sempre più frequente, grazie alla continua riduzione del rapporto costo-prestazioni degli elaboratori elettronici, che rende di giorno in giorno possibile l'implementazione di algoritmi fino a poco tempo prima non praticabili.

Requisito essenziale per un modello è la capacità di riprodurre correttamente i fenomeni fisici oggetto di indagine, pur risultando semplice da usare ed economico in relazione ad un analogo studio del fenomeno reale.

In generale esistono due possibili alternative: quella dei modelli fisici in scala (analogici) e quella dei modelli numerici (discreti). Questi ultimi, pur non consentendo in pratica il dettaglio nella riproduzione geometrica di una determinata sala peculiare dei modelli fisici, offrono svariati benefici. Il principale fra questi è la possibilità di utilizzare il medesimo modello per ambienti totalmente diversi, sia da un punto di vista puramente geometrico, sia in riferimento alle caratteristiche di assorbimento acustico e diffusione delle pareti, sia per quanto concerne numero, potenza sonora, direttività e posizione delle sorgenti sia infine numero e collocazione dei ricevitori (Barron 1983), (Krokstad 1983), (Hodgson 1988).

Lo studio dei campi acustici può essere affrontato secondo diversi livelli di accuratezza, senza per questo falsare gli obiettivi del calcolo previsionale. Infatti molti fenomeni complessi legati alla natura ondulatoria del suono, quali l'interferenza o la diffrazione, sovente non condizionano in maniera determinante il risultato, ed è così possibile studiare il campo acustico secondo semplici leggi geometriche. E' appunto questo il caso dei grandi ambienti (teatri, sale da conferenza, ecc.) dove in genere si ha a che fare con poche e ben localizzate sorgenti sonore e con un campo acustico risultante che dipende in gran parte dai fenomeni di riflessione multipla del suono sulle pareti dell'ambiente: queste sono per lo più lisce e di dimensioni nettamente superiori anche rispetto ai valori maggiori delle lunghezze d'onda in gioco, per cui è possibile pensare che le riflessioni avvengano specularmente, senza alcun effetto di diffrazione ai bordi o di diffusione dovuta alle asperità, ottenendo così una notevole semplificazione del problema.

In altri casi occorre invece considerare alcuni o tutti i fenomeni sopra citati, rendendo la trattazione matematica più complessa ed i tempi di calcolo più lunghi. La variabilità del grado di approssimazione richiesto ha fatto sì che venissero sviluppate diverse tecniche predittive, orientate specificamente alle singole esigenze di applicazione. Fondamentalmente, si possono considerare due diversi modi di procedere:

- 1) approssimazione sul dominio spaziale;
- 2) approssimazione del campo acustico.

Il primo metodo si rende necessario quando le dimensioni dell'ambiente da studiare sono confrontabili con quelle della lunghezza d'onda del suono, per cui non è possibile trascurare la natura ondulatoria del fenomeno. Si ricorre allora ad una discretizzazione del dominio, per rendere il problema costituito dall'equazione d'onda e dalle relative condizioni al contorno numericamente risolubile. Il secondo caso si verifica quando si sostituisce la trattazione geometrica a quella ondulatoria; in linea di principio non bisogna compiere approssimazioni sul dominio spaziale.

3.2 L'approssimazione sul dominio: cenni al metodo degli elementi finiti

Il metodo degli elementi finiti (*finite element method FEM*) è un metodo di discretizzazione del dominio spaziale che permette di integrare l'equazione di D'Alembert anche su domini di forma irregolare, e con condizioni al contorno variabili.

Esso presenta il vantaggio di essere generale sia rispetto alla geometria del sistema che alle proprietà del mezzo, per cui possono facilmente essere presi in esame sistemi complessi composti di materiali diversi. In modo altrettanto generale possono essere poste le condizioni al contorno, sia sulla frontiera che all'interno dei domini. Si può infine dimostrare che esso converge alla soluzione esatta all'aumentare del numero degli elementi considerati. Per questo motivo il *FEM* è stato utilizzato per affrontare problemi di rilevante interesse pratico, come per esempio lo studio dei modi propri e delle frequenze di risonanza dell'abitacolo di autoveicoli (Nefske 1982).

Per evitare errori eccessivi è necessario garantire che il passo della discretizzazione sia sufficientemente piccolo in rapporto alla lunghezza d'onda del suono (i lati degli elementi devono avere dimensioni minori di un 1/8 della lunghezza d'onda) e dunque bisogna considerare un gran numero di elementi, ovvero di incognite. Il metodo, pur non presentando particolari difficoltà di implementazione, risulta pertanto limitato dagli elevati tempi di calcolo necessari.

Finora, il metodo degli elementi finiti è stato utilizzato con successo per la previsione dei campi sonori in piccoli ambienti, mentre per studiare teatri di dimensioni anche modeste sarebbe necessario risolvere sistemi con miliardi di incognite; tale metodo non è pertanto utilizzabile per lo studio di grandi ambienti, a causa del vincolo sul passo della discretizzazione.

3.3 L'approssimazione geometrica

Per la determinazione del campo acustico nei grandi ambienti si fa in genere riferimento ad una approssimazione di tipo geometrico, valida nel caso limite in cui la lunghezza d'onda del suono ha dimensioni trascurabili rispetto agli elementi costituenti l'ambiente circostante, come avviene nel campo delle frequenze elevate. Ad esempio, per una frequenza di 1 kHz, a cui corrisponde una lunghezza d'onda di 0,34 m, le dimensioni lineari delle pareti e le distanze percorse dalle onde sono, in proporzione, molto grandi, per cui è possibile rappresentare con raggi sonori la propagazione delle onde stesse (Vorländer 1989).

Non bisogna comunque dimenticare che la schematizzazione dei raggi sonori può solo approssimare, ma non sostituire il comportamento ondulatorio del fenomeno acustico, e anche questo solo sotto opportune condizioni. Per chiarire si consideri l'equazione delle onde acustiche:

$$\nabla^2 p = \frac{1}{c^2} \frac{\partial^2 p}{\partial t^2} \quad (3.1)$$

dove la velocità di fase è funzione della posizione: $c \equiv c(x,y,z)$. Una possibile soluzione della (3.1) è del tipo (Kinsler 1982):

$$p(x,y,z,t) = A(x,y,z) \cdot e^{j\omega[t - \Gamma(x,y,z)/c_0]} \quad (3.2)$$

dove Γ è la cosiddetta *funzione iconale*, mentre c_0 è un valore costante (di riferimento) della velocità di fase.

I luoghi dei punti tali che $\Gamma(x,y,z) = \text{cost.}$ definiscono le superfici a fase costante (fronti d'onda), così che $\nabla\Gamma$, in ogni punto perpendicolare a tali superfici, rappresenta la direzione di propagazione delle onde.

Sostituendo poi la (3.2) nella (3.1) ed imponendo opportune condizioni si arriva all'*equazione iconale*:

$$\nabla\Gamma \cdot \nabla\Gamma = n^2 \quad (3.3)$$

ove, in analogia all'indice di rifrazione definito in ottica geometrica, si è posto:

$$n(x, y, z) = \frac{c_0}{c(x, y, z)} \quad (3.4)$$

La (3.3) risulta valida quando:

- 1) l'ampiezza $A(x, y, z)$ dell'onda non cambia apprezzabilmente su distanze comparabili alla lunghezza d'onda λ ;
- 2) la velocità di fase $c(x, y, z)$ dell'onda non cambia apprezzabilmente su distanze comparabili alla lunghezza d'onda λ .

Ciò permette una drastica semplificazione del problema, nota come *approssimazione geometrica*: trascurando la natura ondulatoria del suono si può cioè pensare che l'energia sonora associata ad una data porzione di superficie di fase si propaghi lungo un raggio sonoro orientato come il gradiente locale ∇T della superficie di fase (fig. 3.1).

La prima condizione sopra specificata significa allora che si possono identificare i raggi sonori con fasci di energia sonora nella zona centrale dei quali l'ampiezza dell'onda rimane quasi costante; ai bordi di tali fascetti l'ampiezza decade bruscamente e l'equazione dell'iconale non è più valida, ma dovrebbe essere ripresa la forma completa dell'equazione di D'Alembert per tenere conto della diffrazione. La seconda condizione significa che si può parlare di raggi sonori quando il percorso dei fascetti di energia sonora è localmente quasi rettilineo, ovvero quando la rifrazione non è troppo forte. In generale, queste due condizioni sono ben approssimate nel limite delle alte frequenze, cioè delle piccole lunghezze d'onda.

La scelta di una particolare schematizzazione della propagazione per raggi è cruciale per definire i diversi tipi di modello matematico. Nel metodo detto 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 metodo del *ray tracing* l'approssimazione è ancora più drastica: si ammette che l'energia viaggia effettivamente convogliata dai raggi stessi, e non si disperda, mentre poi sono i raggi stessi a divergere sfericamente tra loro, determinando una ulteriore semplificazione nella trattazione del fenomeno della propagazione dell'energia sonora. Nel metodo del *beam tracing* i singoli fasci di energia sonora divergono, cioè aumentano di sezione, allontanandosi dalla sorgente e si definisce in genere un'opportuna funzione peso per tenere conto del fatto che ai bordi di tali fascetti l'ampiezza decade bruscamente (cfr. sopra condizione 1).

3.4 Acustica statistica

Prima dell'avvento dei calcolatori elettronici il più diffuso modello dell'acustica degli ambienti chiusi era quello della cosiddetta *acustica statistica*.

Essa si basa sulle ipotesi che l'energia sonora sia uniformemente diffusa nell'ambiente e che esista un libero cammino medio per le onde sonore. Queste assunzioni rendono di fatto la trattazione statistica equivalente a quella geometrica, anche se poi la mancata adozione di un meccanismo esplicito di propagazione (raggi sonori o sorgenti virtuali più fronti d'onda sferici; cfr. poi) limita la quantità di informazioni ottenibili dall'acustica statistica ad un livello decisamente inferiore a quello fornito dai modelli delle sorgenti virtuali o del *ray tracing*. Infatti, gli unici parametri calcolabili sono:

- 1) la densità di energia sonora complessiva in regime stazionario;
- 2) il livello sonoro in un punto, L_p , in regime stazionario, eq. (1.17);
- 3) il tempo di riverberazione T , eq. (1.19), unico per l'intero ambiente, e per qualunque intervallo di decadimento del livello;
- 4) l'ITDG, con considerazioni geometriche e non statistiche.

$$n(x, y, z) = \frac{c_0}{c(x, y, z)} \quad (3.4)$$

La (3.3) risulta valida quando:

- 1) l'ampiezza $A(x, y, z)$ dell'onda non cambia apprezzabilmente su distanze comparabili alla lunghezza d'onda λ ;
- 2) la velocità di fase $c(x, y, z)$ dell'onda non cambia apprezzabilmente su distanze comparabili alla lunghezza d'onda λ .

Ciò permette una drastica semplificazione del problema, nota come *approssimazione geometrica*: trascurando la natura ondulatoria del suono si può cioè pensare che l'energia sonora associata ad una data porzione di superficie di fase si propaghi lungo un raggio sonoro orientato come il gradiente locale ∇T della superficie di fase (fig. 3.1).

La prima condizione sopra specificata significa allora che si possono identificare i raggi sonori con fasci di energia sonora nella zona centrale dei quali l'ampiezza dell'onda rimane quasi costante; ai bordi di tali fascetti l'ampiezza decade bruscamente e l'equazione dell'iconale non è più valida, ma dovrebbe essere ripresa la forma completa dell'equazione di D'Alembert per tenere conto della diffrazione. La seconda condizione significa che si può parlare di raggi sonori quando il percorso dei fascetti di energia sonora è localmente quasi rettilineo, ovvero quando la rifrazione non è troppo forte. In generale, queste due condizioni sono ben approssimate nel limite delle alte frequenze, cioè delle piccole lunghezze d'onda.

La scelta di una particolare schematizzazione della propagazione per raggi è cruciale per definire i diversi tipi di modello matematico. Nel metodo detto 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 metodo del *ray tracing* l'approssimazione è ancora più drastica: si ammette che l'energia viaggia effettivamente convogliata dai raggi stessi, e non si disperda, mentre poi sono i raggi stessi a divergere sfericamente tra loro, determinando una ulteriore semplificazione nella trattazione del fenomeno della propagazione dell'energia sonora. Nel metodo del *beam tracing* i singoli fasci di energia sonora divergono, cioè aumentano di sezione, allontanandosi dalla sorgente e si definisce in genere un'opportuna funzione peso per tenere conto del fatto che ai bordi di tali fascetti l'ampiezza decade bruscamente (cfr. sopra condizione 1).

3.4 Acustica statistica

Prima dell'avvento dei calcolatori elettronici il più diffuso modello dell'acustica degli ambienti chiusi era quello della cosiddetta *acustica statistica*.

Essa si basa sulle ipotesi che l'energia sonora sia uniformemente diffusa nell'ambiente e che esista un libero cammino medio per le onde sonore. Queste assunzioni rendono di fatto la trattazione statistica equivalente a quella geometrica, anche se poi la mancata adozione di un meccanismo esplicito di propagazione (raggi sonori o sorgenti virtuali più fronti d'onda sferici; cfr. poi) limita la quantità di informazioni ottenibili dall'acustica statistica ad un livello decisamente inferiore a quello fornito dai modelli delle sorgenti virtuali o del *ray tracing*. Infatti, gli unici parametri calcolabili sono:

- 1) la densità di energia sonora complessiva in regime stazionario;
- 2) il livello sonoro in un punto, L_p , in regime stazionario, eq. (1.17);
- 3) il tempo di riverberazione T , eq. (1.19), unico per l'intero ambiente, e per qualunque intervallo di decadimento del livello;
- 4) l'ITDG, con considerazioni geometriche e non statistiche.

In ogni caso, non è possibile ricostruire una risposta all'impulso realistica con il solo impiego dell'acustica statistica. Per tali motivazioni, l'acustica statistica non è più impiegata nei moderni codici di calcolo, se non per correggere la coda riverberante della risposta all'impulso calcolata con altri metodi.

3.5 Sorgenti virtuali

3.5.1 Caratteristiche del modello

Nell'ambito dell'approssimazione geometrica e se le superfici di contorno dell'ambiente soddisfano le condizioni per la riflessione speculare (cfr. § 2.3), una qualsiasi onda riflessa si può pensare come proveniente dall'*immagine virtuale* della sorgente reale e quindi in definitiva essere considerata a sua volta come un'onda diretta, originata da una sorgente fittizia coincidente con l'immagine virtuale posta dietro la superficie responsabile della riflessione. Tale meccanismo si può estendere senza difficoltà anche alle riflessioni successive alla prima: è sufficiente considerare come sorgente reale la sorgente virtuale della riflessione precedente (fig. 3.2).

Su questa interpretazione del fenomeno della riflessione delle onde, o meglio dei raggi sonori, si basa la tecnica detta delle *sorgenti virtuali* (*mirror image sources method MISM*), le cui ipotesi di base sono le seguenti:

- 1) valgono le approssimazioni dell'acustica geometrica;
- 2) sulle superfici di contorno, il suono si riflette specularmente;
- 3) ad ogni riflessione speculare è associata una sorgente virtuale che si comporta in emissione come la sorgente reale da cui è originata;
- 4) ogni sorgente, reale o virtuale, emette fronti d'onda sferici (ipotesi esatta, a rigore, nel solo caso di sorgenti piccole rispetto alla lunghezza d'onda e i cui punti vibrino in concordanza di fase);
- 5) la propagazione dei fronti d'onda sferici è tracciabile mediante raggi sonori che vanno dalla sorgente, reale o virtuale, al ricevitore;
- 6) la potenza sonora che giunge ad un ricevitore è pari a quella emessa dalla sorgente, reale o virtuale, diminuita per effetto:
 - 6.1) della divergenza geometrica (cfr. ipotesi 4);
 - 6.2) dell'assorbimento delle superfici di confine attraversate dal raggio associato;
 - 6.3) dell'attenuazione del suono nell'aria.

In pratica, per la ricerca delle sorgenti virtuali (ipotesi 1, 2 e 3) le superfici di contorno dell'ambiente vengono schematizzate attraverso un numero finito di superfici piane, dette genericamente pareti, individuate dalle coordinate dei loro vertici e dalla successione degli stessi, che determina la normale alla parete orientata verso l'interno dell'ambiente.

In notazione vettoriale, la posizione e l'orientamento del piano contenente la superficie di riflessione sono definiti dalla normale unitaria n e dalla distanza l del piano stesso dall'origine (fig. 3.4). In base alle precedenti ipotesi 1, 2, e 3, è possibile determinare il punto immagine muovendosi dal punto sorgente P di una distanza pari a $2d$ nella direzione definita da n . Il valore di d , cioè della distanza del punto immagine dal piano, è dato da:

$$d = l - P \cdot n \quad (3.5)$$

mentre R , il vettore posizione del punto immagine, è dato da:

$$R = P + 2dn \quad (3.6)$$

Determinare la posizione di una sorgente immagine richiede quindi il calcolo di sette addizioni e di sei moltiplicazioni: già da questa prima indicazione si può intuire quanto possa divenire dispendioso l'intero algoritmo di ricerca delle sorgenti immagine (Borish 1984).

Per calcolare il modulo dell'intensità sonora ricevuta in un punto occorre innanzitutto ricordare la nota legge (ipotesi 4 e 6.1):

$$I = \frac{WQ}{4\pi r^2} \quad (3.7)$$

dove W è la potenza sonora della sorgente reale, Q la sua direttività ed r la distanza fra la sorgente, reale o virtuale, e il ricevitore, ovvero il percorso dell'associato raggio sonoro (ipotesi 5).

Nel caso delle sorgenti virtuali, occorre poi diminuire la potenza inizialmente emessa dalla sorgente reale delle quote che ad ogni riflessione vanno perse per assorbimento da parte delle pareti (ipotesi 6.2): se la k -esima parete ha coefficiente di assorbimento acustico apparente α_k , essa riflette una quota energetica pari a $(1-\alpha_k)$.

Inoltre è importante, soprattutto nei grandi ambienti, tener conto anche dell'energia persa per assorbimento nell'aria (ipotesi 6.3), in funzione dell'attenuazione m_a , eq.(2.22).

L'intensità sonora proveniente dalla sorgente virtuale dovuta all' l -esimo ordine di riflessione dell' n -esima sorgente reale e ricevuta in un punto a distanza r_{nl} risulta quindi pari a:

$$I = e^{-m_a r_{nl}} \frac{W_n Q_n}{4\pi r_{nl}^2} \prod_{k=0}^K (1-\alpha_k) \quad (3.8)$$

essendo K il numero di pareti colpite dal raggio sonoro. Per le sorgenti reali $l=0$, $K=k=0$ e $\alpha_k=0$.

Per ogni punto di ricezione vanno poi sommate le quote energetiche (3.8) provenienti da tutte le sorgenti virtuali, e la somma va ripetuta per tutte le sorgenti presenti:

$$I = \sum_{n=1}^{N_0} \sum_{l=0}^{L_0} e^{-m_a r_{nl}} \frac{W_n Q_n}{4\pi r_{nl}^2} \prod_{k=0}^K (1-\alpha_k) \quad (3.9)$$

dove:

- N_0 : numero di sorgenti sonore presenti;
- L_0 : massimo ordine di riflessioni considerato;

Benché teoricamente $L_0 \rightarrow +\infty$, i termini della (3.9) divengono sempre più piccoli all'aumentare dell'ordine delle riflessioni e la sommatoria converge ad un valore finito.

In pratica, la ricerca delle sorgenti virtuali continua finché non risulta soddisfatto uno dei criteri di estinzione seguenti:

- 1) l'ordine di riflessione della sorgente virtuale ha raggiunto un valore massimo prefissato, L_0 ;
- 2) l'intensità sonora residua nel più vicino punto di ricezione non supera un valore minimo prefissato, I_c .

Le informazioni ricavabili in questo modo sono teoricamente esaurienti, poichè in ogni punto dell'ambiente possono essere calcolate:

- 1) la densità di energia sonora complessiva in regime stazionario;

- 2) il livello sonoro in funzione della posizione e del tempo;
- 3) le intensità sonore monodirezionali in funzione della posizione e del tempo;
- 4) i tempi di ritardo e le direzioni di arrivo delle singole riflessioni.

Le informazioni specificate ai punti 1 e 2 permettono di ottenere tutti i risultati forniti dall'acustica statistica. Le informazioni specificate ai punti 3 e 4 permettono di ricostruire con un buon grado di dettaglio le risposte all'impulso, dalle quali ricavare tutti i descrittori acustici presentati nel § 1.

3.5.2 Un fenomeno tipicamente ondulatorio: la diffusione

Il fenomeno della diffusione può essere considerato nell'ambito del metodo delle sorgenti immagine, semplicemente introducendo la legge che definisce le probabilità di redirectione del raggio incidente, secondo un certo angolo di riflessione (Cremer 1982), (Krokstad 1983). In pratica, si considerano spesso due casi limite:

- 1) riflessione speculare, eq. (2.18), per le prime riflessioni;
- 2) diffusione uniforme, eq. (2.19), per le riflessioni di ordine superiore.

Per la riflessione speculare si può utilizzare direttamente la (3.9). Nel caso di diffusione uniforme, bisogna introdurre una modifica per tenere conto degli angoli di incidenza ϑ_{0k} e di riemissione ϑ_k per ogni superficie interessata:

$$I = \sum_{n=1}^{N_0} \sum_{l=0}^{L_0} e^{-mr_{nl}} \frac{W_n Q_n}{4\pi r_{nl}^2} \prod_{k=0}^K (1 - \alpha_k(\vartheta_{0k})) \cos \vartheta_{0k} \cos \vartheta_k \quad (3.10)$$

3.5.3 L'algoritmo di calcolo

Il metodo delle sorgenti virtuali è deterministico, in quanto costruisce sistematicamente le sorgenti virtuali in funzione del numero delle riflessioni ed indiretto, poiché le riflessioni reali vengono sostituite da un insieme di sorgenti virtuali in campo libero. Sono note a priori le posizioni delle sorgenti e dei ricevitori ma non le direzioni con cui vengono tracciati i raggi da ogni sorgente (Stephenson 1990).

Il tipico algoritmo di calcolo deve eseguire, per ogni sorgente, ogni ricevitore, ogni superficie ed ogni ordine di riflessione i seguenti controlli (Stephenson 1990):

- 1) la sorgente deve essere interna all'ambiente, cioè visibile dalle facce interne delle superfici definite;
- 2) il ricevitore deve essere interno all'ambiente (come la sorgente, per il principio di reciprocità);
- 3) il punto di riflessione deve appartenere alla superficie di riflessione (criterio di visibilità);
- 4) il raggio non deve essere interrotto da una superficie non coinvolta nella riflessione (criterio inverso del 3).

Praticamente tutti gli algoritmi alle sorgenti virtuali seguono lo schema di seguito delineato in un pseudolinguaggio di alto livello.

Parametri in input:

- geometria dell'ambiente (K pareti);
- coeff. di assorbimento delle pareti, α ;
- attenuazione del suono nell'aria, m ;
- numero, posizione, potenza e direttività delle N sorgenti S;
- numero e posizione degli M ricevitori R;
- massimo ordine delle riflessioni, L.

Parametri in output.

- $I(n,m)$ = intensità sonora proveniente dalla sorgente n-esima e captata dal ricevitore m-esimo;
- $T^*(n,m)$ = tempo impiegato dal raggio emesso dalla sorgente n-esima per raggiungere il ricevitore m-esimo;
- $L^*_{tot}(n,m)$ = lunghezza totale del cammino percorso dal raggio fra sorgente e ricevitore.

Variabili utilizzate:

- S_n = n-esima sorgente reale;
- S^*_{nkl} = sorgente virtuale relativa alla n-esima sorgente reale, creata con la l-esima riflessione sulla k-esima parete;
- W^*_{nkl} = potenza sonora associata ai raggi emessi da S ;
- R_m = m-esimo ricevitore reale;
- R^*_l = intersezione raggio-parete all' l-esimo ordine di riflessione (al punto e associata una direzione di riflessione);
- P_k = k-esima parete;
- L^*_l = lunghezza del cammino percorso tra i punti di riflessione di ordine $(l + 1)$ e l ;
- $I(n,m)$ = intensità sonora proveniente dalla sorgente n-esima e captata dal ricevitore m-esimo;
- $T^*(n,m)$ = tempo impiegato dal raggio emesso dalla sorgente n-esima per raggiungere il ricevitore m-esimo;
- $L^*_{tot}(n,m)$ = lunghezza totale del cammino fra sorgente n-esima e ricevitore m-esimo.

Algoritmo sorgenti virtuali:

```
begin
  "lettura delle sorgenti"  $S_n$ 
  for {sorgente}  $n \leftarrow 1$  to  $N_0$  do
    begin
      for {parete}  $k \leftarrow 1$  to  $K_0$  do
        begin
          for {ordine di riflessione}  $l \leftarrow 1$  to  $L_0$  do
            begin
              "crea le sorgenti virtuali"  $S^*_{nkl}$ 
              "assegna ad ogni sorgente virtuale creata"  $W^*_{nkl}$ 
            end {for su l}
          end {for su k}
        "lettura dei ricevitori"
        for {ricevitore}  $m \leftarrow 1$  to  $M_0$  do
          begin
            begin {test di visibilità}
              for {ordine di riflessione}  $l \leftarrow L_0$  to 1 step -1 do
                begin
                  for {parete}  $k \leftarrow 1$  to  $K_0$  do
                    begin
                      "leggi"  $S^*_{nkl}$ 
                      "leggi"  $R^*_{(l+1)}$ 
                      "determina il segmento"  $(S^*_{nkl} - R^*_{(l+1)})$ 
                    end
                  end
                end
            end
          end
        end
      end
    end
  end
```

```

if (S*nkl - R*(l+1)) "interseca la parete" Pk then
begin {intersezione}
R*l ← "punto di intersezione"
"valuta" L*l ← "segmento" (R*(l+1) - R*l)
"aggiorna" L*tot(n,m) = Σ L*k(n,m)
if l = L0 then I(n,m) = I*nkl
end {intersezione}
else "passa alla parete successiva"
endif
end {for sulle pareti Pk}
end {for all'indietro sugli ordini di riflessione}
end {test di visibilità}
"valuta I(n,m)"
I(n,m) ← I(n,m) - "I assorbita nell'aria in funzione di" (L*tot(n,m); ma)
"assegna al ricevitore" I(n,m)
"valuta" T*(n,m) "in funzione di" L*tot(n,m)
end {for sui ricevitori Rnl}
end {for sulle sorgenti Sn}
end.

```

3.5.4 Efficienza del modello

Definita una particolare posizione della sorgente e del ricevitore, e definiti i piani di giacitura delle superfici di contorno dell'ambiente, non è detto che tutte le sorgenti virtuali costruite siano in grado di passare i test di visibilità espressi al § 3.5.3. Il problema è tanto maggiore quanto più la forma dell'ambiente è irregolare; per esempio, è molto facile che un raggio sonoro colpisca il piano di una superficie al di fuori del contorno della stessa (fig. 3.4). Pertanto, dopo aver generato un elevatissimo numero di sorgenti virtuali, bisogna provvedere alla verifica di quelle effettivamente viste dal ricevitore ed a questo vaglio sopravvive un numero molto esiguo di sorgenti (Borish 1984).

Tale processo di controllo comporta una enorme mole di lavoro per il calcolatore, come ci si può rendere conto raffrontando il numero N_{mis} di sorgenti costruite nelle prime fasi dell'algoritmo col numero N_{stat} di sorgenti effettivamente viste (Stephenson 1990):

$$N_{mis}(K_0, L_0, \sigma) = \sigma \left(2, 2 + \frac{5,5}{K_0} \right) \cdot \left[(0,5 + 0,1\sigma^2) K_0 \right]^{L_0} \quad (3.11)$$

$$N_{stat}(L_0, \sigma) = 1 + \left(\frac{4}{3} \sigma \right)^3 \cdot \left[\left(L_0 + \frac{1}{2} \right)^3 - \frac{1}{8} \right] \quad (3.12)$$

dove K_0 è il numero di pareti e σ è il parametro geometrico (*structure coefficient*):

$$\sigma = (36\pi)^{\frac{1}{2}} \frac{V^{\frac{1}{2}}}{S} \quad (3.13)$$

A titolo d'esempio, si considerino i valori messi a confronto nella tabella 3.1.

K_0	L_0		
	2	5	10
6	1,5	9,3	580
24	21	7400	$4,6 \cdot 10^8$
100	350	$8,8 \cdot 10^6$	$6,8 \cdot 10^{14}$

Tab. 3.1. Possibili valori del rapporto $N_{\text{mis}}/N_{\text{stat}}$ in funzione di K_0 e L_0 (Stephenson 1990).

In termini di tempo di calcolo è proprio la procedura di controllo all'indietro quella che maggiormente impegna l'elaboratore. Secondo la formulazione di Stephenson (1990), infatti, il tempo totale di calcolo è dato dalla relazione:

$$CT_{\text{MISM}}(N_0, M_0, L_0, K_0, \sigma) = 2N_0M_0N_{\text{mis}}(K_0, L_0, \sigma) \quad (3.14)$$

dove M_0 è il numero di ricevitori e gli altri parametri sono già stati definiti.

Di questo tempo di calcolo soltanto una minima parte è impiegata per effettuare una riflessione unitaria; tale periodo è definito una *CTU* (*calculation time unit*), ed è dell'ordine di $0,3 \div 6$ ms su di un PC 286. La restante parte di tempo viene impiegata per le verifiche di visibilità richieste dai criteri 3 e 4 di Stephenson (§ 3.5.3).

Questo spiega perchè in pratica non si riesca mai ad arrivare a previsioni che tengano conto di più di cinque ordini di riflessione. Se lo scopo è quello di valutare semplicemente il livello sonoro, è probabile che esse siano sufficienti; se invece si mira alla ricostruzione in dettaglio dell'intera coda sonora, ad esempio per stimare da essa il tempo di riverberazione, è evidente che occorre seguire i raggi sonori per un tempo anche di alcuni secondi dopo l'onda diretta, arrivando a tempi di calcolo improponibili.

Può essere utile un esempio di carattere pratico: si pensi di voler calcolare la risposta all'impulso relativa ad un intervallo temporale di 400 ms in un ambiente delimitato da 30 superfici e con un volume di 15000 m. Per avere un numero medio di 25,5 riflessioni al secondo, occorre considerare fino al decimo ordine di riflessione, per cui in accordo alla (3.11), si rende necessario il calcolo di un numero totale di punti immagine $N_{\text{mis}} \cong 4,5 \cdot 10^{14}$, con l'impiego di un CT_{MISM} globale (su di un PC 286) pari a qualcosa come 10000 anni.

Per questo motivo il tradizionale algoritmo delle sorgenti virtuali si mostra utile solo nei casi seguenti:

- 1) risposte all'impulso molto brevi e ad elevata risoluzione temporale;
- 2) numero minimo di pareti;
- 3) ambienti a forma parallelepipedica, per i quali si può omettere il test di visibilità, grazie a semplici leggi per la costruzione delle sorgenti stesse (Vorländer 1989).

3.6 Ray tracing

3.6.1 Caratteristiche del modello

Questo metodo deve il suo nome alla schematizzazione adottata nei riguardi della propagazione dell'energia sonora: anzichè disperdersi su fronti d'onda sferici, come nel caso delle sorgenti virtuali, si ammette che l'energia sonora si propaghi nello spazio frazionata lungo traiettorie rettilinee o raggi sonori (Krokstad 1983), (Kulowski 1985). Le ipotesi di base sono le seguenti:

- 1) valgono le approssimazioni dell'acustica geometrica;
- 2) sulle superfici di contorno, il suono si riflette specularmente;
- 3) L'energia sonora della sorgente viene quantizzata in un numero finito di pacchetti associati a raggi sonori, detti anche particelle sonore o fononi;
- 4) a partire dalla posizione della sorgente, i raggi sonori si propagano in tutte le direzioni secondo le leggi dell'acustica geometrica;
- 5) i raggi sonori hanno sezione idealmente infinitesima e costante;
- 6) la divergenza geometrica dell'energia sonora emessa è rappresentata dalla divergenza geometrica dell'insieme dei raggi sonori;
- 7) i raggi sonori perdono energia per effetto:
 - 7.1) dell'assorbimento delle superfici di confine urtate;
 - 7.2) dell'attenuazione del suono nell'aria;
- 8) in ricezione, i quanti di energia sonora associati ai diversi raggi si possono sommare tra loro (trascurando la fase delle onde).

Ogni sorgente viene caratterizzata dalla potenza sonora emessa e dal fattore di direttività; Nel caso del *ray tracing* ciò si traduce nella scelta del numero di raggi e della potenza e della direzione associate a ciascuno di essi.

La generazione dei raggi può avvenire secondo due diverse modalità (fig. 3.5):

- 1) *deterministica*: posta nella posizione della sorgente una sfera unitaria, le direzioni di emissione sono individuate da vettori sulla sfera unitaria secondo una precisa regola geometrica di partizione, che tiene conto del fattore di direttività;
- 2) *casuale*: i vettori direzionali sono generati secondo un algoritmo casuale che assicuri l'uniforme copertura, in senso statistico, della sfera unitaria

I due metodi sono equivalenti per quanto riguarda l'uniformità della distribuzione dei raggi. Va notato, però, che il metodo deterministico la realizza solo quando i raggi sono stati generati nella loro totalità; inoltre la distribuzione dei raggi dipende dal loro numero. Ne consegue che la simulazione compiuta per un dato numero di raggi è inutilizzabile quando se ne varia il numero. Al contrario, con la generazione statistica l'uniformità della distribuzione dei raggi è garantita qualunque sia il loro numero, purché sia sufficientemente elevato; ciò permette di raffinare una simulazione aggiungendovi un'ulteriore insieme di raggi. D'altra parte gli algoritmi di generazione casuale sono molto più difficili da realizzare di quanto non sembri a prima vista e convergono molto lentamente ad una accettabile uniformità.

In ogni caso la potenza sonora assegnata in origine a ciascun raggio sonoro deve essere proporzionale alla potenza W e al fattore di direttività Q della sorgente divisi per il numero totale raggi J_0 .

I ricevitori non possono più essere puntiformi, poiché altrimenti la probabilità di intercettazione di un raggio da parte di un punto sarebbe nulla, e vengono quindi rappresentati da volumi corrispondenti alla zona di sensibilità dei ricevitori stessi. In genere vengono scelte sfere di opportuno diametro, perché la probabilità di captazione di un raggio è funzione dell'area efficace del ricevitore, misurata perpendicolarmente alla direzione di incidenza, e in tal senso soltanto la sfera può presentare delle caratteristiche di omnidirezionalità.

Ogni qual volta un raggio interseca una sfera ricevente le comunica una certa quota di potenza sonora, proporzionale alla lunghezza del segmento di raggio intersecato. Altre volte si assume semplicemente che tutta l'energia posseduta dal raggio si trasmetta all'ascoltatore. Il diametro delle sfere va quindi scelto con oculatezza (cfr. § 3.7.1).

La potenza sonora W_m che raggiunge l' m -esimo ricevitore viene determinata in successivi intervalli di tempo come somma di un gran numero di piccole quantità di potenza trasportate dai raggi che intercettano la relativa sfera di sensibilità:

$$W_m = \frac{WQ}{J_0} \sum_{j=1}^{J_m} \left(\frac{d_{jm}}{D_m} e^{-m \alpha_j r_j} \prod_{l=0}^{L_j} (1 - \alpha_{lj}) \right) \quad (m = 1, \dots, M_0) \quad (3.15)$$

dove:

W : potenza sonora emessa dalla sorgente;
 Q : fattore di direttività della sorgente;
 J₀ : numero totale di raggi emesso dalla sorgente;
 J_m : numero di raggi captato dall' m-esimo ricevitore;
 d_{jm} : lunghezza dell'intersezione tra j-esimo raggio e m-esima sfera ricevente;
 D_m : diametro del m-esimo ricevitore;
 r_j : distanza percorsa dal j-esimo raggio;
 L_j : ordine massimo di riflessione per il j-esimo raggio;
 l_j : indice della l-esima riflessione del j-esimo raggio;
 α_{lj} : coefficiente di assorbimento acustico della l-esima superficie incontrata dal j-esimo raggio.

Per il raggio diretto sorgente-ricevitore L_j = l_j = 0 e α_{lj} = 0.

Per ciascun ricevitore, dividendo l'energia complessiva captata per il volume della sfera si calcola poi la densità di energia sonora e da essa il livello sonoro (Kulowski 1985), (Stephenson 1990).

Affinchè i risultati siano statisticamente stabili, è necessario lanciare moltissimi raggi, in modo che mediamente essi abbiano nell'ambiente una densità sufficientemente elevata e coprano tutte le possibili direzioni; ciò si verifica quando, pur aumentando ulteriormente il numero dei raggi emessi dalla sorgente, non si manifestano apprezzabili variazioni dei risultati. Pertanto la precisione del metodo cresce con il numero di raggi lanciati, così come il tempo di calcolo.

In pratica, la storia di ogni raggio continua finché non risulta soddisfatto uno dei criteri di estinzione seguenti:

- 1) la potenza sonora residua convogliata dal raggio ha raggiunto un valore minimo prefissato, W_ε;
- 2) l'ordine di riflessione del raggio ha raggiunto un valore massimo prefissato, L₀;
- 3) la lunghezza del percorso totale del raggio ha raggiunto un valore massimo prefissato, L*.
- 4) il tempo di volo del raggio ha raggiunto un valore massimo prefissato, T₀.

Le informazioni ottenibili sono le stesse fornite dal modello delle sorgenti virtuali; l'obiettivo fondamentale rimane sempre quello di ricostruire le risposte all'impulso in un determinato numero di punti, da cui poi dedurre i più importanti descrittori acustici (Krokstad 1983).

3.6.2 Un fenomeno tipicamente ondulatorio: la diffusione

Come per il modello a sorgenti virtuali, anche nel caso del *ray tracing* è possibile, seppur in termini diversi, tenere conto del fenomeno della diffusione. L'applicazione diretta della legge di Lambert (cfr. § 3.5.2) comporterebbe ora di rimandare dal punto di riflessione tutta una nuvola di raggi, ciascuno con un proprio contributo energetico, e risulterebbe quindi assai dispendiosa in quanto a tempo di calcolo; si preferisce pertanto rimandare un solo raggio, scelto, in termini energetici e di ridirezione, secondo criteri di tipo statistico; in questo modo si rischia tuttavia di non riuscire a ricreare un campo uniformemente diffuso, a meno che il numero di raggi lanciati non sia sufficientemente elevato (Nakagawa 1993).

Per risolvere il problema, Nakagawa e collaboratori (1993), hanno proposto un *ray tracing* modificato, assumendo che l'energia associata al suono diffuso sia ricavabile come differenza fra il totale dell'energia riflessa e la parte che compete al solo raggio riflesso specularmente.

In altri termini, nel *ray tracing classico (RT)* ad ogni riflessione il contributo energetico associato al raggio riflesso è:

$$W_{l_j} = \frac{WQ}{J_0} (1 - \alpha_{l_j}) \quad (3.16)$$

Nel *ray tracing modificato con diffusione (ray tracing with scattering RTS)* viene introdotto un ulteriore *coefficiente di riflessione geometrica dell'energia $\delta(f)$* , ricavato analizzando la diffusione da superfici quadrate di dimensioni finite ed imponendo che comunque sia $0 \leq \delta(f) \leq 1$:

$$\delta(f) = \frac{S_i^2}{\lambda(f)^2} \left(\frac{1}{s_1} + \frac{1}{s_2} \right)^2 \cos^2 \vartheta_i \quad (3.17)$$

dove:

- f : frequenza del suono incidente;
- $\lambda(f)$: lunghezza d'onda;
- S_i : area della superficie di riflessione;
- ϑ_i : angolo di incidenza, e di riflessione speculare;
- s_1 : distanza fra sorgente e punto di riflessione;
- s_2 : distanza fra punto di riflessione e ricevitore.

Alla generica riflessione di ordine l del raggio j-esimo il contributo energetico associato al raggio riflesso geometricamente, cioè specularmente, tiene conto di un fattore δ del tipo (3.17):

$$W_g = \frac{WQ}{J_0} (1 - \alpha_{l_j}) \delta_{l_j} \quad (3.18)$$

La differenza fra l'energia totale riflessa e quella associata alla sola riflessione speculare viene considerata come energia diffusa; globalmente tale valore è dato da:

$$W_r = \frac{WQ}{J_0} (1 - \alpha_{l_j}) (1 - \delta_{l_j}) \quad (3.19)$$

Si assume poi (fig. 3.6) che il suono diffuso si propaghi in tutte le direzioni e decada esponenzialmente, in maniera tale da fornire al generico ricevitore una potenza sonora diffusa pari a (fig. 3.7):

$$\begin{aligned} W_{sc} &= \frac{1}{2\pi s_2^2} W_r(f) && (t = t_1 + t_2) \\ &= k_{sc}(f) \cdot \exp\left(-13,8 \frac{t - t_{sc}}{T(f)}\right) && (t > t_1 + t_2) \end{aligned} \quad (3.20)$$

dove:

- T(f) : tempo di riverberazione;
- t_1 : tempo di viaggio dalla sorgente al punto di riflessione;
- t_2 : tempo di viaggio dal punto di riflessione al ricevitore

Il fattore energetico $k_{sc}(f)$ è calcolato assumendo che l'energia diffusa decada esponenzialmente nel tempo corrispondente al libero cammino medio dell'acustica statistica (Nakagawa 1993):

$$k_{sc}(f) = \frac{4W_r(f)(1-\bar{\alpha})/S}{4V/cS \int_0^{\infty} \exp\left(\frac{-13.8t}{T(f)}\right) dt} \quad (3.21)$$

dove:

V: volume dell'ambiente;

S: superficie interna totale dell'ambiente;

$\bar{\alpha}$: coefficiente di assorbimento acustico medio su S.

3.6.3 L'algoritmo di calcolo

Il *ray tracing* è un metodo a carattere *diretto e statistico* (Stephenson 1990). Diretto perché simula esplicitamente il processo di propagazione sonora. Sono note a priori le posizioni delle sorgenti e dei ricevitori, le direzioni di emissione dei raggi, ma non il punto in cui un determinato raggio verrà captato. Il carattere statistico del metodo è suggerito due considerazioni:

1) condizione di omnidirezionalità richiesta per la sorgente, quando la generazione dei raggi sfrutta un criterio semiprobabilistico di emissione. Come è stato detto, si associa alla sorgente una sfera unitaria e si impone su di essa che il numero di raggi generato per unità di superficie risulti ovunque costante. Ovviamente, perché l'uniformità di distribuzione possa effettivamente valere localmente è necessario avere un numero di cicli tale da dare valore statistico alla generazione casuale dei raggi all'interno di ciascun elemento in cui è suddivisa la sfera.

2) Convergenza statistica del metodo stesso. I risultati sono soddisfacenti quando la distribuzione dell'energia sonora nell'ambiente è sufficientemente ben rappresentata, vale a dire quando è stato lanciato un elevato numero di raggi: il metodo converge all'aumentare del numero di raggi (per il quale non esiste in linea di principio limite superiore). L'errore relativo statistico della densità di energia per una sfera ricevente che ha captato j_m raggi, che si suppone seguano una distribuzione di Poisson, è approssimativamente (Stephenson 1990):

$$\varepsilon_D \cong \frac{1}{\sqrt{j_m}} \quad (3.22)$$

I programmi che utilizzano la tecnica del *ray tracing* classico operano generalmente in due fasi successive: prima, attraverso un procedimento iterativo, determinano i percorsi seguiti dai raggi (le *storie*), poi calcolano i valori della potenza ricevuta attraverso formule analoghe alla (3.15).

Il tipico algoritmo di *ray tracing* deve eseguire, per ogni raggio, ogni superficie ed ogni ordine di riflessione i classici test (Stephenson 1990):

- 1) i raggi sonori devono colpire la faccia interna delle superfici di contorno (test sulla direzione di volo);
- 2) i raggi sonori devono viaggiare davanti alle superfici (l'ultima posizione deve trovarsi di fronte alla superficie);
- 3) ogni punto di riflessione deve giacere sulla relativa superficie di riflessione (criterio di visibilità);
- 4) ogni raggio sonoro deve seguire il minimo percorso per colpire una superficie.

Praticamente tutti gli algoritmi di *ray tracing* classico seguono lo schema di seguito delineato in uno pseudolinguaggio di alto livello.

Parametri in input:

- geometria dell'ambiente (K_0 pareti);
- coeff. di assorbimento delle pareti, α_k ;
- coeff. di assorbimento dell'aria, m_a ;
- numero, posizione e potenza delle N_0 sorgenti S_n ;
- numero, posizione e dimensioni degli M_0 ricevitori R_m ;
- numero dei raggi emessi, J_0 ;
- massimo cammino di un raggio per l'estinzione, L^* .

Parametri in output.

- $W(n,m,j)$ = potenza emessa dalla sorgente n-esima con il raggio j-esimo e captata dal ricevitore m-esimo;
- $T^*(n,m,j)$ = tempo impiegato dal raggio j-esimo emesso dalla sorgente n-esima per raggiungere il ricevitore m-esimo;
- $L^*_{tot}(n,m,j)$ = lunghezza totale del cammino percorso dal raggio j-esimo fra la sorgente n-esima e il ricevitore m-esimo.

Variabili utilizzate:

- S_n = n-esima sorgente reale;
- r_j = j-esimo raggio emesso;
- θ_j, φ_j = coordinate polari associate al raggio j-esimo;
- W_j = potenza associata al raggio j-esimo;
- R_m = m-esimo ricevitore reale;
- P_k = k-esima parete;
- L^*_1 = lunghezza del cammino percorso tra i punti di riflessione di ordine $(l - 1)$ e l ;
- T_j = tempo impiegato dal raggio j-esimo per raggiungere il ricevitore;
- D_j = direzione associata al raggio j-esimo.

Algoritmo ray-tracing:

```
begin
  "lettura delle sorgenti"  $S_n$ 
  for {sorgenti}  $n \leftarrow 1$  to  $N_0$  do
    begin
      for  $j \leftarrow 1$  to  $J_0$  do
        begin {emissione dei raggi}
          "assegna ad  $r_j$  la coord. polare casuale o fissata"  $\theta_j$ 
          "assegna ad  $r_j$  la coord. polare casuale o fissata"  $\varphi_j$ 
          "assegna ad  $r_j$  il contributo energetico"  $W_j = W_n Q_n / J_0$ 
        end {emissione dei raggi}
        begin {riflessione o captazione dei raggi}
          for  $j \leftarrow 1$  to  $J_0$  do
            begin
              "leggi  $r_j$  interessato all'ultima riflessione"
              while {pareti}  $k \leq K_0$  do
                begin {verifica del piano di riflessione}
                  if not " $r_j$  riflesso è incidente alla parete  $P_k$ "
```

```

then "passa al successivo k"
else
begin {verifica l'impatto al ricevitore o al
      piano di riflessione}
if "rj riflesso impatta un ricevitore prima
  della parete successiva" then
begin {impatto al ricevitore}
  "valuta" Lr ← "distanza percorsa dal raggio
    tra l'ultima riflessione e il ricevitore"
  "valuta" Ltot ← Lj + Lr
  "valuta" Wj = Wj - "W assorb. in aria in funzione di" (Ltot, ma)
  "valuta" Tj ← "tempo impiegato per Ltot"
  "assegna Tj e Wj al ricevitore"
  "passa al successivo j"
end {impatto al ricevitore}
else {criterio 1 di estinzione del raggio}
  if Lj ≥ L* then "passa al successivo j" endif
endif {impatto sul ricevitore}
begin {determinazione del raggio riflesso}
  "leggi" Dj ← "dir. di incidenza"
  "valuta" Dj+1 ← "dir. di riflessione"
  "leggi" Wj
  "valuta" Wj ← Wj - "W assorb. dalla parete in funzione di" (αk)
  "valuta" L1 ← "dist. fra gli impatti (l - 1) e l"
  "aggiorna" Lj = Σ1 L1
  "valuta" Wj ← Wj - "W ass. in aria in funzione di" (Lj, ma)
  {criterio 2 di estinzione del raggio}
  if Wj ≅ 0 then "passa al successivo j" endif
end {determinazione del raggio riflesso}
end {verifica l'impatto}
endif {rj riflesso dalla parete Pk }
end {while su Pk per verificare il piano di riflessione}
end {for su rj }
end {riflessione dei raggi}
end {for sulle sorgenti}
end.

```

3.6.4 Efficienza del modello

L'analisi dei tempi di calcolo relativi al *ray tracing* classico porta alla seguente relazione (Stephenson 1990):

$$CT_{SPSM} = n \cdot \left[K_0 \left(\frac{S}{S_m} \right) CTU + M_0 (CTU)^2 \right] \quad (3.23)$$

$$n = N_0 J_0 L_0 \frac{S_m}{S} \quad (3.24)$$

dove:

CTU ≅ 0.3÷6 ms: tempo di calcolo per una riflessione unitaria;

CTU' ≅ 60·CTU: tempo di calcolo medio per la verifica di attraversamento del ricevitore da parte del raggio;

S_m/S : superficie del ricevitore diviso superficie totale dell'ambiente, cioè numero

medio di raggi che attraversano il ricevitore.

Si può notare come il tempo di calcolo CT_{SPSM} , a parte la dipendenza da parametri geometrici, sia sostanzialmente proporzionale a n , il quale a sua volta dipende dal prodotto J_0L_0 del numero di raggi emessi per il numero di riflessioni. Quindi il CT_{SPSM} cresce col numero dei raggi lanciati e con la lunghezza temporale della loro storia; si tratta comunque di una relazione di proporzionalità lineare, per cui il tempo impiegato per terminare l'algoritmo non diviene mai così alto come per le sorgenti virtuali, eq. (3.14), relativamente allo stesso ambiente e a parità di precisione nel calcolo.

Riferendosi nuovamente all'esempio proposto al § 3.5.4 si può appunto verificare una netta diminuzione dei tempi impiegati: mantenendo le stesse caratteristiche geometriche dell'ambiente, ed inserendovi un solo ricevitore, l'algoritmo viene portato a termine in circa 12 ore su di un PC 286. E' immediatamente chiara la sproporzione fra i valori dei CT riscontrati nei due casi (Vorländer 1989).

Emerge dunque una caratteristica chiave del metodo del *ray tracing*, e cioè il rapporto costante fra la lunghezza delle risposte all'impulso desiderate ed i tempi di calcolo, per cui questi ultimi risultano effettivamente gestibili con i mezzi attualmente a disposizione. Chiaramente poi risposte all'impulso molto lunghe (alcuni secondi) verranno studiate con minore precisione, mentre risposte più corte (400 ms) verranno valutate con grande dettaglio; il criterio di decisione dipende dallo scopo della simulazione, che può essere lo studio della caratteristica temporale del campo acustico o la valutazione del livello sonoro complessivo (Stephenson 1990).

3.7 Confronto tra sorgenti virtuali e ray tracing

Sia il modello delle sorgenti virtuali che quello del *ray tracing* si basano sui metodi dell'acustica geometrica per ricostruire le caratteristiche del campo acustico nei grandi ambienti chiusi. Per quanto riguarda il tracciamento dei raggi e la formulazione geometrica dei criteri per la ricerca dei punti di riflessione e di captazione dei raggi sonori da parte dei ricevitori, i due metodi sono formalmente simili, se non fosse per la dispendiosa procedura di ricerca all'indietro tipica del modello delle sorgenti virtuali. Occorre quindi chiarire quando sia preferibile applicare un modello piuttosto che l'altro al fine di ottenere il risultato ottimale, in relazione anche al tempo di calcolo necessario per terminare l'algoritmo.

3.7.1 Confronto di tipo qualitativo

Il metodo delle sorgenti virtuali è caratterizzato da un'inefficienza di fondo, in quanto dapprima costruisce tutte le potenziali sorgenti, per ordini di riflessione successivi, secondo un procedimento che percorre dalla radice alle foglie tutti i rami dell'*albero logico* delle sorgenti virtuali (fig. 3.8), poi, a causa del test di visibilità, ripercorre l'albero in senso opposto, riprendendo da capo il processo ogni qual volta incorre in un ramo morto (sorgente scartata), finché rimangono selezionati tutti e soli i percorsi effettivi ricevitore-sorgente virtuale. Secondo il metodo del *ray tracing* invece ogni raggio percorre una sola volta l'albero logico, dalla radice alle foglie e secondo l'esatta sequenza di riflessioni, eliminando quindi a priori la possibilità di incorrere nei rami morti.

D'altro canto però il metodo del *ray tracing* mostra i propri limiti nella mancanza di una regola precisa che porti all'esatta determinazione sia del numero di raggi da tracciare, che delle dimensioni dei ricevitori; in ambienti fortemente irregolari può accadere che variando tali parametri si giunga a risultati anche molto diversi, in relazione alla medesima sala.

La determinazione delle dimensioni dei ricevitori è critica perché:

1) dimensioni elevate comportano la captazione di una alta percentuale di raggi, ma anche una scarsa rappresentatività della situazione reale, nonché il rischio di coprire alcuni dei ricevitori distanti dalla sorgente, che vengono a trovarsi nel cono d'ombra generato da altri più vicini;

2) dimensioni troppo ridotte dei ricevitori, comportano la captazione di un numero di raggi troppo ridotto per convergere ad un risultato affidabile, oltre al rischio di perdere delle informazioni perchè qualche ricevitore viene a trovarsi fra due raggi senza captarli.

La risoluzione di uno dei due problemi comporta un aggravio del secondo, per cui si rende necessaria la scelta di valori di compromesso determinati empiricamente caso per caso.

Comunque, indipendentemente dalla loro forma, ricevitori di dimensioni finite sono generalmente causa, in approssimazione geometrica, di errori sistematici (Lehnert 1993):

1) *captazione multipla* (fig. 3.9): il numero di raggi captati e quindi il contributo energetico associato è fondamentalmente legato alla posizione reciproca di sorgente e ricevitore e alla lunghezza del cammino percorso dai raggi;

2) *captazione variabile* (fig. 3.10): a causa delle dimensioni finite del ricevitore, con la stessa densità di raggi e lo stesso ricevitore, un leggero spostamento di quest'ultimo può provocare una notevole variazione dell'energia captata;

3) *captazione geometricamente non valida* (fig. 3.11).

Lehnert (1993) suggerisce che il raggio r di un ricevitore sferico, al fine di minimizzare gli errori, sia dato da:

$$r_m = L * \left(\frac{2\pi}{J_0} \right)^{\frac{1}{2}} \quad (3.25)$$

Questa espressione è stata ricavata assumendo una densità costante di raggi sull'angolo solido di emissione. Per $r = r_m$ la percentuale di captazione supera il 99 %, rispetto al caso ideale in cui il raggio del ricevitore tende all'infinito, a parità di L^* e J_0 .

Un'alternativa, sempre proposta da Lehnert (1993), potrebbe essere quella di utilizzare dei ricevitori sferici a raggio variabile, le cui dimensioni vengono direttamente modificate, all'interno del programma di *ray tracing*, in relazione all'aumentare della lunghezza del cammino percorso dai raggi sonori

3.7.2 Confronto quantitativo

Per confrontare sorgenti virtuali e *ray_tracing* da un punto di vista quantitativo, si assumono in genere come parametri significativi il tempo di calcolo CT e la precisione E raggiungibile nei risultati. Il grafico di fig. 3.12 mostra come variano i due parametri in funzione del numero delle riflessioni.

Il metodo delle sorgenti virtuali si mostra più veloce solo quando il numero di riflessioni è minimo, e la precisione richiesta è scarsa (± 2 dB). Per $L_0 > 2$, sicuramente è più conveniente utilizzare il *ray tracing*, che permette di associare dei tempi di calcolo ragionevoli a dei buoni livelli di precisione.

Ai fini delle applicazioni pratiche Stephenson (1990) ha sviluppato alcuni grafici che, relativamente ai valori assunti dai parametri (σ , α , K_0 , E), permettono l'immediata individuazione del metodo più adatto al contesto.

Dall'analisi condotta, Stephenson ha tratto alcune conclusioni di ordine puramente pratico. Assumendo per esempio in prima analisi una precisione richiesta $E = \pm 2$ dB, risulta che:

1) il CT dipende dal parametro geometrico σ (cfr. eq. (3.13)) molto di più per le sorgenti virtuali che per il *ray tracing*, a parità di E;

2) in un ambiente con coefficiente di fonoassorbimento medio $\alpha \geq 0.2$ il metodo delle sorgenti virtuali è generalmente più veloce, perchè basta tracciare solo poche riflessioni;

mentre i punti di incidenza del raggio sulle pareti (P_1, P_2', P_3'') vengono determinati leggendo nel relativo sistema di coordinate i punti definiti dal collegamento della posizione del ricevitore R_0 con S_{143} (fig. 3.14).

Questa procedura permette un notevole risparmio di memoria sul computer: infatti non è più necessario memorizzare i dati relativi ad ogni sorgente virtuale, ma basta calcolare tante matrici di trasformazione quante sono le possibili superfici di riflessione, e poi determinare direttamente la sorgente virtuale di ordine l voluta, tralasciando la definizione di quelle di ordine intermedio.

Risolto il problema di memoria, resta quello relativo al tempo di calcolo. A questo proposito Lee e Lee (1988) suggeriscono di applicare quanto prima possibile, all'opposto cioè del tradizionale test di visibilità, i due controlli seguenti:

- 1) il punto di riflessione deve cadere non solo sul piano di riflessione, ma anche entro i confini della superficie *finita* reale;
- 2) non vi devono essere ostacoli sul percorso sorgente-ricevitore.

Vi sono poi altri due controlli che permettono di escludere a priori le combinazioni impossibili di riflessioni successive (fig. 3.15):

- 3) escludere i percorsi contenenti successioni di superfici mutuamente invisibili;
- 4) escludere per la riflessione di ordine l le superfici candidate che non sono visibili dalla posizione della sorgente virtuale di ordine $(l - 1)$.

Questi controlli vengono applicati seguendo passo per passo l'ordine delle riflessioni, ovvero la propagazione dei raggi, eliminando a priori gran parte delle combinazioni che avrebbero dato luogo a rami morti nell'albero delle sorgenti virtuali (fig. 3.8).

3.8.2 Raggi sonori per la ricerca delle sorgenti virtuali

Poiché nel modello classico delle sorgenti virtuali ben poche delle sorgenti costruite sono effettivamente visibili, Vorländer (1989) ha proposto, invece del solito oneroso test di visibilità, un'indagine sulla reale sequenza di riflessioni di ogni raggio mediante l'ausilio del *ray tracing*: semplicemente si tratta di prendere nota, mediante un indice, dell'ordine con cui le superfici di riflessione sono state investite dal raggio, per cui risulta immediata la ricostruzione dell'esatta sequenza delle sorgenti virtuali interessate. In seguito, poi, il *ray tracing* viene abbandonato e per la valutazione della risposta all'impulso si considera separatamente il contributo delle varie sorgenti immagine.

Un'altra variante riguarda i ricevitori: mentre nel modello classico a sorgenti virtuali essi sono puntiformi, Vorländer (1989) ha proposto di usare delle sfere, come nel *ray tracing*, che chiaramente sono in grado di intercettare un maggior numero di raggi, dei quali però solo una minima parte passa effettivamente per il centro del ricevitore. Per raggiungere allora una elevata precisione è necessaria una procedura di controllo all'indietro, simile al test di visibilità classico, che permette di verificare quali raggi effettivamente colpiscono il centro della sfera. Non si tratta comunque di una procedura onerosa come quella relativa al modello classico, che prende in considerazione tutte le sorgenti virtuali potenziali, in quanto nel modello di Vorländer è necessario esaminare solo le sorgenti virtuali visibili (fig. 3.16).

3.8.3 Fasci divergenti

Vian, Van Maercke e Martin (1993) hanno elaborato una procedura di simulazione del campo acustico in un ambiente chiuso che media i caratteri deterministici del modello a sorgenti virtuali con quelli più tipicamente statistici del *ray tracing*.

La principale peculiarità di questo metodo, che poi è quella che porta alla denominazione di *cone tracing*, consiste nel sostituire ai raggi sonori uniformemente distribuiti attorno alla sorgente, tipici del *ray*

tracing classico, dei coni, o meglio dei fasci divergenti i cui assi coincidono con i raggi originari. Dopo ogni riflessione, il vertice del cono coincide con una sorgente virtuale associata alla relativa superficie, che fa parte della sequenza di quelle colpite dal raggio.

Se un punto di ricezione cade all'interno di un cono tra due riflessioni successive, la corrispondente sorgente virtuale è potenzialmente visibile e deve essere presa in considerazione.

Il metodo dei coni porta ad un netto miglioramento delle prestazioni, permettendo di eliminare le incertezze dovute al carattere statistico dei raggi, specialmente per le riflessioni di ordine elevato. Poiché esso descrive il campo acustico in termini di sorgenti virtuali, si possono ottenere risposte all'impulso e funzioni di risposta in frequenza.

Come è noto, non è possibile riprodurre correttamente il modello di sorgente panoramica utilizzando coni circolari adiacenti. Il problema può essere risolto in tre maniere differenti, corrispondenti al tracciamento di coni (*cones*), di fasci (*beams*), o di piramidi (*pyramids*), come di seguito illustrato.

1) Con il metodo dei *coni circolari puri*, essi vengono parzialmente sovrapposti, in modo da non lasciare spazi vuoti. Un singolo cammino sorgente-ricevitore verrà quindi individuato più volte. Bisogna perciò memorizzare le sorgenti virtuali associate al percorso corrispondente ad ogni intercettazione su di un ricevitore ed eseguire ripetuti controlli per eliminare i duplicati. Ciò richiede un notevole uso di memoria e limita quindi il metodo alle prime riflessioni. Il grande vantaggio è che il metodo dei coni (puri) implementa in pratica uno schema a sorgenti virtuali con una velocità da *ray tracing*.

2) Il metodo dei *fasci (beams)* risolve il problema della sovrapposizione degli stessi mediante un'opportuna funzione di distribuzione (funzione peso) dell'energia associata al fronte del cono (fig. 3.17). In pratica, ogni raggio diviene l'asse di una sorgente elementare altamente direttiva. Van Maercke e Martin (1993) propongono la funzione peso:

$$D(\vartheta) = \beta_0 \cdot \exp\left(\frac{-k\vartheta^2}{2}\right) \quad (3.28)$$

dove ϑ è angolo tra la retta congiungente sorgente e ricevitore e l'asse del cono, e β_0 e k sono parametri scelti in modo tale che la sovrapposizione delle direttività di fasci adiacenti ricostruisce un fronte d'onda omnidirezionale con un fissato grado di *overlap*. Un raggio tradizionale è un caso limite di fascio quando k tende all'infinito.

In questo modo non occorre memoria addizionale perché le sorgenti virtuali visibili possono essere prese in considerazione non appena il corrispondente fascio intercetta un ricevitore: le individuazioni multiple sono compensate dalla funzione peso applicata ad ogni fascio. I fasci possono quindi essere applicati fino ad ordini di riflessione abbastanza elevati.

Anche la tecnica dei coni soffre degli errori di captazione già visti a proposito dei modelli a sorgenti virtuali e *ray tracing*, ma secondo Van Maercke e Martin (1993) essi sono da attribuire alla brusca transizione tra zone di visibilità e zone d'ombra. Il metodo dei fasci, con le sue funzioni peso, fornisce una transizione in qualche modo più graduale.

3) Il metodo delle *piramidi* si basa sulla possibilità di suddividere esattamente una superficie sferica in triangoli curvilinei partendo dai suoi 8 ottanti e procedendo per bisezioni successive (Tenenbaum et al. 1992), come illustrato nella fig. 3.18. Ciò rende possibile la generazione in maniera deterministica e senza *overlap* di coni che, avendo una base triangolare, sono più propriamente chiamati piramidi. Poiché non si utilizzano funzioni peso e la traiettoria del fascio piramidale viene assimilata a quella dell'asse centrale dello stesso, anche in questo caso si ripresenta il problema delle sorgenti duplicate.

La tecnica dei fasci divergenti necessita sempre di una compensazione per le cosiddette *immagini mancanti*. Infatti, secondo la teoria delle sorgenti virtuali, il numero medio di captazioni per unità di tempo da parte di un generico ricevitore è:

$$n(t) = \frac{4\pi c^3 t^2}{V} \quad (3.29)$$

essendo t il tempo trascorso dall'inizio della simulazione e V il volume dell'ambiente. Nel *ray tracing* classico, la progressiva divergenza tra i raggi porta a sottostimare questo valore, ma essa è mediamente compensata dalla mancata divergenza dell'energia trasportata da ogni raggio, e dalla conseguente sovrastima del contributo di ogni captazione. Con i fasci divergenti, invece, un numero progressivamente crescente di sorgenti virtuali non viene considerato, perché il loro riconoscimento si basa sempre e soltanto sulla storia dell'asse centrale del fascio, cosicché il numero medio di captazioni per unità di tempo segue approssimativamente la legge (Van Maercke e Martin 1993):

$$n(t) = \frac{4\pi c^3 t^2}{V} \left(1 - \exp\left(-\frac{t_c^2}{t^2}\right) \right) \quad (3.30)$$

dove t_c è il tempo critico definito dall'intersezione della (3.29) con la retta rappresentante il valore limite di $n(t)$ per $t \rightarrow \infty$ (fig. 3.20). Per compensare questa deviazione sistematica, si ricorre in genere ad una correzione di tipo moltiplicativo: l'energia sonora calcolata mediante il tracciamento dei fasci viene divisa per il fattore in parentesi della (3.30). Si noti che, a rigore, l'utilizzo della (3.30) è lecito solo per fasci circolari pesati come quelli impiegati da Van Maercke e Martin (1993). La stima del corretto valore di t_c viene effettuata punto per punto.

All'utilizzo dei fasci divergenti sono associate strategie particolari per il trattamento della coda della risposta all'impulso. La strategia più semplice, ma tutt'ora la meno adottata, consiste nel lasciare che i fasci divergano progressivamente, fino a divenire ampi come l'ambiente che li contiene. In queste condizioni ogni ricevitore sperimenta continui arrivi di energia sonora e diviene quindi possibile un calcolo dell'energia riverberante con un numero molto ridotto di fasci. Tuttavia, l'assunzione di fasci così ampi appare forzata; inoltre, l'uso di un modello geometrico di propagazione per la ricostruzione della coda riverberante potrebbe essere criticabile anche da un punto di vista teorico (Polack 1993).

Per questo, il codice di calcolo *Epidaure* (Van Maercke e Martin 1993) combina due differenti tecniche per una adeguata predizione della risposta all'impulso (fig. 3.19). Mentre infatti per le prime riflessioni, quando è importante una ricostruzione dettagliata dell'ecogramma, viene attivato il *beam tracing*, per le riflessioni di ordine superiore viene sfruttata una *statistica sui fasci* lanciati durante la prima fase. La coda riverberante viene cioè valutata con un modello statistico, tralasciando lo studio degli effetti legati ai singoli contributi (fasci) non più facilmente distinguibili, a questo punto, l'uno dall'altro. Per evitare una discontinuità tra la parte geometrica e la parte riverberante, la transizione è determinata dall'ordine di riflessione, e non da un valore temporale fissato. Questa differenziazione delle fasi di lavoro comporta una ulteriore velocizzazione dell'algoritmo.

Si noti che questo tipo di statistica opera sul campione delle immagini virtuali trovate per stimare i parametri della popolazione (idealmente infinita) di tutte le immagini virtuali, e non è quindi equivalente alla semplice adozione della acustica statistica di Sabine, che pure costituisce una strategia possibile, a volte impiegata in alcuni codici meno evoluti.

La tecnica dei fasci divergenti necessita sempre di una compensazione per le cosiddette *immagini mancanti*. Infatti, secondo la teoria delle sorgenti virtuali, il numero medio di captazioni per unità di tempo da parte di un generico ricevitore è:

$$n(t) = \frac{4\pi c^3 t^2}{V} \quad (3.29)$$

essendo t il tempo trascorso dall'inizio della simulazione e V il volume dell'ambiente. Nel *ray tracing* classico, la progressiva divergenza tra i raggi porta a sottostimare questo valore, ma essa è mediamente compensata dalla mancata divergenza dell'energia trasportata da ogni raggio, e dalla conseguente sovrastima del contributo di ogni captazione. Con i fasci divergenti, invece, un numero progressivamente crescente di sorgenti virtuali non viene considerato, perché il loro riconoscimento si basa sempre e soltanto sulla storia dell'asse centrale del fascio, cosicché il numero medio di captazioni per unità di tempo segue approssimativamente la legge (Van Maercke e Martin 1993):

$$n(t) = \frac{4\pi c^3 t^2}{V} \left(1 - \exp\left(-\frac{t_c^2}{t^2}\right) \right) \quad (3.30)$$

dove t_c è il tempo critico definito dall'intersezione della (3.29) con la retta rappresentante il valore limite di $n(t)$ per $t \rightarrow \infty$ (fig. 3.20). Per compensare questa deviazione sistematica, si ricorre in genere ad una correzione di tipo moltiplicativo: l'energia sonora calcolata mediante il tracciamento dei fasci viene divisa per il fattore in parentesi della (3.30). Si noti che, a rigore, l'utilizzo della (3.30) è lecito solo per fasci circolari pesati come quelli impiegati da Van Maercke e Martin (1993). La stima del corretto valore di t_c viene effettuata punto per punto.

All'utilizzo dei fasci divergenti sono associate strategie particolari per il trattamento della coda della risposta all'impulso. La strategia più semplice, ma tutt'ora la meno adottata, consiste nel lasciare che i fasci divergano progressivamente, fino a divenire ampi come l'ambiente che li contiene. In queste condizioni ogni ricevitore sperimenta continui arrivi di energia sonora e diviene quindi possibile un calcolo dell'energia riverberante con un numero molto ridotto di fasci. Tuttavia, l'assunzione di fasci così ampi appare forzata; inoltre, l'uso di un modello geometrico di propagazione per la ricostruzione della coda riverberante potrebbe essere criticabile anche da un punto di vista teorico (Polack 1993).

Per questo, il codice di calcolo *Epidaure* (Van Maercke e Martin 1993) combina due differenti tecniche per una adeguata predizione della risposta all'impulso (fig. 3.19). Mentre infatti per le prime riflessioni, quando è importante una ricostruzione dettagliata dell'ecogramma, viene attivato il *beam tracing*, per le riflessioni di ordine superiore viene sfruttata una *statistica sui fasci* lanciati durante la prima fase. La coda riverberante viene cioè valutata con un modello statistico, tralasciando lo studio degli effetti legati ai singoli contributi (fasci) non più facilmente distinguibili, a questo punto, l'uno dall'altro. Per evitare una discontinuità tra la parte geometrica e la parte riverberante, la transizione è determinata dall'ordine di riflessione, e non da un valore temporale fissato. Questa differenziazione delle fasi di lavoro comporta una ulteriore velocizzazione dell'algoritmo.

Si noti che questo tipo di statistica opera sul campione delle immagini virtuali trovate per sommare i parametri della popolazione (idealmente infinita) di tutte le immagini virtuali, e non è quindi equivalente alla semplice adozione della acustica statistica di Sabine, che pure costituisce una strategia possibile, a volte impiegata in alcuni codici meno evoluti.

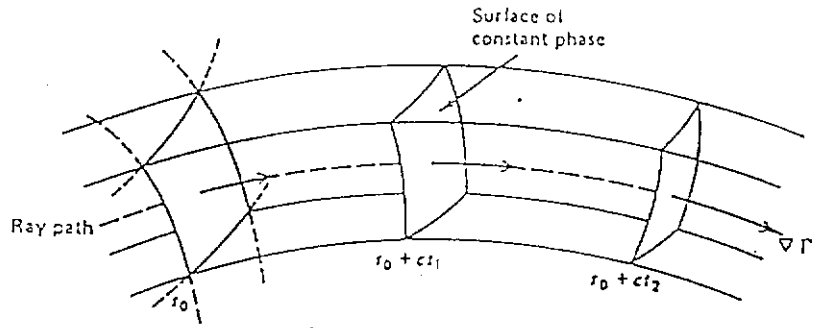


Fig. 3.1. Rappresentazione di $\nabla\Gamma$ (Kinsler 1982).

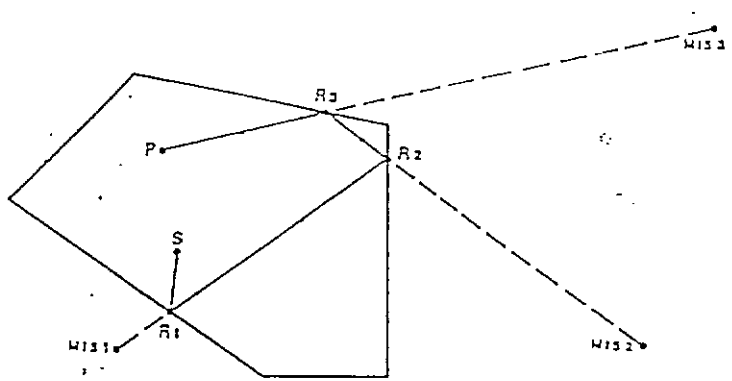


Fig. 3.2. Esempio di ricostruzione di una sorgente virtuale del terzo ordine (Stephenson 1990).

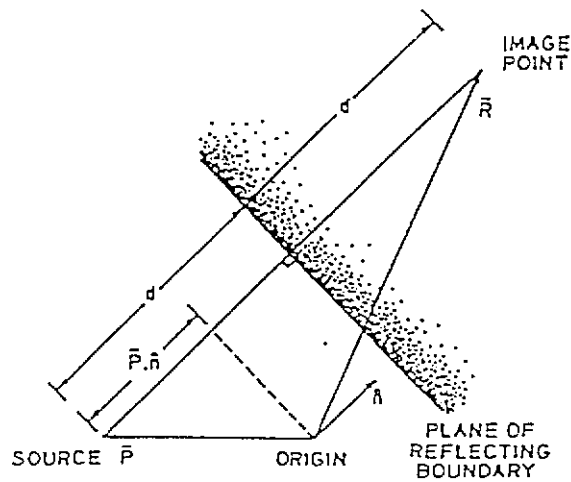


Fig. 3.3. Determinazione della posizione di una sorgente virtuale (Borish 1984).

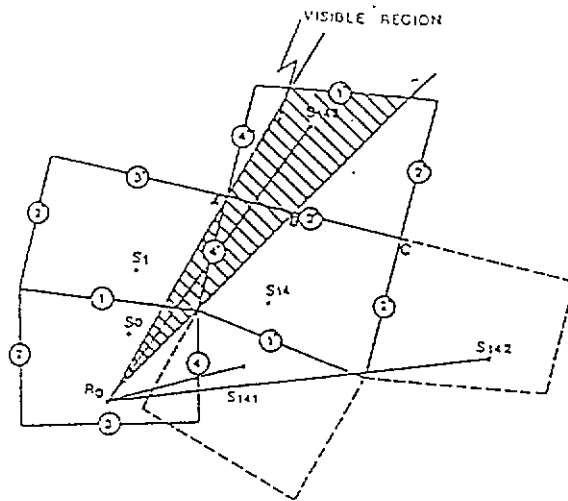


Fig. 3.4. Test di visibilità per le sorgenti virtuali (Vorländer 1989).

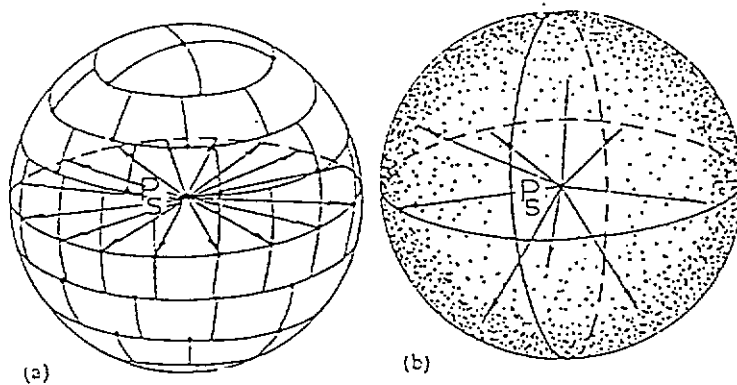


Fig. 3.5. Legge di distribuzione dei raggi sonori nello spazio (Kulowski 1985).

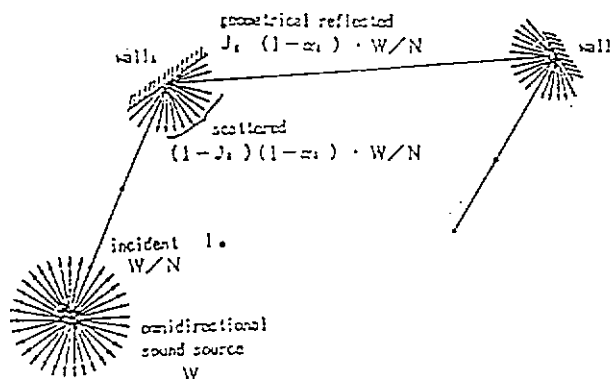


Fig. 3.6. Modello di riflessione speculare e diffusa del ray tracing modificato (Nakagawa 1993)

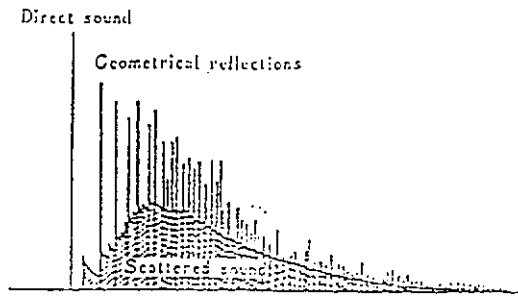


Fig. 3.7. Andamento del decadimento sonoro ricevuto (Nakagawa 1993).

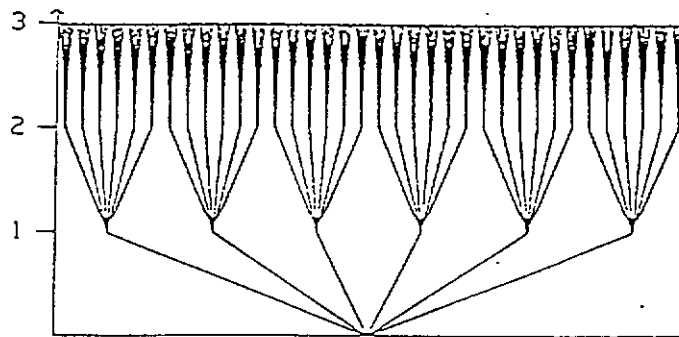


Fig. 3.8. Albero logico per la costruzione geometrica delle sorgenti immagine; $K_0 = 6$ (Stephenson 1990).

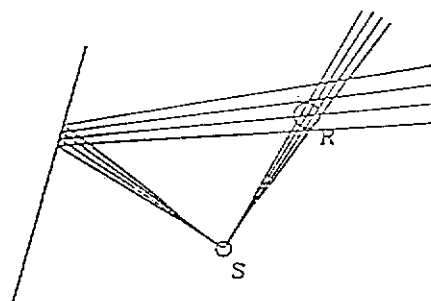


Fig. 3.9. Esempio di captazione multipla (Lehnert 1993).

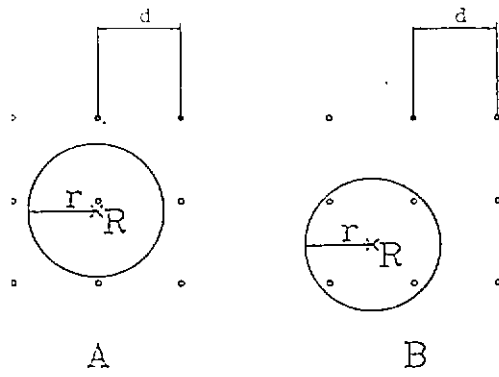


Fig. 3.10. Esempio di captazione variabile (Lehnert 1993).

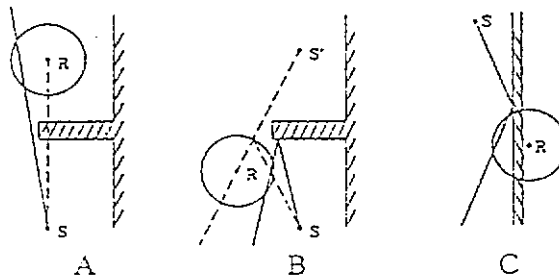


Fig. 3.11. Esempi di captazione non valida. A: la sorgente sonora è schermata. B: il punto di riflessione non giace sulla superficie. C: il ricevitore è dietro il muro. Da (Lehnert 1993).

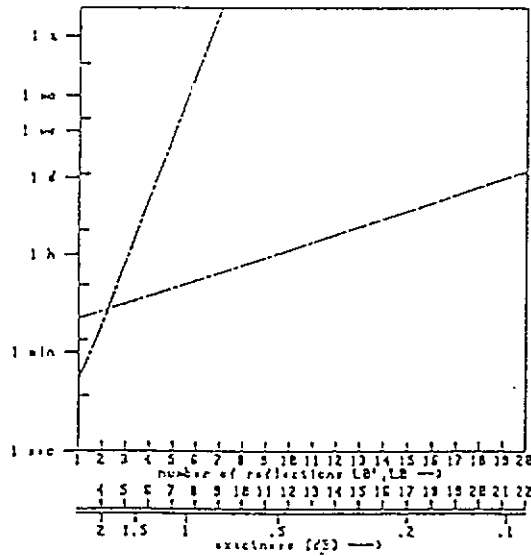


Fig. 3.12. Tempo di calcolo e precisione in funzione del massimo ordine di riflessioni L_0 . Linea a punto singolo: sorgenti virtuali; linea a doppio punto: ray tracing (Stephenson 1990).

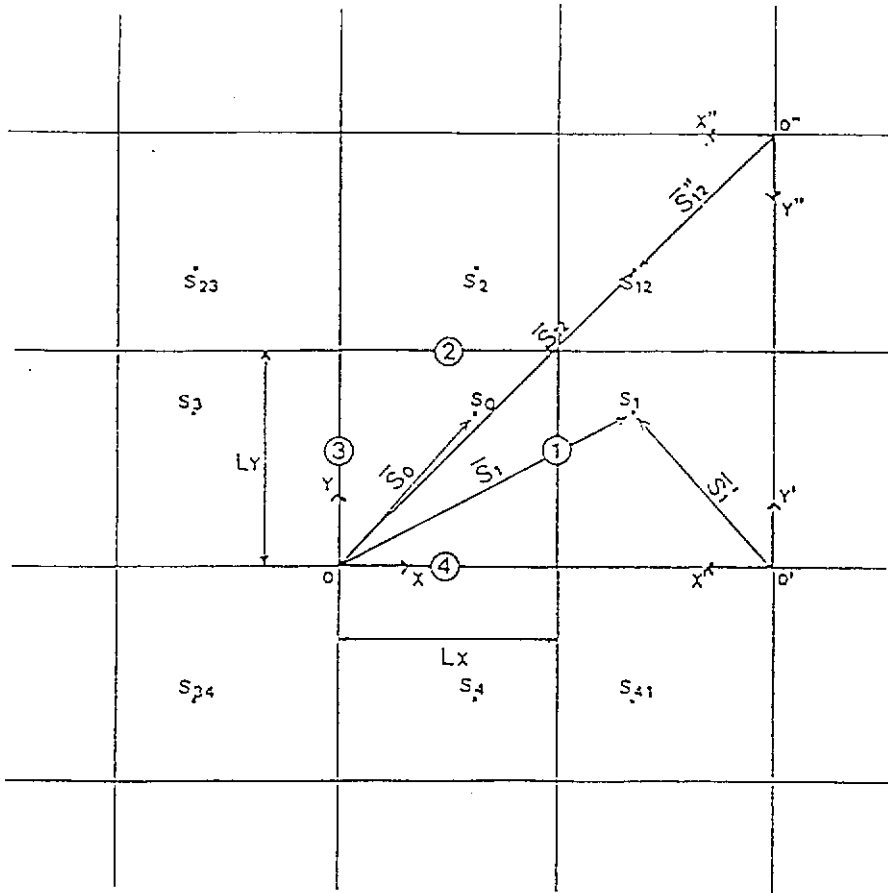


Fig. 3.13. Sorgenti virtuali e sistemi di riferimento virtuali in un ambiente rettangolare (Lee e Lee 1988).

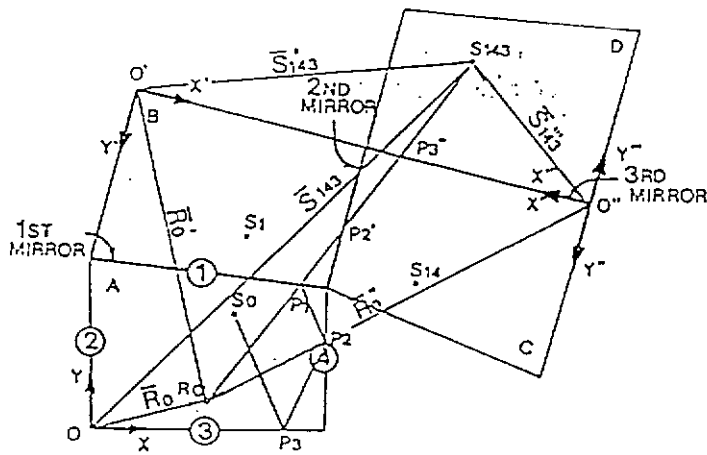


Fig. 3.14. Determinazione di una sorgente immagine del terzo ordine e del percorso del raggio relativo (Lee e Lee 1988).

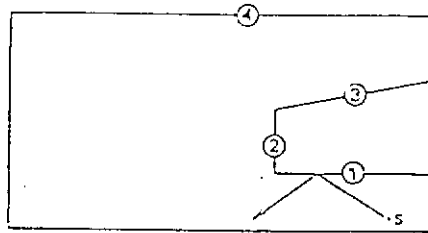


Fig. 3.15. Test di visibilità (Lee e Lee 1988).

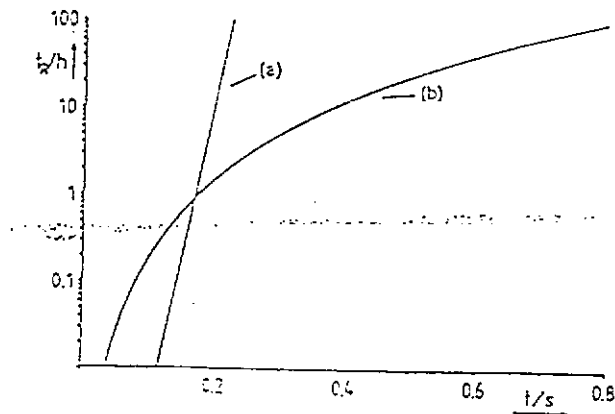


Fig. 3.16. Tempo di elaborazione in ore su di un PC in funzione della lunghezza della risposta all'impulso. (a) modello a sorgenti virtuali classico; (b) modello misto di Vorländer (1989).

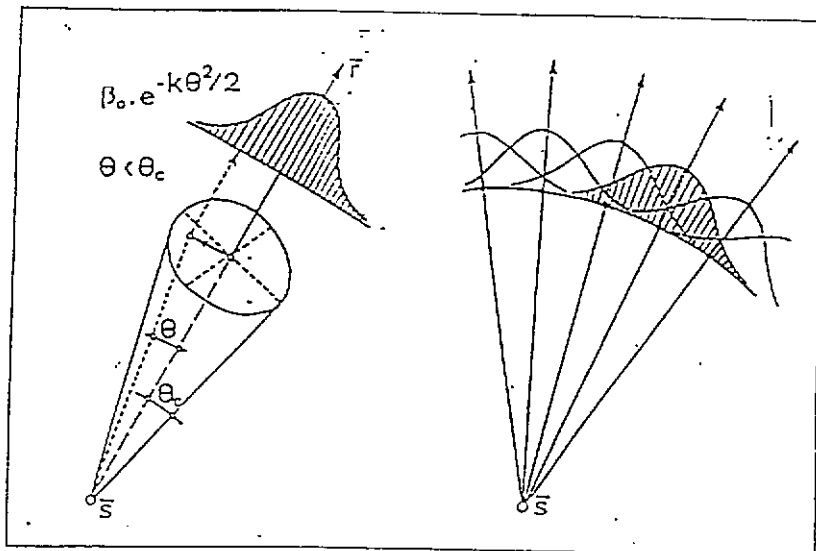


Fig. 3.17. Fasci con distribuzione gaussiana dell'energia e loro sovrapposizione (Van Maercke e Martin 1993).

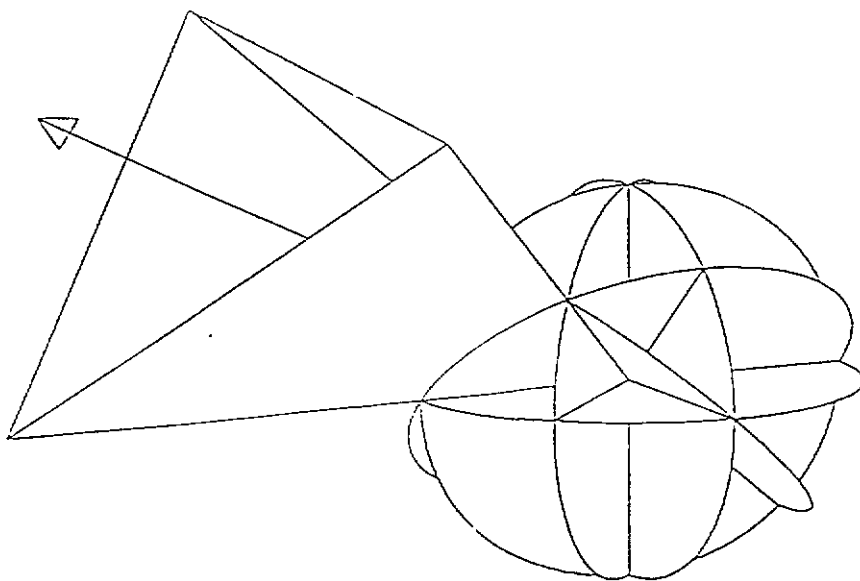


Fig. 3.18. Emissione di fasci piramidali divergenti da una sorgente omnidirezionale.

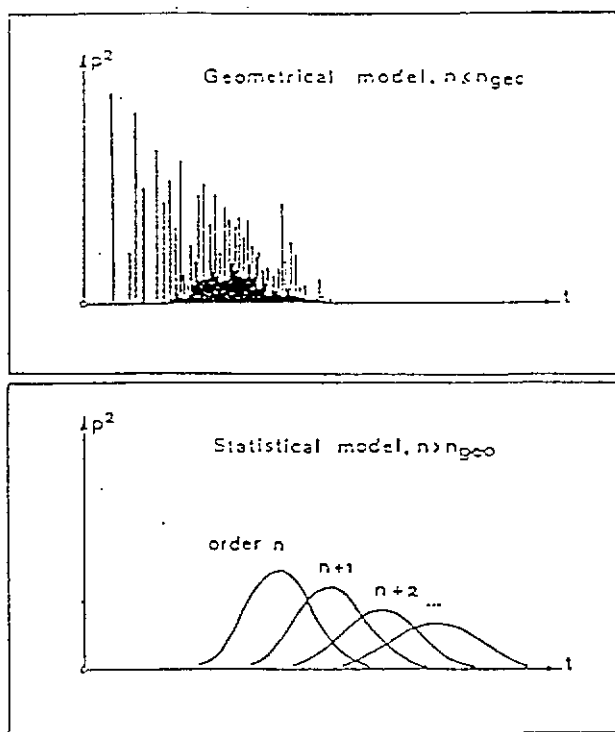


Fig. 3.19. Separazione delle prime riflessioni e della coda riverberante in funzione dell'ordine delle riflessioni (Van Maercke e Martin 1993).

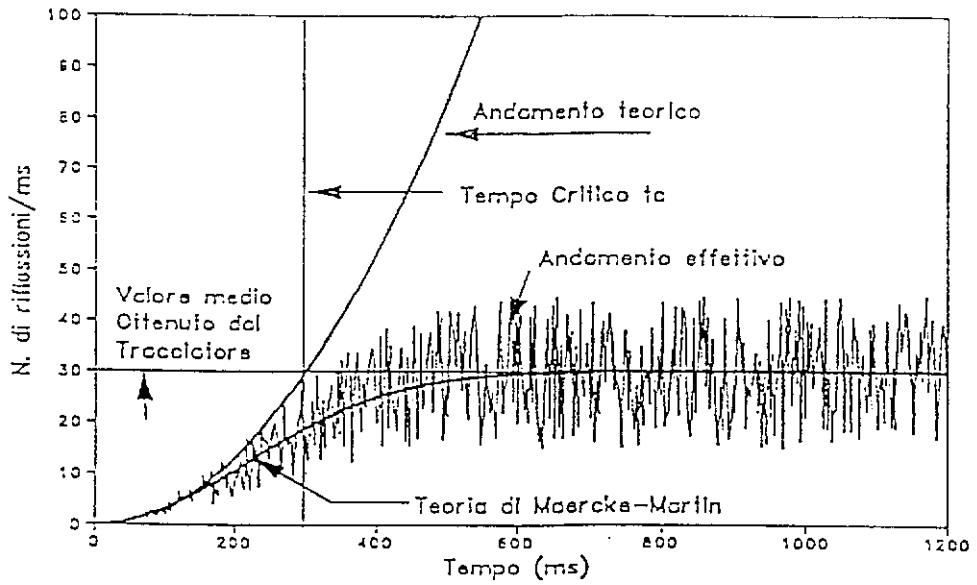


Fig. 3.20. Andamento nel tempo del numero di captazioni.

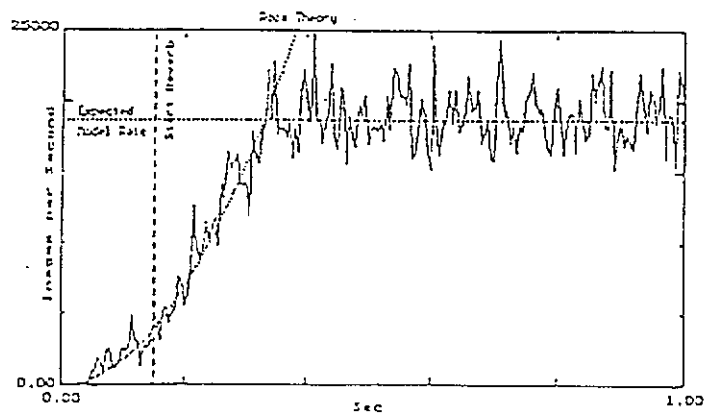


Fig. 3.21. Diagramma modificato della densità delle riflessioni (Naylor 1993)

4 MODELLI IN SCALA

4.1 Vantaggi e limiti dei modelli in scala

Per prevedere il campo acustico all'interno di un ambiente, il metodo più diffuso è quello della simulazione numerica. Una diversa alternativa è costituita dall'utilizzo di modelli fisici in scala ridotta, che permettono di rappresentare in maniera semplificata e per certi versi complementare all'approccio numerico i fenomeni fisici essenziali. Secondo questa tecnica, che è nata prima ancora dell'avvento del computer, il comportamento acustico dell'ambiente viene indagato per analogia con un diverso fenomeno fisico, quale la propagazione della luce o delle onde di superficie di un liquido, oppure viene studiato grazie ad un semplice modellino in scala ridotta (in genere da 1:10 a 1:100) che riproduce solo le caratteristiche che interessano, evitando le complicazioni teoriche e gli oneri economici di uno studio diretto del caso reale.

I principali vantaggi della tecnica dei modelli fisici in scala sono i seguenti (Cremer 1982), (Pinnington 1993):

- 1) sono sufficienti modelli in scala ridotta, molto semplificati rispetto alla situazione reale e poco costosi.
- 2) A volte sono sufficienti anche modelli parziali, o modelli bidimensionali dell'ambiente reale proiettato in pianta e in sezione, in quanto interessano solo le prime riflessioni provenienti da poche, ben individuate superfici.
- 3) In molti casi il modellino viene comunque costruito per ragioni architettoniche (o di reperimento dei finanziamenti); con un minimo di accorgimenti, lo stesso modello può servire anche per le prove acustiche preliminari.
- 4) Spesso la visualizzazione di certi fenomeni (si pensi per esempio alla ricerca dell'orientamento di un riflettore acustico mediante un modello luminoso) risulta più chiara e naturale tramite un modello fisico che tramite mappe a falsi colori di indici convenzionali.
- 5) Spesso è più facile esaminare molte varianti di uno stesso progetto tramite pochi aggiustamenti su di un modello in scala che ripetendo ogni volta lunghe elaborazioni numeriche.

Come tutte le tecniche, anche quella dei modelli in scala presenta degli svantaggi; i principali sono legati al fatto che più il modello è piccolo, più il campo di frequenze dell'udibile viene traslato, in base ai criteri di similitudine, verso le alte frequenze (cfr. 4.5.2); pertanto:

- 1) è difficile riprodurre correttamente, cioè secondo gli opportuni criteri di similitudine, l'impedenza acustica delle superfici reali; ciò porta ad una modellizzazione distorta dei fenomeni di assorbimento, riflessione, diffusione acustica.
- 2) E' difficile realizzare sorgenti e trasduttori in scala ridotta con caratteristiche analoghe a quelle della situazione reale.
- 3) Nel caso dei modelli acustici propriamente detti (cfr. poi) l'assorbimento del suono nell'aria diventa eccessivamente rilevante.

Le principali tecniche basate su modelli fisici in scala sono le seguenti (Cremer 1982):

- metodo ottico dei raggi luminosi;
- metodo delle onde sulla superficie di un liquido;
- metodo ottico Schlieren, o strioscopico;
- metodo dei modelli acustici in scala.

Dei primi tre verrà dato un breve cenno mentre del quarto verrà fornita una trattazione più approfondita poiché è quello che nel corso del tempo ha avuto le maggiori applicazioni.

Esistono anche delle tecniche miste che utilizzano i dati rilevati su modelli in scala per ottenere, mediante successive elaborazioni matematiche e di trattamento dei segnali, altri parametri acustici non direttamente ottenibili.

L'uso di un modello in scala deve risultare vantaggioso sia sotto il profilo della semplicità d'impiego, sia sotto quello economico, rispetto ad un analogo studio sull'edificio reale; inoltre, il modello deve riprodurre correttamente i fenomeni fisici oggetto di studio. Quest'ultima condizione viene garantita dal rispetto di opportuni criteri di similitudine, che possono essere ricavati solo da una accurata analisi teorica preliminare 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; ciò corrisponde a non imporre alcun criterio di similitudine sulle condizioni al contorno del campo acustico. Se, viceversa, si intende studiare la riverberazione all'interno di una cavità, occorre non solo riprodurre il campo acustico, ma anche rispettare accuratamente le condizioni al contorno sulle pareti, poiché il fenomeno studiato dipende largamente da esse. La condizione di similitudine principale che deve essere soddisfatta in tutti i modelli fisici è la similitudine geometrica, e cioè tra le varie parti del modello fisico utilizzato devono sussistere gli stessi rapporti geometrici che sussistono tra le corrispondenti parti della struttura reale. Altre condizioni di similitudine dipendono dal metodo utilizzato e verranno menzionate caso per caso.

4.2 Metodo ottico dei raggi luminosi

Il principio del metodo è costituito dalla stretta analogia tra l'approssimazione geometrica della propagazione sonora ad alte frequenze e l'ottica geometrica; nel limite in cui si può pensare che il suono si propaghi mediante raggi sonori, si può anche pensare di sostituire a questi opportuni raggi di luce, che sono facilmente visualizzabili. L'unica differenza di principio sussiste tra l'estensione dei due campi di frequenze, acustico ed ottico.

In pratica, nel modello in scala la sorgente sonora viene rappresentata da una sorgente luminosa. Le condizioni richieste, oltre alla similitudine geometrica, sono:

- 1) le superfici acusticamente riflettenti devono essere rese nel modello riflettenti alla luce; si impiegano rivestimenti di fogli di alluminio, vernici riflettenti o si costruisce direttamente il modello con fogli metallici.
- 2) Le superfici acusticamente fonoassorbenti devono essere rese nel modello otticamente non riflettenti (nere).

Se interessano singoli raggi o riflessioni si impiega una sorgente a fascio stretto (i risultati migliori si ottengono con apparati laser). Se interessa il comportamento di una superficie intera si utilizzano apparecchi con proiettori che illuminino tutta e sola quella superficie.

Tale metodo risulta molto efficace nello studio dei riflettori acustici, che si rendono necessari quando pareti laterali e soffitto non sono in grado di rinviare energia sufficiente verso l'auditorio ed è necessario rinforzare il suono là dove arriva più debole. Gli stessi risultati si potrebbero ottenere anche applicando i principi dell'ottica geometrica su un disegno in scala, ma il modello fisico è più rapido da usare, molto più flessibile (per esempio quando il piano dei riflettori è obliquo rispetto sia alla pianta che alla sezione), e fornisce una buona visione d'insieme del risultato (fig. 4.1).

L'uso di raggi luminosi consente inoltre di individuare rapidamente la presenza di eventuali zone d'ombra e di focalizzazione dell'onda sonora.

Alcuni tentativi di ricavare dai modelli a raggi luminosi anche informazioni sulla distribuzione dell'intensità sonora incidente in base all'illuminamento delle superfici hanno avuto un esito incerto, a causa della grande diversità tra riflessione sonora e riflessione ottica in funzione dell'angolo di incidenza (Vermeulen 1936).

Un difetto tipico di questi modelli è l'impossibilità di ricavare mediante raggi che si propagano alla velocità della luce i tempi di ritardo tra le varie riflessioni; pertanto risultano non valutabili l'ITDG o l'eventuale presenza di echi. Solo recentemente, sfruttando tecniche fotografiche e fotometriche avanzate e

ricevitori a fotocellula è stato possibile ricostruire stime affidabili dei tempi di ritardo e della chiarezza C_{80} dall'intensità relativa delle varie sorgenti virtuali (Pinnington 1993).

In ogni caso con un modello a raggi luminosi è impossibile misurare il tempo di riverberazione. Anche un'analisi in frequenza risulta impraticabile.

Poiché la lunghezza d'onda della luce utilizzata è estremamente piccola, è chiaro che i modelli a raggi luminosi non possono rendere conto di fenomeni tipicamente ondulatori, come la diffrazione, e quindi non possono essere usati per predire il comportamento dei suoni a bassa frequenza

4.3 Metodo delle onde sulla superficie di un liquido

Si tratta di modelli molto semplici ed intrinsecamente bidimensionali, da lungo tempo utilizzati per studi non particolarmente complessi. Michel (1921) riferisce le esperienze di acustica architettonica compiute in questo modo da Scott Russel nel 1843.

In pratica, si procede realizzando contenitori piani con pareti laterali sagomate in modo tale da riprodurre in scala le sezioni o la pianta della sala. All'interno di essi viene posto un liquido, generalmente acqua. Per simulare le superfici fonoassorbenti si possono utilizzare striscie di feltro o altro materiale poroso cuneiforme posto lungo le pareti del modello. La sorgente può essere simulata con un dispositivo meccanico, alterando lo stato di quiete del liquido o facendo cadere delle gocce di liquido nel punto corrispondente alla sorgente reale. Le onde generate ed i fenomeni di riflessione, interferenza e diffrazione che si generano possono essere osservati direttamente sulla superficie del liquido oppure illuminando dal basso il contenitore (che in questo caso deve essere trasparente) e osservando le zone più chiare e le zone più scure; in questo caso lo spessore ottimale del liquido è di $7 \div 8$ mm (Michel 1921).

Poiché la velocità di propagazione delle onde sulla superficie del liquido è molto più lenta rispetto alla velocità del suono, queste possono essere seguite facilmente a vista e ciò rende il metodo particolarmente adatto alle dimostrazioni. Risulta possibile distinguere riflessioni successive e fotografare la situazione a diversi intervalli di tempo (fig. 4.2).

Una delle difficoltà tipiche del metodo è la differenza di velocità dei fronti d'onda sulla superficie del liquido in funzione della lunghezza d'onda (dispersione). Ciò può originare diversi fronti d'onda anche se si provoca un solo impulso. La velocità di questi sulla superficie di un liquido dipende infatti da due fattori: forze di gravità, che crescono con la lunghezza d'onda e che tendono quindi a far viaggiare più velocemente le onde lunghe; forze di tensione superficiale, che crescono all'aumentare della curvatura e quindi al diminuire della lunghezza d'onda e che tendono quindi a far viaggiare più velocemente le onde corte. Fortunatamente le onde prodotte in questi modelli alle scale usuali si trovano all'incirca nel campo intermedio dove i due fenomeni si equilibrano e quindi tendono ad essere non troppo dispersive.

I modelli a onde di superficie rappresentano efficacemente la diffrazione del suono se vengono rispettati opportuni rapporti di scala. Le lunghezze delle onde sulla superficie del liquido è di circa $10 \div 20$ mm, mentre se si considerano rappresentative per il suono frequenze di $300 \div 1000$ Hz, si hanno lunghezze d'onda di circa $1 \div 0,3$ m. Utilizzando quindi modelli in scala 1:50 o 1:100 si può ottenere la similitudine dei campi ondulatori (Cremer 1982).

4.4 Metodo ottico Schlieren o strioscopico

Questo metodo è basato su una tecnica ottica (Schlieren) utilizzata da Toepler fin dal 1864 per visualizzare gradienti di densità nei fluidi (Cremer 1982). Sembra che la prima applicazione all'acustica degli ambienti chiusi risalga al 1912, ad opera di W.C. Sabine (1924).

La tecnica consiste nella costruzione di un modello bidimensionale simile a quelli utilizzati con le onde d'acqua, dove ora però si producono onde sonore in aria. Il fondo del modello deve essere trasparente. Facendo passare un fascio di raggi luminosi paralleli perpendicolarmente alla direzione del campo sonoro, ogni fronte d'onda causa rifrazione della luce e si possono osservare due righe, una luminosa ed una scura. L'immagine del fronte d'onda che viaggia alla velocità del suono è molto nitida (fig. 4.2). Per avere un fronte d'onda ben definito, l'emissione sonora deve essere un impulso forte e di breve durata; in genere si utilizza una scintilla. Un'eventuale camera fotografica deve essere sincronizzata con la scintilla.

Il metodo Schlieren condivide vantaggi e svantaggi del metodo delle onde sulla superficie di un liquido; in particolare può essere utilizzato solo per lo studio in due dimensioni. A differenza però del metodo delle onde di superficie, con il metodo Schlieren non si ha dispersione dei fronti d'onda e quindi l'immagine risulta molto più chiara. Conviene inoltre utilizzare modelli più piccoli di circa un fattore 10, per evitare l'eccessiva influenza dell'attenuazione del suono nell'aria e della divergenza geometrica.

La chiarezza delle immagini Schlieren permette di studiare in dettaglio fenomeni di diffrazione e riflessione diffusa (fig. 4.3).

4.5 Metodo dei modelli acustici in scala

4.5.1 Generalità

La tecnica dei modelli acustici in scala è basata sulla costruzione di un ambiente in miniatura simile all'originale ma con tutte le dimensioni fisiche ridotte di un assegnato fattore di scala. Si cerca quindi di riprodurre nel modello un campo acustico tridimensionale analogo a quello del caso reale. Si perde la facilità di visualizzazione propria dei modelli a onde di superficie o Schlieren, ma si acquista la possibilità di misurare direttamente la pressione sonora in punti corrispondenti a quelli significativi nell'ambiente reale.

La fattibilità degli studi su modelli in scala con sorgenti e ricevitori elettroacustici miniaturizzati è stata dimostrata tra i primi da Spandöck (1934) e Jordan (1941). Successivamente i modelli in scala sono stati utilizzati soprattutto per applicazioni di acustica architettonica, ma hanno anche trovato impiego per lo studio della propagazione del rumore da traffico stradale, per l'organizzazione di ambienti di lavoro e uffici, ecc.

Tale tecnica, oltre alla costruzione dell'ambiente fisico in miniatura, comprende l'utilizzo di particolari sorgenti sonore e ricevitori per la simulazione del campo acustico reale.

In base alle specifiche applicazioni ed agli scopi prefissati possono essere fatte diverse semplificazioni sui modelli acustici in scala; comunque, la capacità di un modello di riprodurre in maniera più o meno approfondita i fenomeni fisici in gioco dipende dal rispetto dei criteri di similitudine.

4.5.2 Criteri di similitudine

Per la realizzazione di un modello in scala ci si deve rifare ai risultati dell'analisi dimensionale, la quale permette di definire i criteri di similitudine necessari e sufficienti per ogni sistema del quale siano note le equazioni fondamentali, anche se esse non sono esplicitamente risolubili.

Nel caso dei modelli acustici in scala devono essere soddisfatti i seguenti criteri di similitudine:

- 1) similitudine geometrica;
- 2) similitudine del campo acustico;
- 3) similitudine delle condizioni al contorno;
- 4) similitudine delle sollecitazioni.

La necessità del criterio di similitudine delle sollecitazioni dipende essenzialmente dalla origine delle sollecitazioni stesse; se per esempio si deve costruire il modello di una struttura chiusa vibrante, bisogna modellare correttamente la dinamica dell'intera struttura e quindi anche l'andamento delle sollecitazioni. Se viceversa la sollecitazione acustica proviene da sorgenti sonore interne al modello, è sufficiente rispettare localmente i primi tre criteri perché lo sia anche il quarto. Questo è il caso dei grandi ambienti teatrali o industriali, e verrà dunque qui approfondito.

Assumendo per semplicità il caso di una sollecitazione armonica nel tempo in una cavità a pareti uniformi, il campo acustico interno obbedisce all'equazione di Helmholtz:

$$\nabla^2 p + \left(\frac{\omega}{c}\right)^2 p = 0 \tag{4.1}$$

con la condizione al contorno sulle pareti:

$$\frac{\partial p}{\partial n} = -\rho_0 \omega \frac{p}{Z(\omega)} \tag{4.2}$$

dove:

- w = pulsazione dell'onda acustica [Hz];
- n = direzione normale alla superficie di contorno [m];
- c = velocità del suono nell'aria [m/s];
- ρ_0 = densità dell'aria [kg/m^3];
- $Z(\omega)$ = impedenza acustica specifica del contorno [Rayl]

Definendo le variabili adimensionali:

$$\nabla^{2*} = L^2 \nabla^2, \quad p^* = \frac{p}{p_0}, \quad n^* = \frac{n}{L}, \quad Z^*(\omega) = \frac{Z(\omega)}{\rho_0 c} \tag{4.3}$$

dove p_0 e L sono valori caratteristici di riferimento e introducendole nelle (4.1) e (4.2) si ottengono le nuove equazioni:

$$\nabla^{2*} p^* + \left(\frac{\omega L}{c}\right)^2 p^* = 0 \tag{4.4}$$

$$\frac{\partial p^*}{\partial n^*} = -\frac{\omega L}{c Z^*(\omega)} p^* \tag{4.5}$$

Affinché le (4.4) e (4.5) continuino a valere al variare della lunghezza caratteristica L, devono essere costanti i raggruppamenti adimensionali che in esse compaiono; si ottengono pertanto le due condizioni:

$$\frac{\omega L}{c} = \text{cost.} \tag{4.6}$$

$$\frac{\omega L}{c Z^*(\omega)} = \text{cost.} \tag{4.7}$$

La prima condizione sancisce la inversa proporzionalità fra la scala delle lunghezze e quella delle frequenze, altrimenti nota come Teorema di Savart. Essa impone il ricorso a frequenze molto elevate (spesso ultrasonore) nel modello e quindi determina il minimo rapporto di scala che può essere realizzato in pratica; infatti:

- non è possibile la realizzazione di modelli così piccoli da richiedere la traslazione ad un campo di frequenze talmente elevato da non poter essere studiato con le attuali strumentazioni (cfr. 4.5.4);
- alle alte frequenze l'assorbimento del suono nell'aria aumenta eccessivamente ed in maniera non lineare;
- alle alte frequenze la velocità del suono c varia fortemente ed in maniera non lineare.

Gli ultimi due inconvenienti sono tali per cui, anche disponendo di strumentazione adeguata, un modello troppo ridotto non fornirebbe una corretta risposta acustica. Essi possono essere in parte attenuati utilizzando gas diversi dall'aria (in genere azoto) o sottoponendo l'aria ad un processo di forte disidratazione (umidità relativa del 2% per modelli in scala 1:10). Si riesce così ad ottenere una discreta similitudine in un sufficiente campo di frequenze, ma con costi economici e difficoltà operative non indifferenti. Un metodo più raffinato ma poco usato è quello della compensazione elettronica.

La seconda condizione, eq. (4.7), implica che per realizzare la corretta riproduzione delle superfici di contorno è necessario conservare la similitudine dell'impedenza acustica specifica normalizzata $Z^*(\omega)$ passando al campo di frequenze ultrasonore del modello. Poiché l'impedenza acustica specifica varia fortemente con la frequenza, non è possibile utilizzare i materiali presenti nell'ambiente reale; bisogna quindi selezionare materiali particolari che, alle alte frequenze utilizzate nel modello, abbiano la stessa impedenza acustica specifica normalizzata dei materiali utilizzati nell'ambiente reale alle frequenze ordinarie. In pratica ciò è più facile di quanto sembri; per esempio, in un auditorium la maggior parte delle superfici sono acusticamente riflettenti e possono essere facilmente riprodotte; l'area più fonoassorbente è quella della platea (occupata) che può essere simulata ricostruendone le caratteristiche fisiche e provando diversi materiali porosi.

4.5.3 Scelta del rapporto di scala

Il rapporto di scala μ è il reciproco della costante della condizione di similitudine (4.6). Cioè, indicando con il pedice m le grandezze relative al modello:

$$\frac{\omega_m L_m}{c_m} = \frac{\omega L}{c} = \frac{1}{\mu} \quad (4.8)$$

Se, come spesso avviene, il modello è riempito d'aria, $c_m = c$ e la condizione di similitudine si riduce ad una trasformazione del campo di frequenza:

$$\frac{\omega_m}{\omega} = \frac{L}{L_m} = \frac{1}{\mu} \quad (4.9)$$

I rapporti di scala utilizzati in pratica variano approssimativamente da $\mu = 1:10$ a $\mu = 1:100$, in funzione della natura delle misure che si vogliono realizzare.

Quando si cominciò ad utilizzare queste tecniche di valutazione acustica, furono realizzati modelli che avevano rapporti di scala molto piccoli (per esempio 1:100 o più). Questi però avevano un impiego assai limitato e normalmente non si poteva andare oltre lo studio delle prime riflessioni a causa della direzionalità dei trasduttori acustici e dell'assorbimento del suono nell'aria.

Per ampliare l'applicabilità dei modelli si è dovuto progressivamente ricorrere a rapporti di scala sempre maggiori, fino ad utilizzare modelli in scala 1:20, 1:10 e 1:8 per poter eseguire con precisione tutte le misure che si possono fare in una sala reale, compresi i test psicosoggettivi (Barton 1983).

Per misurazioni oggettive complete bisogna rispettare entrambe le condizioni di similitudine (4.6) e (4.7) e registrare le risposte all'impulso, elaborando le quali possono essere ottenuti ITDG, tempo di riverberazione, frazioni energetiche, ecc. (Barron 1979).

Per valutazioni psicosoggettive si diffonde un brano musicale all'interno del modello, accelerando la riproduzione di un fattore pari al reciproco $1/\mu$ del rapporto di scala, in modo da spostare l'emissione nel corretto campo di alte frequenze. La risposta dell'ambiente viene captata da sensori miniaturizzati e registrata alla stessa elevata velocità $1/\mu$. L'ascolto avviene a velocità normale, cioè rallentata di un fattore μ rispetto alla registrazione, in modo da ripristinare il campo di frequenze originario.

Numerosi laboratori, tra i quali quelli della BBC (1975) e dell'Università di Cambridge (Barron 1983) hanno applicato estesamente queste tecniche di valutazione psicosoggettiva mediante le quali è possibile simulare in fase di progetto ciò che verrebbe ascoltato nella sala reale ed effettuare eventuali modifiche qualora i risultati non fossero soddisfacenti. Jordan (1970, 1980) le applicò allo studio preliminare della Sydney Opera House. Le simulazioni così ottenute possono essere abbastanza soddisfacenti, anche se esiste il problema delle notevoli distorsioni introdotte dalle apparecchiature utilizzate.

Malgrado il grande interesse di questi studi su modelli a piccolo rapporto di scala, esiste un certo numero di limiti che ne restringe l'uso. Infatti, l'ingombro del modello, i costi, l'applicabilità ristretta a casi molto specifici, fanno sì che essi siano utilizzati solamente per progetti di una certa importanza. Nel corso degli anni si è invece andato affermando l'uso di modelli acustici in scala 1:50. Secondo Barron (1983), essi sono poco ingombranti, molto flessibili e permettono studi oggettivi completi. In pratica, essi sono il miglior compromesso tra la semplicità dei modelli in scala 1:100 e l'accuratezza dei modelli in scala 1:10.

4.5.4 Strumentazione per modelli acustici in scala

4.5.4.1 Sorgente sonora

La scelta della sorgente dipende dal tipo di ricerca da effettuare. In genere si utilizzano sorgenti di rumore impulsivo, ma possono essere utilizzati anche altoparlanti o altri trasduttori elettroacustici miniaturizzati in grado di riprodurre brani musicali o parlato.

La tecnica più frequentemente utilizzata consiste nell'impiego di scintille elettriche per generare impulsi sonori contenenti energia fino a circa 100 kHz (corrispondenti a 2 kHz in un modello in scala 1:50). La sorgente è in genere composta da due circuiti, dei quali l'uno destinato alla generazione della scintilla e l'altro all'innesco della stessa. Fra gli elettrodi del primo circuito è presente una differenza di potenziale elevata, ma non sufficiente a dar luogo alla scintilla. Attraverso lo scocco di una scintilla minore fra uno dei due elettrodi primari e quello del circuito di eccitazione si provoca la ionizzazione dell'aria presente. In conseguenza di ciò aumenta la conducibilità elettrica dell'aria e quindi si ha lo scocco fra gli elettrodi principali. Attraverso un circuito collegato ad un generatore di alta tensione, ad un accumulatore e ad un regolatore di potenza è possibile variare entro un certo intervallo anche la potenza emessa dalla sorgente. Il meccanismo di generazione è semplice, ma è anche influenzato dalle caratteristiche costruttive, dal grado di pulizia e conservazione degli elettrodi, dall'umidità dell'aria, ecc.

Quanto più il processo di emissione della scintilla avviene rapidamente, tanto più tale sorgente potrà essere assimilata ad una sorgente impulsiva di tipo ideale. In fig. 4.4 sono riportate le risposte all'impulso di tre sorgenti comunemente utilizzate in campo acustico: il colpo di pistola, l'altoparlante e la scintilla. Il transitorio più breve è quello della scintilla e questo garantisce anche uno spettro di emissione esteso verso le alte frequenze, caratteristica essenziale per l'esecuzione di misure su modelli in scala.

4.5.4.2 Ricevitore

I trasduttori acustici che vengono normalmente utilizzati come ricevitori sono piccoli microfoni elettrostatici, sensibili anche agli ultrasuoni, alimentati a batterie e con dimensioni tali da potere essere approssimati alla testa di una persona considerando rapporti di scala 1:50 o 1:100.

In certi casi può essere utilizzato con successo anche un idrofono, cioè un tipo di microfono particolarmente sensibile alle alte frequenze, nato per misure subacquee. Gli idrofoni hanno buone sensibilità e dinamica nel campo di frequenze adatto a rapporti di scala 1:50, ma, considerando il medesimo rapporto di scala, hanno dimensioni corrispondenti ad una zona di $1 \div 2$ m e non ad una singola persona.

In ogni caso si noti che la (4.8) implica anche che il campo di sensibilità del trasduttore venga amplificato di un fattore $1/\mu$, e ciò costituisce un requisito di per sé impegnativo.

4.5.4.3 Sistema di analisi dei dati

Per l'analisi dei segnali possono essere utilizzati tutti i tipi di apparecchiature, purché siano in grado di elaborare segnali in alta frequenza, almeno fino a 100 kHz per modelli in scala 1:50 o 1:100. E' utile che l'analizzatore sia in grado di eseguire in tempo reale numerose altre funzioni, tra le quali:

- equalizzazioni;
- filtraggio in frequenza;
- calcolo della risposta all'impulso quadrata;
- calcolo della risposta in frequenza (per esempio tramite FFT);
- calcolo di cross-correlazioni e autocorrelazioni;
- calcolo del tempo di riverberazione (per esempio con il metodo dell'integrazione all'indietro di Schroeder);
- memorizzazione dei dati;
- trasmissione dei dati ad altri dispositivi.

4.5.5 Ripetibilità e riproducibilità

La ripetibilità delle misurazioni su modelli acustici in scala ridotta dipende dai seguenti fattori.

- 1) Possibilità di riposizionare sorgente e microfono nei medesimi punti di misura (date le piccole dimensioni della scintilla e della membrana del microfono, spesso spostamenti dell'ordine del millimetro possono influenzare il risultato (Cocchi 1990).
- 2) Possibilità di orientare sorgente e ricevitore nelle direzioni richieste (il problema non sussiste qualora si disponga di sorgenti e microfoni omnidirezionali).
- 3) Possibilità di disporre di un generatore di alta tensione e di una sorgente in grado di garantire una emissione sempre costante e poco influenzata dalla tensione di rete;
- 4) Assenza di disturbi, in particolare di disturbi elettromagnetici.

La riproducibilità delle misurazioni dipende, oltre che dai fattori nominati a proposito della ripetibilità, anche dal tipo di strumentazione adottata:

- 5) sorgente (per direzionalità, transitorietà, spettro di emissione);
- 6) ricevitore (per direzionalità, dimensioni, risposta in frequenza);
- 7) analizzatore (per massima frequenza di campionamento, possibilità di finestra temporale, capacità di filtraggio).

Soltanto ponendo molta attenzione a tutti questi elementi è possibile mantenere sufficienti valori di ripetibilità e riproducibilità delle misurazioni.

4.6 Tecniche miste

La combinazione di modelli fisici e modelli matematici consente di pervenire alla stima del valore di numerosi parametri di difficile determinazione fisica. La precisione che si ottiene è in generale superiore a quella derivante da studi su modelli matematici puri.

Si supponga di misurare delle risposte all'impulso su di un modello fisico in scala. Considerando solo la similitudine del campo acustico, ma non delle condizioni al contorno, le uniche informazioni ricavabili direttamente sono i valori di ITDG e l'eventuale presenza di echi. Se però i risultati delle rilevazioni vengono sottoposti, sulla base di una perfetta conoscenza dei materiali di rivestimento interno, a successive elaborazioni è altresì possibile determinare il livello sonoro, la risposta in frequenza e il tempo di riverberazione nelle varie posizioni.

Infatti, ogni diagramma di risposta all'impulso contiene un certo numero di picchi, dai quali, tramite considerazioni geometriche, è possibile risalire al percorso delle onde che li hanno generati. Attraverso la conoscenza dei materiali che compongono il modello e dei corrispondenti materiali reali si può operare una modifica dell'intensità dei vari picchi. Determinati i valori dei picchi reali si procede alla ricostruzione della risposta all'impulso teorica.

Il livello sonoro nel punto desiderato si determina attraverso la somma dei contenuti energetici di ogni picco.

La determinazione della risposta in frequenza è più laboriosa. La procedura è la stessa, ma occorre tenere conto dell'andamento del coefficiente di assorbimento acustico dei materiali in funzione della frequenza, dello spettro di emissione della sorgente e della risposta in frequenza del microfono.

Il tempo di riverberazione può essere calcolato mediante integrazione all'indietro delle risposte all'impulso stimate reali.

In linea di principio è possibile determinare anche la IACC, ma in tal caso occorre effettuare rilevazioni binaurali. La difficoltà consiste nel disporre di una testa artificiale microscopica.

La procedura di ricostruzione accennata richiede pesanti elaborazioni numeriche, basate su tecniche di deconvoluzione dei segnali e ripetute trasformate di Fourier, dirette ed inverse, ed è quindi possibile solo con l'ausilio di un computer e comunque notevolmente laboriosa.

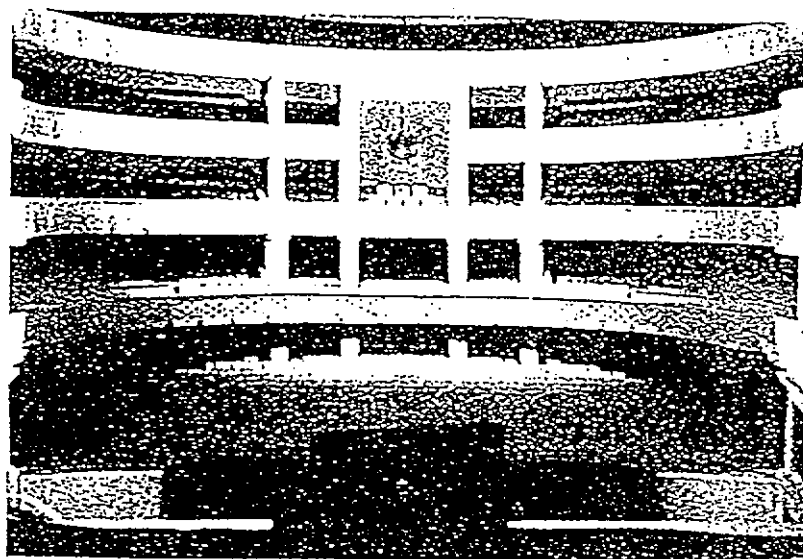


Figura 4.1. Studio ottico su modello delle riflessioni dal soffitto sferico di un teatro. La luce diretta dalla sorgente (posta al centro del palcoscenico) è schermata sia rispetto all'osservatore che all'area della platea (Cremer 1982).

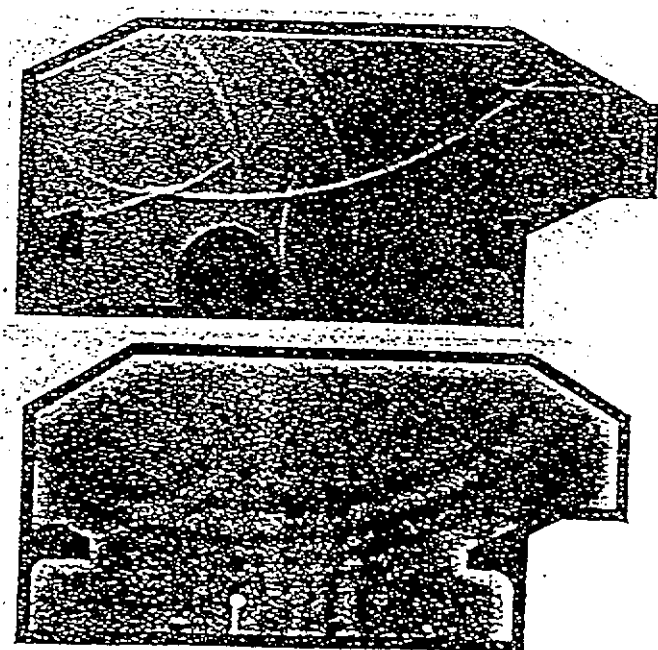


Figura 4.2. Fotografie di un modello a onde superficiali (sotto) e di un modello Schlieren (sopra) per la stessa sala e nello stesso istante (Cremer 1982).

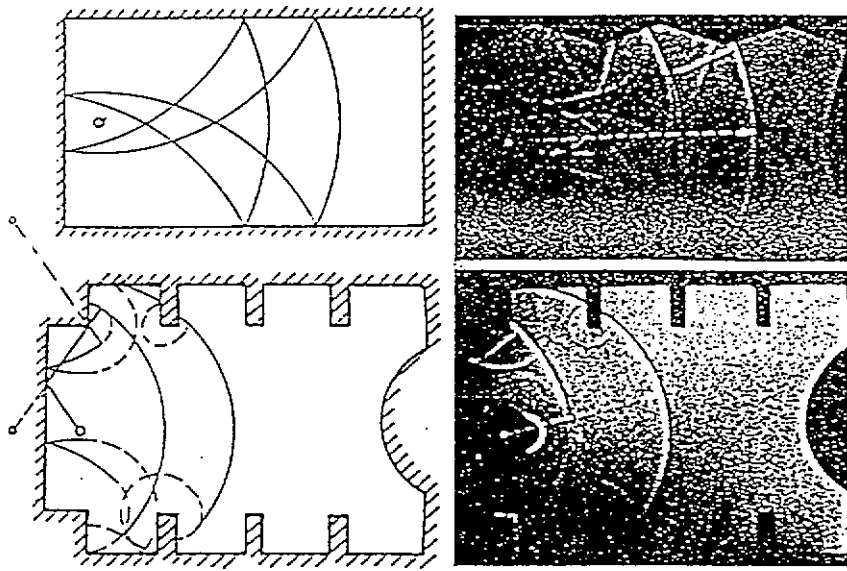


Figura 4.3. Costruzione geometrica dei fronti d'onda (a sinistra) e fotografie Schlieren (a destra) di due modelli con pareti laterali molto movimentate (Cremer 1982).

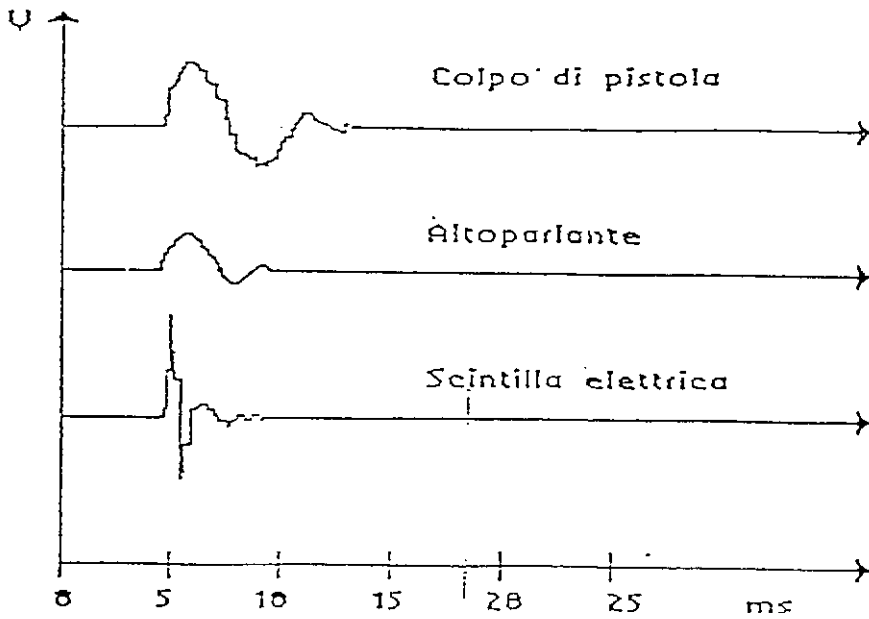


Figura 4.4. Risposte all'impulso di tre tipi di sorgente: a) colpo di pistola; b) altoparlante; c) scintilla elettrica.

5 LINEE GUIDA PER LA PROGETTAZIONE

5.1 Introduzione

In generale, si può affermare che l'acustica è stata a lungo sottovalutata e trascurata nella progettazione. Infatti, il tradizionale processo di progettazione parte da considerazioni architettoniche e di statica; solo in seguito, e non sempre, vengono tenute in conto le pur importanti esigenze di comfort termigrometrico; quasi mai vengono valutate le implicazioni acustiche delle scelte progettuali, forse anche per supposte difficoltà di comprensione dell'argomento e mancanza di validi strumenti operativi. I risultati sono sotto gli occhi di tutti: moderne e costose sale per spettacolo che suscitano le proteste degli utenti, abitazioni piene di rumori molesti e invadenti, ambienti di lavoro che contribuiscono a portare la dose di rumore subita dagli addetti a livelli intollerabili.

Negli ultimi anni sono però emersi diversi elementi che possono contribuire a risolvere questo problema. In primo luogo, è ormai maturata la coscienza che un'acustica adeguata è uno dei requisiti essenziali di un edificio; sono quindi stati sviluppati studi, leggi e norme - come specificato in altre parti di quest'opera - che permettono di stabilire chiaramente gli obiettivi che la progettazione deve ottenere. Inoltre, lo sviluppo parallelo di nuove formulazioni delle tradizionali teorie acustiche e di computer sempre più potenti, hanno reso disponibili codici di calcolo in grado di assistere validamente il progettista.

Avendo presentato nella prima parte di questo capitolo gli strumenti operativi, rimangono ora da fornire alcuni suggerimenti sul modo più appropriato di impiegarli.

5.2 La progettazione acusticamente orientata

Nel processo di progettazione tradizionale, i problemi di acustica vengono affrontati con ritardo, quando ormai la forma dell'involucro ed i materiali che lo costituiscono sono determinati in modo irreversibile. Una progettazione più attenta dovrebbe invece considerare le esigenze acustiche fin dall'inizio, nel momento in cui vengono esplicitamente formulati i requisiti a cui il prodotto finale, cioè l'edificio, deve conformarsi. L'acustica dovrebbe cioè rientrare in quella fase di formulazione programmatica che costituisce la prima fase di ogni progetto ben riuscito.

La procedura di considerazione dei requisiti acustici nel processo di progettazione può essere suddivisa in più passi.

In fase di programmazione occorre semplicemente specificare la vocazione funzionale dell'edificio: ambiente di lavoro, abitazione o sala per spettacolo. Ciò consente di individuare i parametri oggettivi che permetteranno di quantificare la qualità acustica dell'opera.

Se si tratta di un ambiente di lavoro, di tipo industriale, artigianale o assimilabile, l'obiettivo primario è quello di contenere i livelli di esposizione personale al rumore: i parametri di riferimento sono quelli descritti nella sezione § 1.2.

Se si tratta di un ambiente abitativo o di un ufficio, la maggior parte dei problemi deriva da sorgenti sonore esterne, e per quanto riguarda quelle interne si tratta semplicemente di assicurare un adeguato tempo di riverberazione (vedere § 1.3). Solo nel caso di uffici particolarmente affollati o di aule scolastiche si possono originare problemi di elevato rumore di fondo e/o di scarsa intelligibilità (§ 1.4.2)

Se si tratta di una sala per spettacolo, per la quale una buona acustica è l'obiettivo primario della progettazione, bisogna attuare una valutazione multiparametrica della qualità acustica considerando i descrittori oggettivi introdotti nel § 1.4. In particolare, per le sale destinate prevalentemente all'ascolto del parlato (cinema, teatri di prosa, sale conferenze) bisognerà dare maggior peso a parametri quali STI

e C_{50} , mentre per le sale destinate prevalentemente all'ascolto della musica la giusta combinazione dei vari parametri dipende anche dalla sensibilità del progettista, pur esistendo teorie formali che permettono di combinare diversi descrittori in un indice globale di qualità (Ando 1985).

E' chiaro che i gradi di libertà lasciati al progettista saranno maggiori nel caso di nuova realizzazione, mentre nel caso di adeguamento o ripristino di edifici esistenti si potrà solo cercare di fare il meglio possibile compatibilmente con i vincoli esistenti.

5.3 Il processo di progettazione assistita

Gli obiettivi prefissati accompagnano ogni fase dello sviluppo del progetto vero e proprio, quando cioè si formulano le scelte relative alla geometria dell'edificio, ai materiali, ecc. Ogni fase del progetto alterna quindi due momenti: quello della formulazione e quello della verifica. Questo secondo momento può a sua volta venire articolato in due fasi: la simulazione delle prestazioni caratteristiche di ogni proposta e la valutazione della conformità di tali prestazioni con gli obiettivi stabiliti. Ogni fase si conclude con la scelta della proposta più adatta.

Il processo di progettazione procede quindi alternando quattro distinte azioni:

- 1) predisposizioni di diverse soluzioni alternative;
- 2) controllo mediante simulazioni che prefigurano il comportamento corrispondente alle diverse soluzioni ipotizzate;
- 3) valutazione della congruenza dei diversi tipi di comportamento con gli obiettivi ed i criteri stabiliti;
- 4) scelta della soluzione ottimale.

La prima azione procede in modo analogico, formulando le alternative in termini di architettura, sulla base di precedenti soluzioni sviluppate per risolvere problemi simili.

Con la seconda azione le varianti proposte vengono controllate mediante simulazione su modelli numerici o fisici che permettono di attribuire ad ogni alternativa le prestazioni corrispondenti.

La terza azione rappresenta l'intervento valutativo del progetto: con essa si verifica se i risultati prevedibili sono soddisfacenti rispetto all'obiettivo. Tipicamente, si controlla che i valori attesi dei descrittori acustici oggettivi rientrino in prefissati intervalli.

La quarta azione è la decisione che seleziona tra le varie alternative la più rispondente.

I modelli vengono quindi impiegati durante la seconda azione; le modalità di impiego sono differenti a seconda che si tratti di modelli numerici o di modelli fisici, o eventualmente di un utilizzo contemporaneo delle due possibilità.

5.4 Utilizzo di modelli numerici

Per utilizzare un programma di simulazione occorre disporre di alcuni basilari dati di input: la descrizione geometrica dell'ambiente (piante, sezioni) e la tipologia dei materiali previsti

L'introduzione della geometria avviene in genere mediante un sistema CAD, per cui le regole da seguire dipendono dal sistema utilizzato. Si possono però dare alcuni criteri di validità generale, che risultano utili anche quando si dispone di un disegno CAD eseguito per scopi architettonici e si desidera utilizzarlo per la simulazione acustica. Infatti la modellazione acustica è profondamente differente dal disegno

architettonico, il quale necessita di una revisione attenta e competente prima di essere proficuamente impiegato in un codice di calcolo acustico.

Le regole principali sono le seguenti.

- Enumerare le superfici e i vertici sistematicamente, seguendo un ordine che corrisponda alla loro posizione nell'ambiente.
- Sfruttare le simmetrie: se l'ambiente ha un asse di simmetria, disporre un asse del sistema di riferimento lungo di esso; descritta metà dell'ambiente, l'altra metà potrà essere generata automaticamente.
- Se vi sono elementi ripetitivi, per esempio i palchi di un teatro, disegnarne uno e ricopiarlo ripetutamente.
- Costruire l'ambiente per passi successivi, eseguire controlli formali ad ogni passo, sfruttando le routine di controllo geometrico del programma di simulazione.
- Escludere ogni dettaglio geometrico di scarsa rilevanza acustica. Per esempio, conviene descrivere un esteso soffitto a cassettoni come un'unica superficie piana, piuttosto che come una miriade di piccole superfici: come mostrato al § 3.7.2 un eccessivo numero di superfici rallenta enormemente il programma; d'altra parte con molte piccole superfici non si ottiene un aumento di precisione, in quanto si esce dal dominio di validità dell'approssimazione geometrica dell'acustica (§ 3.3).
- Superfici molto lunghe e strette sono da considerarsi acusticamente piccole, e quindi non adatte, anche se hanno una grande area.
- Usare un livello di dettaglio omogeneo: non ha senso modellare le pareti laterali come grandi superfici singole e il soffitto come un insieme di molte piccole faccette.
- La riproduzione della geometria reale è più importante nelle zone che verosimilmente contribuiscono maggiormente alle prime riflessioni.
- Verificare che tutte le superfici combacino, cioè che il modello di ambiente chiuso sia a tenuta d'acqua, altrimenti alcuni raggi sonori potrebbero sfuggire dalle fessure. Ciò è particolarmente importante quando si approssimano superfici curve con diverse superfici piane.
- Eseguire alcune simulazioni di prova per verificare che non vi siano grossi difetti geometrici nel modello.

Se si tratta di una sala per spettacolo, si possono sfruttare le simmetrie dell'ambiente anche per quanto riguarda il posizionamento dei ricevitori: per esempio si dispone una griglia di ricevitori in metà sala e si duplicano i risultati nper l'altra metà. Ciò permette di ridurre considerevolmente il numero di posizioni per le quali simulare l'ecogramma e quindi i tempi di calcolo.

Come si è detto, quasi tutti i programmi tengono conto delle caratteristiche fisiche dei materiali assegnando un opportuno coefficiente di assorbimento acustico; per i materiali non presenti nella libreria in genere fornita con il programma bisogna perciò disporre di adeguate informazioni, reperibili presso i produttori, e vagliarle in base a quanto detto nel § 2.2.2.

Inoltre, bisogna sempre tenere a mente che i fenomeni più tipicamente ondulatori non vengono adeguatamente riprodotti da codici che lavorano in approssimazione geometrica. Se si sospetta un rilevante contributo di questo tipo, bisogna modellare anche gli oggetti probabili causa del fenomeno, in maniera da renderli compatibili con il programma. Per esempio in locali industriali molto ingombri, bisogna modellare anche gli oggetti ingombranti, assegnando loro superfici di inviluppo, in genere non trasparenti al suono, e assorbimento acustico.

Comunque, l'esperienza indica che, anche eseguendo al meglio tutte le operazioni sopra indicate e disponendo di un buon codice di calcolo, i risultati della simulazione non saranno mai perfettamente aderenti alla realtà, e che occasionalmente si possono verificare scostamenti rilevanti. Ciò appare ovvio alla luce delle approssimazioni descritte, ma va tuttavia sottolineato per non cadere nell'errore, mai troppo criticato, di prendere per buono tutto quello che esce dal computer. Il progettista competente deve essere ben cosciente del fatto che i risultati dei codici di simulazione possono essere utilizzati solo per due scopi ben precisi:

- 1) quando si tratta di un ambiente non ancora costruito, per compiere confronti del tipo "prima e dopo", cioè per valutare gli effetti relativi di certe scelte progettuali;
- 2) quando si tratta di un ambiente esistente, per compiere predizioni assolute dei valori di certi parametri, purché il programma sia stato preventivamente tarato sulla base di dati sperimentali.

Compiere un confronto relativo vuole dire ragionare sulla differenze di valore di certi parametri tra due possibili configurazioni, senza fare troppo affidamento sui valori assoluti degli stessi. Per esempio, si possono stimare le riduzioni di livello sonoro ottenibili con un certo intervento di insonorizzazione, pur non confidando nei valori di livello sonoro raggiungibili secondo il programma dopo l'intervento.

Compiere una predizione assoluta vuole dire assumere il valore di un certo parametro fornito dal programma come valore reale. Per esempio, si può assumere che un certo teatro avrà i tempi di riverberazione predetti dal programma. Attualmente, un'operazione di questo tipo è ammissibile se e solo se il programma è stato tarato per confronto su valori misurati sperimentalmente nell'ambiente in oggetto. Per esempio, si misurano i tempi di riverberazione in un teatro prima di un intervento di ristrutturazione; si compiono diverse simulazioni aggiustando i coefficienti di assorbimento assegnati ai materiali, finché non si riproducono i valori di tempo di riverberazione sperimentali; si procede quindi a predire quali valori assumerà il tempo di riverberazione dopo l'intervento.

Usualmente, la taratura avviene proprio in questo modo, cioè in base ai valori assunti dal descrittore tempo di riverberazione e variando i valori del parametro fisico coefficiente di assorbimento acustico. È chiaro quindi che si tratta ancora una volta di un'operazione approssimata, in quanto:

- bisogna confrontare parametri omogenei; se per esempio sono stati misurati valori di T_{30} ma il programma calcola solo T_{60} e EDT, il confronto può risultare discutibile.
- Il grado di libertà assicurato dalla variazione del coefficiente di assorbimento acustico non sempre è sufficiente; il tempo di riverberazione dipende anche dalle dimensioni e dalla disposizione delle superfici nell'ambiente e può variare da punto a punto a causa di fenomeni di interferenza, di accoppiamenti di cavità, ecc.
- La coincidenza dei valori sperimentali di tempo di riverberazione con quelli simulati non assicura che una coincidenza altrettanto buona si verifichi per altri descrittori, quali ITDG, LE, ecc.

5.5 Utilizzo di modelli fisici

Per i modelli fisici valgono considerazioni analoghe a quelle appena svolte, con l'avvertenza che in questo caso l'affidabilità dei risultati dipende in larga misura dall'esperienza e dall'abilità, anche manuale, di chi esegue le prove su modello.

Per esempio, per i modelli acustici in scala la scelta dei materiali è condizionata dal teorema di Savart (§ 4.5.2): solo l'esperienza può suggerire quali siano caso per caso i materiali più adatti, in relazione anche ai risultati voluti.

Anche per i modelli fisici è necessario procedere ad operazioni di taratura, qualora si vogliano predizioni assolute. Di solito però questo tipo di modelli viene utilizzato per predizioni di tipo qualitativo, durante una prima fase di studio. Per esempio si utilizza un modello acustico in scala di un teatro per avere un'idea dell'andamento delle prime riflessioni e per ricercare l'eventuale presenza di echi.

In altre parole, non potendo ormai più competere con i modelli numerici la cui potenza aumenta continuamente, i modelli fisici vengono a configurarsi come un utile complemento ai primi, da impiegare nelle primissime fasi dello studio, quando è ancora in discussione la forma stessa dell'ambiente. In questo contesto mantengono ancora una loro utilità, riuscendo per esempio a riprodurre naturalmente certi fenomeni ondulatori che i programmi faticano a simulare correttamente.

6 CODICI DI CALCOLO DISPONIBILI

In questa sezione vengono sommariamente descritti alcuni dei programmi di simulazione disponibili in Italia. Non si tratta di una raccolta esaustiva di tutti i codici in uso, ma semplicemente di un sottoinsieme rappresentativo della varietà e del livello dei programmi in uso al momento della stesura del presente testo.

La scelta non è stata dettata da altri criteri che dalla conoscenza dei vari codici da parte degli autori di questo capitolo e dalla disponibilità di una documentazione adeguata.

6.1 D1

Autori

- Università di Cracovia, Polonia.
- Programma semplice sviluppato a scopo didattico.

Definizione dell'ambiente

- dimensioni massime: 263_m lungo l'asse x, 338_m lungo l'asse y, 259_m lungo l'asse z;
- numero massimo di superfici: 1000;
- numero massimo di vertici per ogni superficie: 4;
- ad ogni superficie si può associare un materiale;
- ogni materiale viene definito mediante un nome e un numero; il relativo coefficiente di assorbimento viene dato per bande di ottava ($125 \text{ Hz} \div 4 \text{ kHz}$);
- non esiste una libreria interna di materiali, ma la si può realizzare immettendo i dati da tastiera.

Definizione delle sorgenti

- è possibile introdurre fino a 3 sorgenti;
- per ogni sorgente è possibile definire la posizione, l'orientamento, la direttività (variabile in ogni banda d'ottava), lo spettro di potenza sonora;
- non esiste una libreria interna di sorgenti.

Definizione dei ricevitori

- si considerano dei ricevitori omnidirezionali puntiformi;
- per valutare la risposta acustica in un singolo punto i ricevitori vengono analizzati uno alla volta;
- per una mappatura dell'ambiente è prevista l'analisi di una griglia di 25 ricevitori: si definiscono le coordinate di una superficie rettangolare di riferimento su cui verranno disposti i ricevitori (5 per lato e ad uguale distanza l'uno dall'altro).

Metodo di calcolo utilizzato

- sorgenti virtuali puro.

Limiti nel calcolo

- massimo ordine di riflessione: 10;
- di fatto i risultati raggiunti al terzo ordine di riflessione sono quelli definitivi.

Rappresentazione dell'ambiente

- viene utilizzato un sistema di CAD interno;

- la rappresentazione avviene mediante le tre viste principali e un'assonometria, con la possibilità di effettuare delle rotazioni, ma non delle zoomate.

Risposte fornite

- ecogramma;
- visualizzazione del percorso seguito dai raggi (fino ad un massimo di 15);
- descrittori: SPL;
- visualizzazione dei punti di incidenza raggio-parete.

Richieste di sistema

- PC IBM compatibile: 286 o superiore (non è richiesto il coprocessore);
- occupazione in memoria del programma: circa 200 kB;
- adattatore video a colori EGA o superiore;
- sono stati riscontrati problemi in fase di hard-copy delle schermate, forse a causa delle routine Turbo Pascal utilizzate per pilotare la grafica video.

6.2 dBray

Autori

- RTA Technology, Sydney, Australia.
- Programma specificamente orientato ad una ricostruzione precisa della curva di decadimento sonoro, in ambienti chiusi o a tunnel (gallerie stradali).

Definizione dell'ambiente

- dimensioni massime non specificate;
- numero massimo di superfici: 500;
- numero massimo di punti: 5000;
- ad ogni superficie si può associare un materiale;
- ogni materiale viene definito mediante un nome e un numero; il relativo coefficiente di assorbimento viene dato per bande d'ottava (31.5 Hz ÷ 16 kHz);
- è possibile definire a piacere il modello di diffusione.

Definizione delle sorgenti

- è possibile introdurre 1 sola sorgente alla volta;
- è possibile definire la posizione la direttività, lo spettro di potenza della sorgente.

Definizione dei ricevitori

- si considerano dei ricevitori omnidirezionali (sfere);
- si può introdurre un solo ricevitore alla volta, fissandone il diametro e la posizione.

Metodo di calcolo utilizzato

- ray-tracing puro;
- il calcolo viene compiuto in tre passi: 1) emissione dei raggi; 2) calcolo dei raggi intercettati dal ricevitore;
- 3) calcolo dei descrittori e dei diagrammi;
- è possibile variare alcuni parametri e ripetere solo le fasi 2 e 3 del calcolo.

Limiti nel calcolo

- poiché il programma è specificamente concepito per simulare il decadimento sonoro, si possono introdurre solo una sorgente ed un ricevitore alla volta;
- ai fini del calcolo si tiene conto soltanto di quei raggi che sono stati captati dal ricevitore entro i primi 80 ms.

Rappresentazione dell'ambiente

- viene utilizzato un sistema di CAD interno;
- la rappresentazione avviene mediante le tre viste principali e un'assonometria, con la possibilità di effettuare delle zoomate e delle rotazioni;
- sono previste anche delle viste assonometriche dall'interno.

Risposte fornite

- curva di decadimento, per bande di ottava;
- tempo di riverberazione;
- livello sonoro;
- chiarezza C_n ;
- visualizzazione del percorso dei raggi;
- visualizzazione dei punti di incidenza dei raggi sulle pareti;
- rappresentazione 3D dei raggi che sono stati captati dal ricevitore in relazione a diversi parametri: numero progressivo del raggio, tempo e direzione d'arrivo, contributo energetico;
- visualizzazione delle riflessioni anomale (ad angoli molto piccoli o molto grandi).

Requisiti di sistema (versione 2.3)

- PC IBM compatibile: 286 + coprocessore;
- 540 kB di RAM libera;
- almeno 20 MB liberi su HD;
- scheda grafica EGA.

6.3 RaysCad +

Autori

- Campagna e Varenne, Vienne, Francia.
- Il programma si presta principalmente per la determinazione dei livelli sonori nei locali industriali.

Definizione dell'ambiente

- il programma necessita dell'ambiente grafico di AutoCAD 11
- permette la definizione di locali di forma qualsiasi, specificando: la forma delle superfici di confine, i volumi interni, gli spazi ingombri, gli schermi, i rivestimenti fonoassorbenti, ecc.;
- ad ogni superficie, o ad ogni porzione di superficie, si può associare un materiale;
- ogni materiale viene identificato mediante un nome e un numero; il relativo coefficiente di assorbimento acustico viene dato per bande di ottava (125 Hz ÷ 8 kHz);
- il programma, oltre a considerare la riflessione speculare, tiene conto del fenomeno della diffusione;
- il programma tiene conto dell'influenza dei parametri di temperatura ed umidità relativa dell'aria.

Definizione delle sorgenti

è possibile introdurre fino a 10 sorgenti;

- si considerano delle sorgenti puntiformi ed omnidirezionali;
- per ogni sorgente è possibile definire la posizione e la potenza, sia globale che per bande d'ottava (125 Hz ÷ 8 kHz).

Definizione dei ricevitori

- si considerano dei volumi di ricezione di forma sferica o cubica (dimensioni in pianta di circa 2_m per 2 m);
- tali volumi vengono disposti secondo una griglia orizzontale che ricopre tutta la zona in cui si vuole determinare il livello di rumore.

Metodo di calcolo utilizzato

- ray-tracing: ogni sorgente emette un numero elevato di raggi, il cui contributo energetico è proporzionale alla potenza della sorgente; ogni raggio viene seguito per un numero di riflessioni predeterminato ed apporta energia a ciascuno dei volumi di ricezione attraversati.
- è possibile tenere conto degli ingombri dei locali, mediante: la loro ripartizione, la loro densità per zone, il loro assorbimento acustico per zone.

Limiti nel calcolo

- sono quelli implicitamente contenuti nel metodo di calcolo utilizzato;
- per l'analisi di ambienti particolarmente complessi occorre lanciare un numero molto elevato di raggi, per cui si allungano notevolmente i tempi di calcolo.

Rappresentazione dell'ambiente

- il codice di calcolo utilizzato necessita dell'ambiente grafico AutoCAD 11, essendo basato su di una interfaccia Autolisp; il modulo di calcolo è scritto in C.

Risposte fornite

- calcolo del coefficiente di assorbimento acustico medio dell'ambiente;
- tempo di riverberazione: Sabine, Eyring;
- mappe del livello sonoro in dB(A) e per le diverse bande d'ottava (125 Hz ÷ 8 kHz) relativamente a situazioni diverse di simulazione: introduzione di schermi, trattamento totale o parziale delle pareti, schermatura della sorgente, ecc.;
- valutazione del contributo delle singole sorgenti alla determinazione totale del livello;
- calcolo delle curve di decadimento dell'energia sonora nei passaggi del locale, nel quadro della legislazione francese (decreto del 30/08/1990) e delle nuove direttive CEE attualmente in studio.

Requisiti di sistema

- PC IBM compatibile: 386/25_MHz + coprocessore 387 o sistema superiore;
- 80 MB disponibili su HD;
- 4 MB RAM;
- adattatore grafico a colori VGA;
- AutoCAD 11.

6.4 Modeler

Autori

- Bose Corporation, Framingham, USA.

- Programma orientato alla progettazione di impianti di sonorizzazione in ambienti chiusi con componenti Bose.

Definizione dell'ambiente

- dimensioni massime: 600 x 600 x 600 m;
- numero massimo di superfici: 256;
- numero massimo di lati per ogni superficie: 10;
- è possibile introdurre delle superfici coniche e sferiche, approssimandole con elementi piani;
- è possibile introdurre porte (al massimo 25) e finestre (al massimo 25);
- ad ogni superficie si può associare un materiale;
- ogni materiale viene definito mediante un nome e un numero; il relativo coefficiente di assorbimento viene dato per bande di ottava (125 Hz ÷ 4 kHz);
- esiste una libreria interna costituita da 65 tipi di materiali diversi, eventualmente ampliabile da parte dell'utilizzatore, fino ad un massimo di 100 materiali;
- il programma tiene conto dell'influenza dei parametri di temperatura ed umidità relativa dell'aria.

Definizione delle sorgenti

- è possibile introdurre fino a 100 sorgenti, singole o in cluster;
- per ogni sorgente è possibile definire la posizione, l'orientamento, la potenza elettrica, l'equalizzazione in dB per bande d'ottava, la modalità di attivazione (on-off);
- esiste un'ampia libreria interna di altoparlanti, non ampliabile da parte dell'utilizzatore.

Definizione dei ricevitori

- si considerano dei ricevitori omnidirezionali;
- per valutare la risposta acustica in un singolo punto i ricevitori vengono analizzati uno per uno (se ne possono introdurre fino a 10);
- per una mappatura dell'ambiente è prevista l'analisi di una griglia di ricevitori a spaziatura fissa (1.8 x 1.8 m)
- il posizionamento dei ricevitori è limitato alle superfici identificate come floor.

Metodo di calcolo utilizzato

- per le prime riflessioni (fino al terzo ordine) viene utilizzato il metodo delle sorgenti virtuali;
- per le riflessioni di ordine elevato vengono sfruttate le approssimazioni dell'acustica statistica (campo riverberante uniformemente diffuso).

Limiti nel calcolo

- sono quelli implicitamente contenuti nel metodo di calcolo adottato.

Rappresentazione dell'ambiente

- viene utilizzato un sistema di CAD interno (le varie superfici possono essere inserite solo lavorando in pianta);
- la rappresentazione avviene mediante le tre viste principali e una assonometria, con la possibilità di effettuare dei passaggi di scala e delle rotazioni.

Risposte fornite

- ecogramma nel singolo punto calcolabile secondo modalità diverse: analisi del solo campo diretto, del solo campo riflesso, dei campi diretto e riflesso, diretto e riverberante, diretto e riverberante modificato;
- risposta in frequenza;

- tempo di riverberazione: Sabine;
- descrittore di intelligibilità: STI;
- l'SPL nel singolo punto o sulla griglia di ricevitori è calcolabile secondo modalità diverse: analisi del solo campo diretto, dei campi diretto e riverberante e diretto e riverberante modificato;
- è possibile ottenere una mappa dell'SPL e dello STI, numerica o grafica (toni di grigio) quando si utilizza la griglia dei ricevitori.

Requisiti di sistema (versione 3.1)

- Macintosh II (System 4.2, Finder 6.0) o superiori;
- è richiesto un HD (fortemente consigliabile) o, in alternativa, un spazio di almeno 800 kB su floppy disk.

6.5 Epidaure

Autori

- CSTB e 01 dB, Francia.
- Programma sviluppato su sistemi VAX per la progettazione dell'Opéra de la Bastille (Parigi) e successivamente portato su PC.

Definizione dell'ambiente

- dimensioni massime non specificate;
- le varie superfici vengono definite mediante poligoni;
- ad ogni superficie si può associare un materiale e in un singolo ambiente si possono introdurre fino a 20 materiali diversi;
- ogni materiale viene definito mediante un nome e un numero; il relativo coefficiente di assorbimento viene dato per bande di ottava ($125 \text{ Hz} \div 4 \text{ kHz}$);
- esiste una libreria interna di materiali eventualmente ampliabile da parte dell'utente

Definizione delle sorgenti

- è possibile introdurre fino a 20 sorgenti;
- per ogni sorgente è possibile definire la posizione, l'orientamento, la direttività, la potenza sonora;
- esiste una libreria interna di sorgenti eventualmente ampliabile da parte dell'utente;
- il programma tiene conto dell'influenza dei parametri di temperatura e di umidità relativa ai fini della determinazione dell'assorbimento acustico dell'aria (in dB/100 m).

Definizione dei ricevitori

- si considerano dei ricevitori omnidirezionali puntiformi,
- per valutare la risposta acustica in un singolo punto i ricevitori vengono analizzati uno alla volta (numero massimo 32);
- è prevista la possibilità di realizzare una mappatura dell'ambiente mediante definizione di una griglia di ricevitori.

Metodo di calcolo utilizzato

- beam tracing con ricostruzione della coda riverberante da una statistica sui fasci lanciati (vedere § 3.8.3, metodo di Van Maerke & Martin).

Limiti nel calcolo

sono quelli implicitamente contenuti nel metodo di calcolo adottato (vedere § 3.8.3).

Rappresentazione dell'ambiente

- viene utilizzato un sistema di CAD interno;
- il programma è compatibile con i più diffusi sistemi CAD;
- la rappresentazione avviene mediante le tre viste principali e un'assonometria, con la possibilità di effettuare delle zoomate e delle rotazioni;
- sono previste anche delle viste assonometriche dall'interno.

Risposte fornite

- ecogramma, per 10 bande d'ottava, lineare e pesato A;
- livelli sonori SPL, per bande d'ottava, lineare e pesato A;
- curva di decadimento di Schroeder e EDT, T_{10} , T_{15} , T_{20} , ecc.
- diagramma energia-tempo;
- descrittori energetici: C, D, R, t_s ;
- descrittori spaziali: LE;
- descrittore d'intelligibilità: STI;
- distribuzione direzionale delle riflessioni;
- visualizzazione delle sorgenti virtuali per un'assegnata coppia sorgente-ricevitore;
- visualizzazione del percorso seguito dai raggi corrispondenti alle sorgenti virtuali;
- spettro delle riflessioni;
- possibilità di mappare i parametri calcolati su superfici definite dall'utente.

Requisiti di sistema

- PC IBM compatibile: 386 + coprocessore 387 o sistema superiore;
- 2 MB EMS (il programma non parte se non ha a disposizione EMS sufficiente).
- almeno 20 MB su disco rigido;
- adattatore grafico a colori CGA, ATT, EGA o VGA.

6.6 RayNoise

Autori

- Numerical Integration Technologies, Leuven, Belgio.
- Programma general purpose, proposto per sale da spettacolo, per ambienti di lavoro e anche per studi in ambiente esterno.

Definizione dell'ambiente

- dimensioni massime non specificate;
- numero di superfici virtualmente illimitato;
- le varie superfici vengono definite mediante poligoni;
- ad ogni superficie si può associare un materiale;
- ogni materiale viene definito mediante un nome e un numero; il relativo coefficiente di assorbimento viene dato per bande di ottava (63 ÷ 8000 Hz);
- il coefficiente di assorbimento acustico può variare in funzione dell'angolo di incidenza del suono;
- esiste una libreria interna di materiali eventualmente ampliabile da parte dell'utente;
- il programma tiene conto dell'influenza dei parametri di temperatura ed umidità relativa dell'aria.

Definizione delle sorgenti

- è possibile definire sorgenti puntiformi, lineari e piane;
- numero di sorgenti virtualmente illimitato;

- per ogni sorgente è possibile definire la posizione, l'orientamento, la direttività, lo spettro di potenza, il ritardo;
- esiste una libreria interna di sorgenti;
- la libreria delle sorgenti è ampliabile con dati forniti dall'utente;

Definizione dei ricevitori

- i ricevitori possono essere puntiformi o superfici assegnate;
- numero di ricevitori: virtualmente illimitato;
- per valutare la risposta acustica in un singolo punto i ricevitori vengono analizzati uno alla volta;
- per una mappatura dell'ambiente è possibile introdurre una griglia di ricevitori.

Metodo di calcolo utilizzato

- cone tracing.
- implementa un algoritmo di diffrazione (non specificato);
- possiede un linguaggio di comandi di alto livello.

Limiti nel calcolo

- massimo numero di raggi in fase di tracciamento: non definito;
- massimo ordine di riflessione: non definito.

Rappresentazione dell'ambiente

- viene utilizzato un sistema di CAD tridimensionale interno;
- visualizzazione multifinestra con viste in pianta, sezioni e assonometria, con la possibilità di effettuare delle zoomate e delle rotazioni;
- sono previste anche delle viste assonometriche dall'interno;
- possibilità di interfacciare i più diffusi sistemi CAD e i principali pre-processor FEM.

Risposte fornite

- ecogramma per bande d'ottava, lineare e pesato A;
- livelli sonori SPL, per bande d'ottava, lineare e pesati A, anche con sovrapposizione di curve NC;
- curva di decadimento di Schroeder e EDT, T_{10} , T_{15} , T_{20} , ecc.
- diagramma energia-tempo;
- descrittori energetici: C, D, t_5 ;
- descrittore spaziale: LE;
- intelligibilità: RASTI;
- rapporto segnale-disturbo S/N;
- diagrammi azimutali e zenitali delle riflessioni;
- visualizzazione interattiva del percorso di ogni singolo cono;
- spettro delle riflessioni;
- possibilità di mappare i parametri calcolati;
- possibilità di scambiare file con il programma Surfer;
- possibilità di passare le risposte all'impulso stimate ad un programma di convoluzione con segnali anecoici per l'auralizzazione.

Requisiti di sistema

- disponibile su PC, workstation, mainframe; le specifiche seguenti si riferiscono alla versione per PC:
- PC IBM compatibile: 386 + coprocessore 387 o sistema superiore;
- almeno 2 MB di RAM;
- almeno 20 MB disponibili su HD;

adattatore grafico a colori VGA.

6.7 Ramsete

Autori

- Genesis, Parma.
- Programma general purpose, proposto per sale da spettacolo, per ambienti di lavoro e anche per studi in ambiente esterno.

Definizione dell'ambiente

- dimensioni massime non specificate;
- si possono introdurre superfici piane e curve,
- ad ogni superficie si può associare un materiale;
- ogni materiale viene definito mediante un nome e un numero; il relativo coefficiente di assorbimento e il potere fonoisolante vengono dati per bande di ottava (31,5 Hz ÷ 16 kHz);
- esiste una libreria interna di materiali eventualmente ampliabile da parte dell'utente;
- per le superfici dichiarate obstructing vengono calcolate l'energia sonora che le attraversa e l'energia diffratta dai bordi liberi (formula di Maekawa);
- si tiene conto dell'influenza dei parametri di temperatura ed umidità relativa dell'aria.

Definizione delle sorgenti

- per ogni sorgente è possibile definire la posizione, l'orientamento, la direttività, lo spettro di potenza, la modalità di attivazione (on-off);
- per le sorgenti di tipo loudspeaker (elettroacustiche) è possibile definire anche la potenza elettrica, la sensibilità, l'impedenza elettrica, l'efficienza;
- esiste una libreria interna di sorgenti;
- la libreria delle sorgenti è ampliabile con dati forniti dall'utente, con dati ricostruiti dal programma sulla base di misure sperimentali a norma ISO 3744 e con dati importati dal programma Modeler;
- è prevista una funzione di equalizzazione per ciascuna sorgente.

Definizione dei ricevitori

- i ricevitori sono considerati omnidirezionali e possono essere orientati verso una direzione assegnata;
- per valutare la risposta acustica in un singolo punto i ricevitori vengono analizzati uno alla volta;
- per una mappatura dell'ambiente è possibile introdurre una griglia di ricevitori.

Metodo di calcolo utilizzato

- pyramid tracing puro.
- il modulo tracciatore esiste in due versioni: per Windows e per DOS (più veloce ma con limiti di memoria).

Limiti nel calcolo

- massimo numero di raggi in fase di tracciamento: non definito;
- massimo ordine di riflessione: non definito;
- risoluzione della risposta all'impulso: consigliata da 1 ms a 0,1 s.

Rappresentazione dell'ambiente

viene utilizzato un sistema di CAD tridimensionale interno;

- visualizzazione multifinestra con viste in pianta, sezioni e assonometria, con la possibilità di effettuare delle zoomate e delle rotazioni;
- sono previste anche delle viste assonometriche dall'interno.
- algoritmo di rendering interno per presentazioni professionali;
- il programma può scambiare file con AutoCAD.

Risposte fornite

- ecogramma per bande d'ottava, lineare e pesato A;
- livelli sonori SPL, per bande d'ottava, lineare e pesati A;
- livello dell'onda diretta: L_{dir} ;
- livello del campo riverberato: L_{rev} ;
- curva di decadimento di Schroeder e EDT, T_{10} , T_{15} , T_{20} , ecc.
- diagramma energia-tempo;
- ITDG, ampiezza equivalente delle riflessioni: A_{eq}
- descrittori energetici: C_{50} , C_{80} , t_s , rapporto R/D;
- descrittori spaziali: LE, IACC;
- descrittore d'intelligibilità: STI;
- distribuzione direzionale delle riflessioni;
- visualizzazione del percorso seguito dai raggi;
- spettro delle riflessioni;
- possibilità di mappare i parametri calcolati;
- possibilità di scambiare file con il programma Surfer;
- possibilità di passare le risposte all'impulso stimate ad un programma di convoluzione con segnali anecoici per l'auralizzazione.

Requisiti di sistema (versione 1.0)

- PC IBM compatibile: 386 + coprocessore 387 o sistema superiore;
- sistema operativo Windows 3.0 o superiore;
- 640 kB di RAM per il tracciatore DOS; 4 MB consigliati per il tracciatore Windows;
- ampio spazio disponibile su HD (il programma completo richiede circa 5 MB);
- adattatore grafico a colori VGA o superiore.

6.8 Odeon

Autori

- Università di Lyngby, Danimarca.
- Programma orientato allo studio delle sale da spettacolo, ma eventualmente utilizzabile anche per l'ambiente di lavoro.

Definizione dell'ambiente

- dimensioni massime: 1000 x 1000 x 1000 m;
- numero massimo di superfici: 500;
- numero massimo di vertici per ogni superficie: 20;
- ad ogni superficie si può associare un materiale;
- ogni materiale viene identificato mediante un nome e un numero; il relativo coefficiente di assorbimento acustico viene dato per bande di ottava (125 Hz ÷ 4 kHz);
- esiste una libreria interna di materiali, eventualmente ampliabile da parte dell'utilizzatore;
- il programma, oltre a considerare la riflessione speculare, tiene conto del fenomeno della diffusione attraverso la legge di Lambert;
- il programma tiene conto dell'influenza dei parametri di temperatura ed umidità relativa dell'aria.

Definizione delle sorgenti

- è possibile introdurre fino a 10 sorgenti;
- per ogni sorgente è possibile definire la posizione, l'orientamento, la potenza, il ritardo, la modalità di attivazione (on-off);
- la direttività può essere solo omnidirezionale o a cardioide; è possibile definire nuovi tipi di direttività mediante il modulo aggiuntivo Odeon-Source;
- esiste una libreria interna di sorgenti.

Definizione dei ricevitori

- i ricevitori sono considerati omnidirezionali (sfere);
- per valutare la risposta acustica in un singolo punto i ricevitori vengono analizzati uno alla volta;
- per una mappatura dell'ambiente è possibile introdurre una griglia di 800 ricevitori che può interessare fino a 20 superfici

Metodo di calcolo utilizzato

- modello ibrido sorgenti virtuali/ray-tracing con ricostruzione della coda riverberante da una statistica dei raggi lanciati (vedere § 3.8.4);
- è possibile definire l'ordine minimo dopo il quale la riflessione è considerata diffusa.

Limiti nel calcolo

- massimo numero di raggi in fase di tracciamento: 99999;
- massimo ordine per le prime riflessioni: 10;
- massimo ordine di riflessione: 200;
- lunghezza massima della risposta all'impulso: 10 s;
- massimo numero di riflessioni: non definito (teoricamente illimitato).

Rappresentazione dell'ambiente

- il programma utilizza un file ASCII strutturato in sezioni che contengono tutti i punti, le superfici ed i materiali scelti;
- è possibile utilizzare file AutoCAD mediante il modulo aggiuntivo ODACAD;
- è possibile utilizzare un sistema di CAD tridimensionale interno mediante il modulo aggiuntivo Odeon-Build;
- una volta generato il file della geometria, la rappresentazione avviene mediante le tre viste principali e un'assonometria, con la possibilità di effettuare delle zoomate e delle rotazioni.

Risposte fornite

- ecogramma per bande d'ottava, lineare e pesato A;
- livelli sonori SPL, per bande d'ottava, lineare e pesati A;
- tempo di riverberazione: Sabine, Eyring, stimato dal ray tracing, EDT;
- distanza critica;
- distribuzione direzionale delle riflessioni;
- visualizzazione del percorso seguito dai raggi;
- spettro delle riflessioni;
- diagramma energia-tempo;
- livello sonoro SPL;
- descrittori energetici: C_{80} , D_{50} , t_s ;
- descrittore spaziale: LE.
- possibilità di mappare i parametri calcolati;

· possibilità di passare le risposte all'impulso stimate ad un dispositivo di convoluzione con segnali anecoici per l'auralizzazione

Requisiti di sistema (versione 2.0)

- PC IBM compatibile: 386 + coprocessore 387 o sistema superiore;
- 640 kB RAM e 256 kB EGA/VGA;
- consigliati 350 kB di EMS (l'assenza di memoria espansa comporta un rallentamento nell'utilizzo del programma);
- 10 MB disponibili su HD;
- adattatore grafico a colori.

7 ESEMPIO DI APPLICAZIONE

7.1 Progetto acustico dell' allestimento della ex-chiesa di S.Domenico in Foligno mediante simulazioni al computer

La ex-chiesa di S.Domenico in Foligno è un edificio di rilievo monumentale ed artistico che è stato oggetto di un restauro mirato a trasformarla in un ambiente adatto ad ospitare eventi musicali, particolarmente esecuzioni di musica sinfonica.

Per valutarne le caratteristiche acustiche, sono state compiute due campagne di rilievo sperimentale: la prima si è svolta nel 1986, all'inizio dei lavori di ristrutturazione, e la seconda si è svolta nell'aprile 1990, a lavori ormai ultimati ma in assenza di qualsiasi arredo od allestimento della sala.

In entrambe tali campagne sono state acquisite dettagliate informazioni sulla struttura temporale e spaziale del campo sonoro nell' ambiente. In particolare sono stati evidenziati valori molto elevati del tempo di riverberazione e la presenza di alcuni echi isolati, ma anche una certa ricchezza di riflessioni laterali precoci nella navata principale.

E' stato pertanto suggerito di dotare la sala di un sistema di riflettori acustici e cortine mobili, in grado di reindirizzare il suono verso le superfici più assorbenti (il pubblico), ridurre il tempo di riverberazione ed eliminare gli echi.

Nella successiva fase di progettazione è stato impiegato un modello matematico per la previsione del campo sonoro in grandi ambienti (Ramsete), onde saggiare i benefici ottenibili mediante gli accorgimenti suddetti, in diversi possibili allestimenti della sala, ed in particolare tenendo presente un possibile utilizzo parziale della stessa.

Sebbene resti da definire più in dettaglio l'esatto posizionamento angolare di alcune superfici, il progetto proposto ha mostrato di migliorare significativamente le condizioni acustiche della ex-chiesa di S.Domenico. La sua modularità consente poi di effettuare a seconda del caso quei piccoli aggiustamenti di inclinazione dei pannelli che consentono l'ottimale reindirizzamento del suono riflesso, in funzione dell'esatta e peculiare posizione delle sorgenti sonore rispetto al pubblico.

7.2 Taratura del modello matematico

Questa operazione si è resa necessaria onde garantire che la modellizzazione della sala, nella sua attuale configurazione (non arredata) corrispondesse alla realtà.

La geometria della sala è stata introdotta nel modello matematico basandosi sui disegni CAD generati per scopi architettonici ed attuando grosse semplificazioni dei dettagli geometrici, la cui riproduzione non è stata giudicata significativa ai fini della simulazione acustica. La figura 7.1 mostra la geometria semplificata che è stata impiegata; in essa sono altresì visibili la posizione della sorgente sonora (A) ed i 25 ricevitori.

La situazione modellizzata corrisponde ai rilievi eseguiti nell' aprile '90, e pertanto i risultati della simulazione numerica dovrebbero fornire gli stessi valori che già a suo tempo erano stati ottenuti sperimentalmente.

In particolare la taratura è stata eseguita sui tempi di riverberazione. La fig. 7.2 pone a confronto i dati sperimentali con quelli calcolati dal programma Ramsete, mostrando l'ottimo accordo raggiunto.

Va notato che per gli altri parametri acustici non è stato possibile ottenere un accordo così buono. In particolare, sebbene i valori medi vengano correttamente rispettati, la distribuzione spaziale dei descrittori acustici è risultata diversa. A titolo di esempio, in fig. 7.3 viene riportato l'andamento spaziale dell'indice di trasmissione della parola (STI). Per confronto, la fig. 7.4 riporta la mappa dello STI ottenuta a suo tempo dai rilievi sperimentali.

Dal confronto fra le due figure, si può osservare come l'andamento spaziale degli indici sia leggermente diverso, anche se in entrambi i casi i valori massimi si ottengono in vicinanza della sorgente sonora ed i valori minimi al centro della navata principale.

In particolare, nei rilievi sperimentali è risultato un valore sensibilmente più basso dello STI nella zona absidale (lo stesso si verificava anche per gli altri descrittori, quali indice di definizione, di chiarezza, etc.). Ciò potrebbe essere spiegato con la direttività della sorgente sonora impiegata (una pistola), che tendeva ad incrementare il campo sonoro diretto nella direzione in cui era puntata (la navata principale), ed a ridurlo dalla

parte opposta. La simulazione numerica è stata invece eseguita con una sorgente sonora omnidirezionale, anche se il programma Ramsete consente di introdurre sorgenti con curve di direttività arbitrarie.

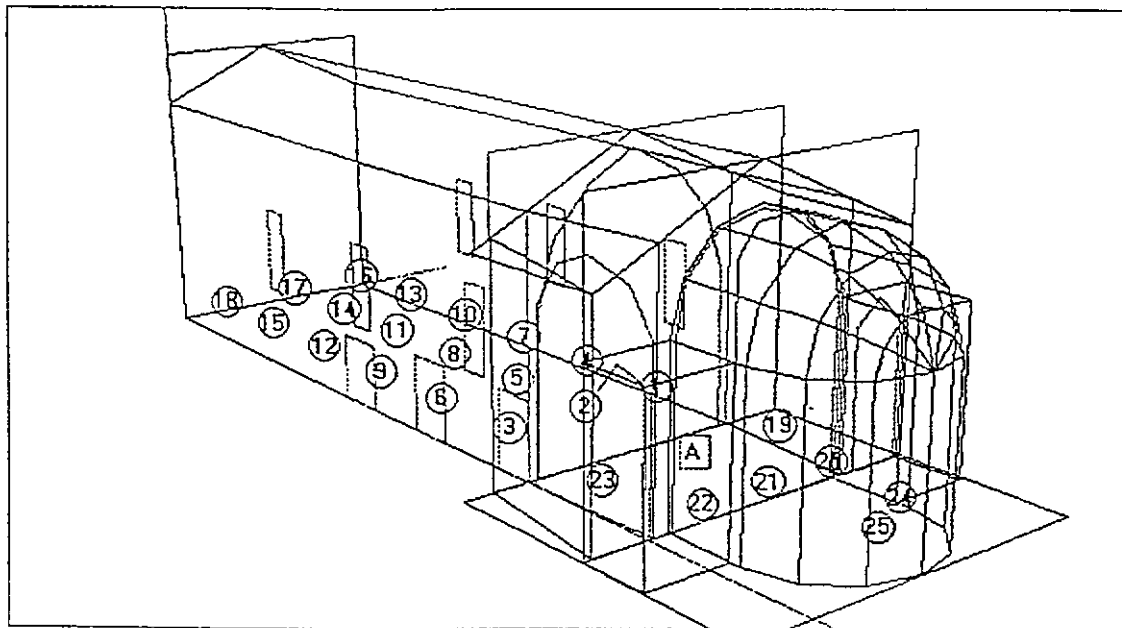


Figura 7.1. Vista prospettica dall' abside.

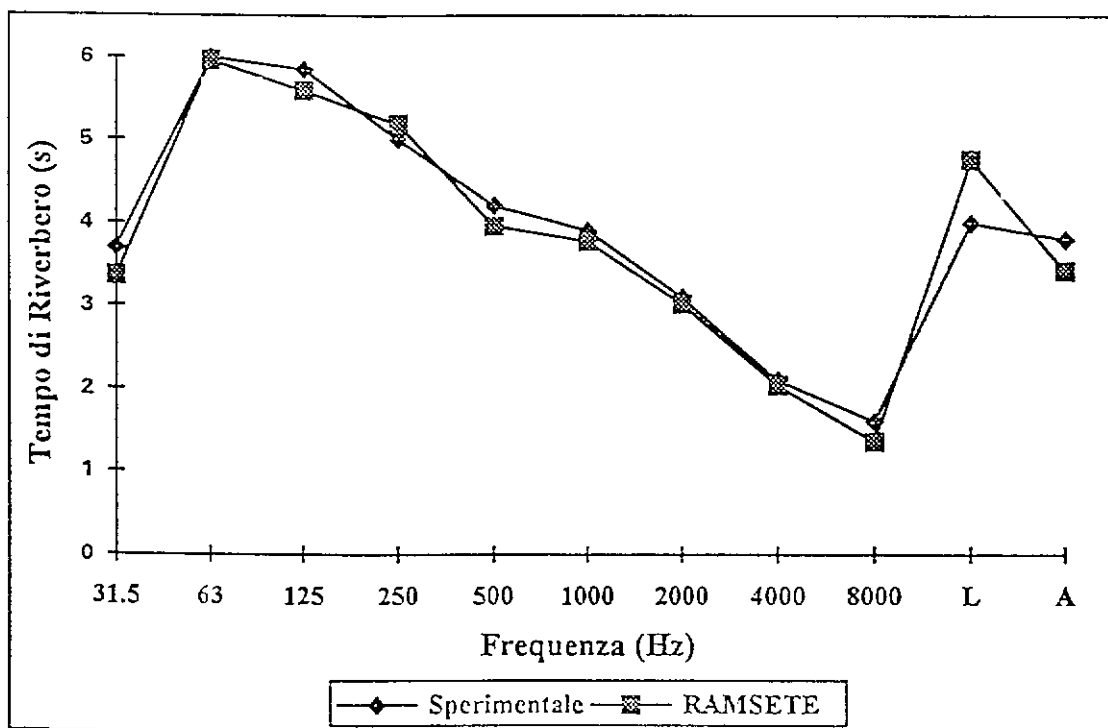


Figura 7.2. Confronto fra tempi di riverberazione sperimentali e previsti dal modello.

Nonostante queste incongruenze, si è ritenuto che il modello matematico fornisca risultati sufficientemente aderenti alla realtà per poter venire impiegato nella verifica delle soluzioni progettuali proposte per l'allestimento della sala, tenuto anche conto che tale verifica richiede soprattutto valutazioni differenziali fra diverse ipotesi, e non stime assolute di qualità a confronto di altre sale.

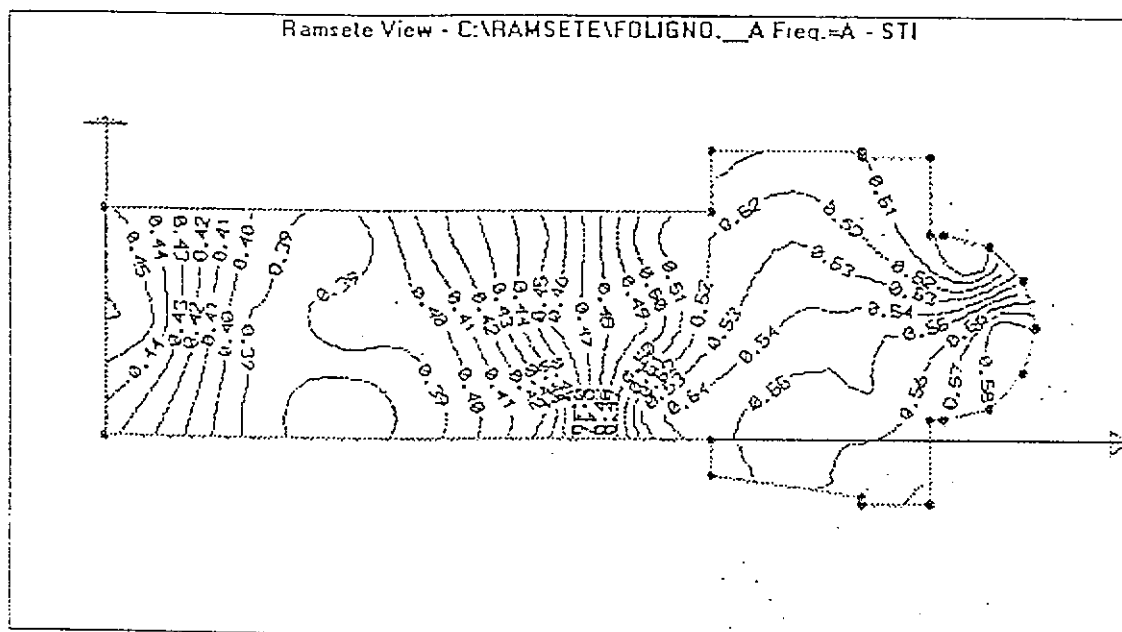


Figura 7.3. Mappa di *STI* prevista numericamente per lo stato attuale (senza arredi).

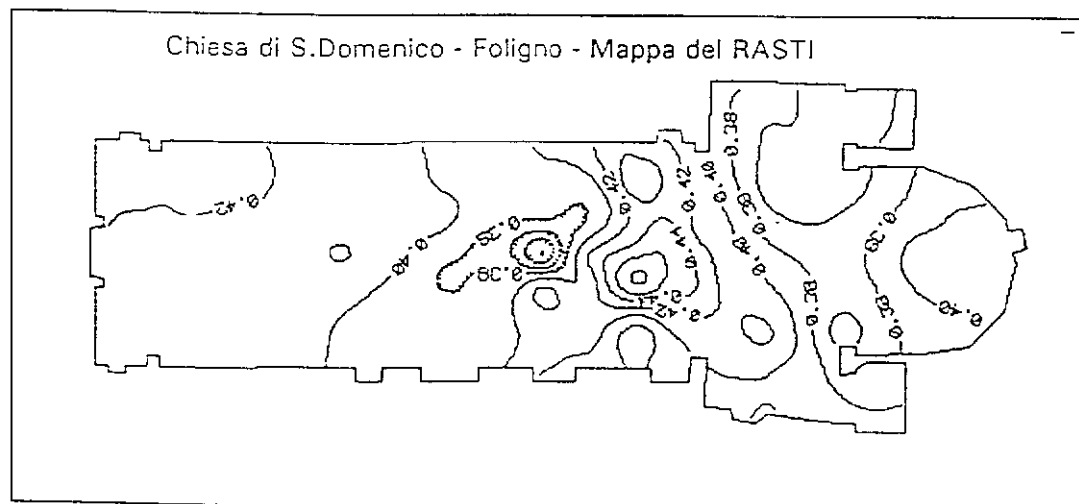


Figura 7.4. Mappa di *STI* rilevata sperimentalmente nell'aprile 1990.

7.3 Analisi delle possibili configurazioni

Sono state studiate cinque possibili configurazioni della sala arredata, corrispondenti sia ad un diverso impiego della stessa, sia ad una diversa configurazione delle superfici acusticamente attive.

In particolare le cinque configurazioni studiate sono le seguenti.

Caso "A" - solo abside

In questa configurazione si prevede di arredare ed impiegare solo la zona absidale della ex-chiesa, disponendo il pubblico nell'abside stessa ed in parte del transetto, e la sorgente sonora addossata alla cortina di separazione dalla navata principale.

Tale cortina, da realizzare in velluto pesante o in tessuto multistrato con riempimento in tessuto spalmato di PVC, ha lo scopo di separare quanto più possibile la zona absidale dalla navata principale. Essa termina ad un'altezza di circa 9 m, ed è sostenuta da una travatura reticolare che attraversa l'arco di separazione fra navata principale e transetto. La stessa travatura reticolare sostiene anche un pannello trasparente inclinato, orientato opportunamente in modo da reindirizzare il suono riflesso verso il pubblico, da realizzarsi in materiale otticamente trasparente (perspex, policarbonato, etc.).

Le figg. 7.5 e 7.6 illustrano tale ipotesi in prospettiva ed in sezione longitudinale.

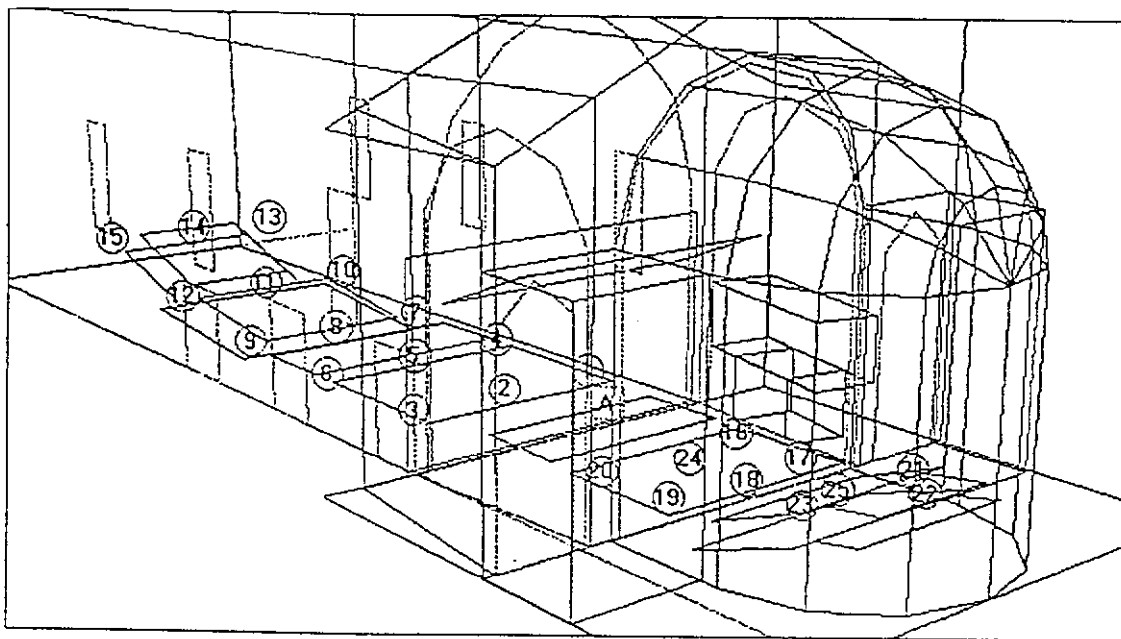


Figura 7.5. Ipotesi di allestimento "A" . Prospettiva

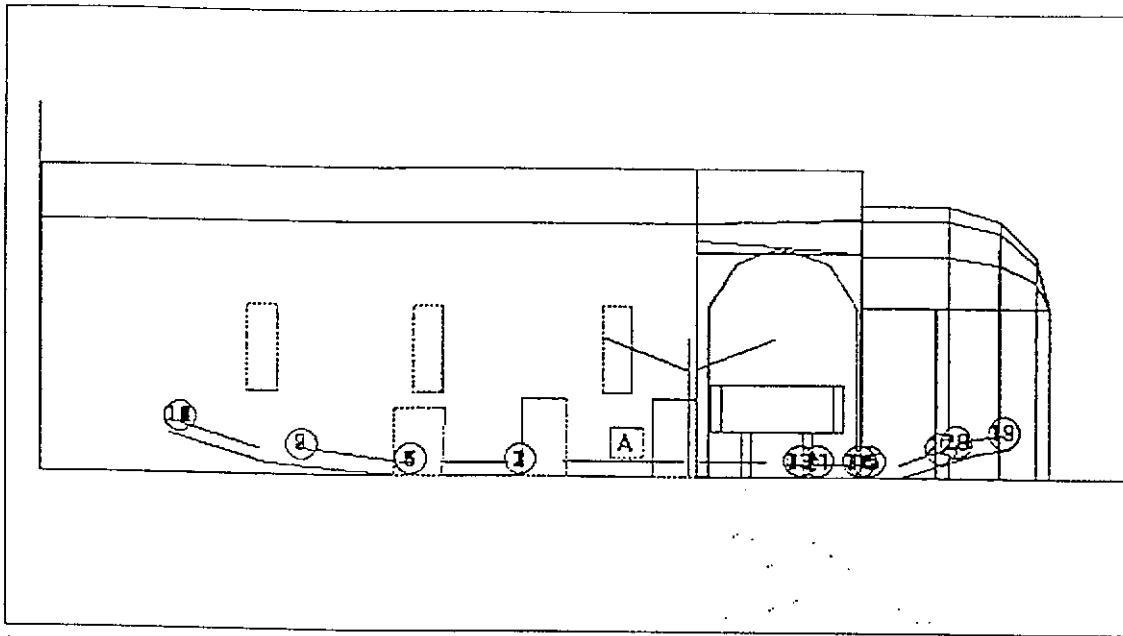


Figura 7.8. Ipotesi di allestimento "B", con riflettore. Sezione longitudinale.

Caso "B" - solo navata principale

In questo secondo caso si mantiene in funzione la cortina di separazione fra navata principale e transetto. La sorgente sonora è situata su un piccolo palco, all'interno della navata principale, mentre al di sopra della stessa viene collocato un pannello riflettente, sempre sostenuto dalla travatura reticolare che attraversa l'arco di separazione fra navata principale e transetto. L'inclinazione di questo riflettore è tuttavia leggermente diversa da quella del riflettore nella zona absidale, poiché deve rinviare raggi riflessi ad una maggior distanza. Per il resto, l'accoppiamento cortina di separazione-riflettore dovrebbe funzionare sostanzialmente allo stesso modo del caso "A". Le figg. 7.7 e 7.8 illustrano la situazione in prospettiva ed in sezione longitudinale.

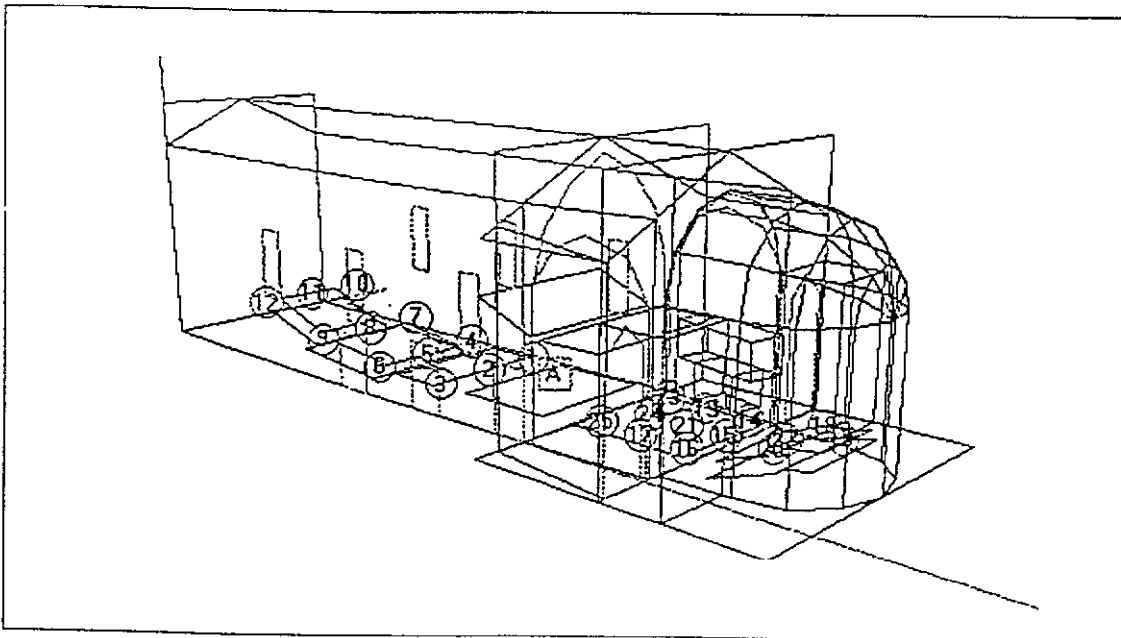


Figura 7.9. Ipotesi di allestimento "C". Prospettiva.

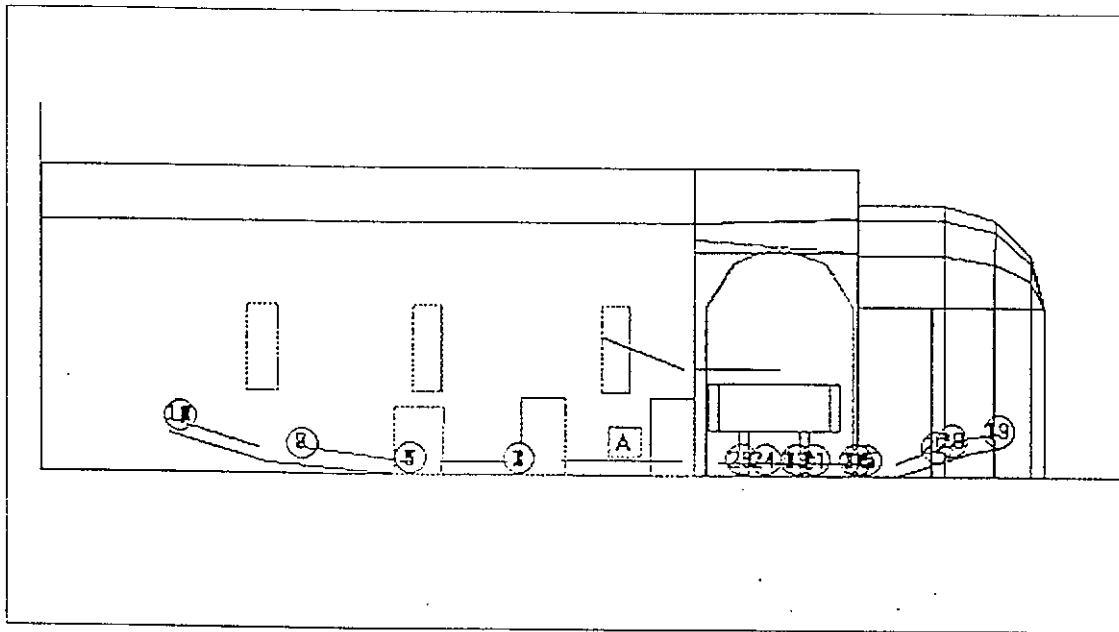


Figura 7.10. Ipotesi di allestimento "C". Sezione longitudinale

Caso "C" - Utilizzo completo, con sorgente nella navata principale

In questa ipotesi si ottiene il massimo numero di posti a sedere, evitando altresì di realizzare una distanza eccessiva fra sorgente ed ascoltatori.

La sorgente sonora si trova infatti nella stessa posizione prevista nel caso precedente, cioè all'interno della navata principale. Essendo però stata rimossa la cortina di separazione, è possibile collocare spettatori anche in tutto il transetto e nell'abside.

Il riflettore rivolto verso la navata principale mantiene la stessa inclinazione del caso "B", mentre quello diretto verso l'abside viene ruotato sino ad essere quasi orizzontale, poichè adesso deve riflettere raggi sonori provenienti da una sorgente che non si trova sotto di esso.

Le figg. 7.9 e 7.10 riportano in prospettiva ed in sezione longitudinale questa ipotesi di allestimento.

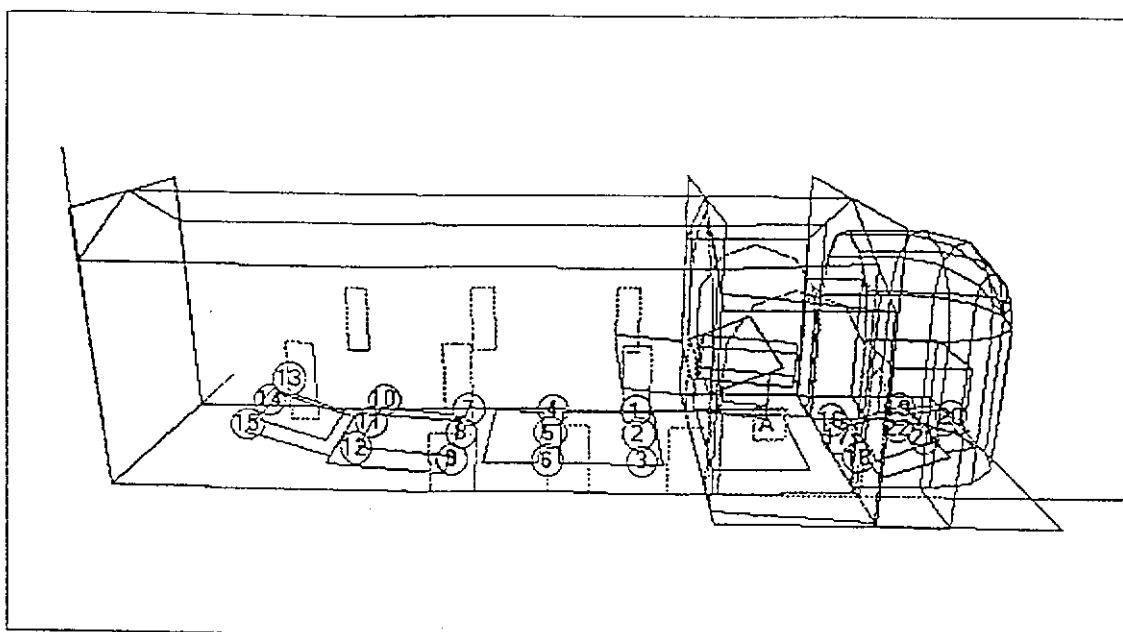


Figura 7.11. Ipotesi di allestimento "D". Prospettiva

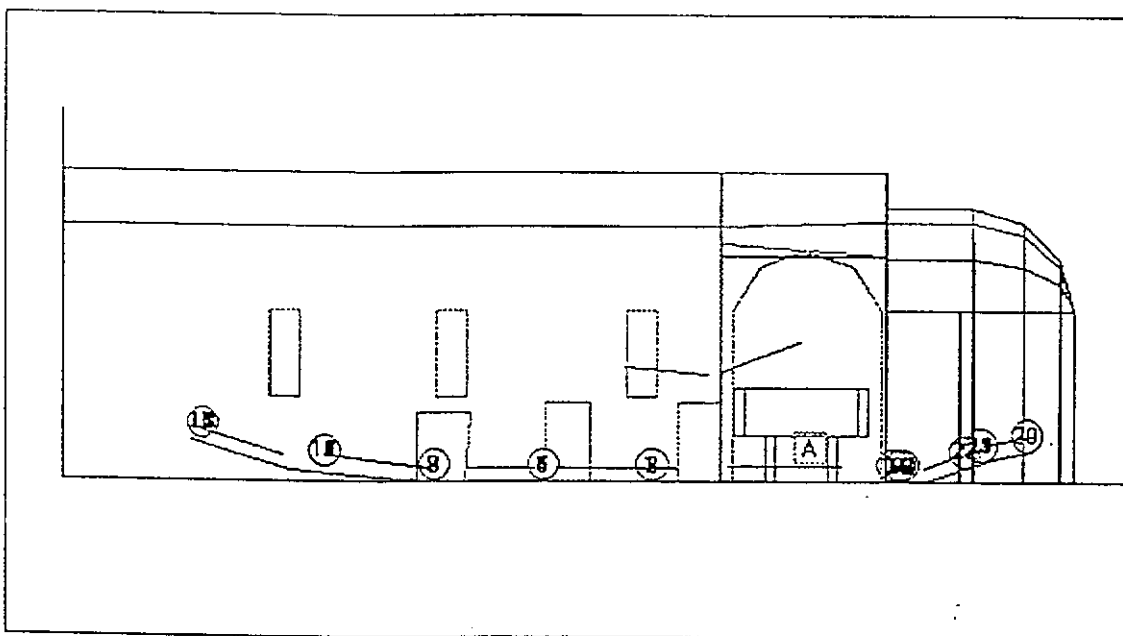


Figura 7.12. Ipotesi di allestimento "D". Sezione longitudinale.

Caso "D" - Utilizzo completo, con sorgente nel transetto

In questa ipotesi si colloca la sorgente sonora al centro del transetto, cosa che rende disponibile un palco di dimensioni più ampie di quanto ottenibile nella navata principale. In tal modo si sacrificano tuttavia i posti a sedere che nell'ipotesi "C" erano collocati nel transetto, ed inoltre è presumibile che anche i posti della parte più lontana della navata principale divengano inutilizzabili, perchè troppo lontani dalla sorgente.

Affinchè il campo sonoro riflesso dai pannelli inclinati venga correttamente reindirizzato, stavolta è necessario che il riflettore posto nella navata principale venga posto ad un'inclinazione molto contenuta (quasi

piatto), mentre quello posto verso l'abside deve assumere circa la stessa inclinazione prevista per il caso "A". Le figg. 7.11 e 7.12 illustrano questa quarta ipotesi di allestimento.

Poichè questa quarta ipotesi di allestimento è quella che presumibilmente verrà impiegata per i grandi concerti sinfonici, è stata suggerita la possibilità di installare un sistema di quinte mobili per racchiudere meglio l'orchestra. Chiaramente, tale sistema preclude l'utilizzo della zona absidale, ma consente un discreto rafforzamento del campo sonoro riflesso verso la navata principale, migliorando altresì la capacità dei musicisti di sentirsi reciprocamente.

Se tale sistema di quinte verrà realizzato, esse potranno venire impiegate (in tutto od in parte) anche nei casi "A", "B", "C" e "D", a discrezione degli esecutori stessi, onde rendere più "raccolto" il campo sonoro nell'intorno della sorgente.

Onde limitare il numero di casi da studiare, la presenza delle quinte è stata saggiata soltanto nell'ipotesi "D", che peraltro è sicuramente quella che ne trae maggior beneficio, dando luogo all'ultimo caso studiato.

Caso "E" - Solo navata principale, con sorgente nel transetto e quinte

Essendo in questo caso scomparsa la necessità di rinviare il suono verso l'abside, anche il riflettore posto entro il transetto è ora inclinato (anche se debolmente) verso la navata principale, in modo da contribuire anch'esso al rafforzamento del campo sonoro di prima riflessione.

La sua posizione quasi orizzontale integra inoltre la funzione delle quinte pieghettate, fornendo utili riflessioni agli stessi esecutori, che in tal modo hanno una migliore possibilità di sentirsi reciprocamente.

L'altezza prevista per le quinte (pannelli in legno incernierati) è di 5 m, e la loro disposizione ad angoli ottusi favorisce la diffusione del suono (è comunque possibile anche una diversa disposizione di questi paraventi, per adeguarsi alla situazione dell'orchestra ed all'eventuale presenza di un coro).

Le figg. 7.13 e 7.14 mostrano in prospettiva ed in sezione longitudinale questa ultima ipotesi di allestimento. Inoltre, la fig. 7.15 illustra una vista del palco dell'orchestra da un punto di osservazione situato al centro della navata principale.

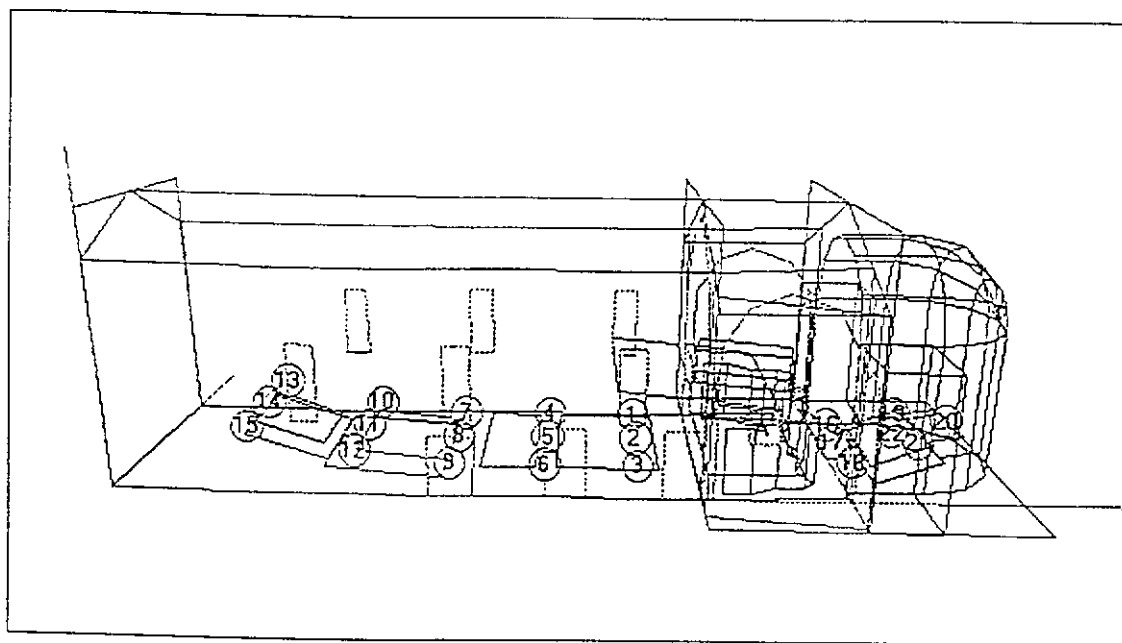


Fig. 7.13. Ipotesi di allestimento "E". Vista prospettica.

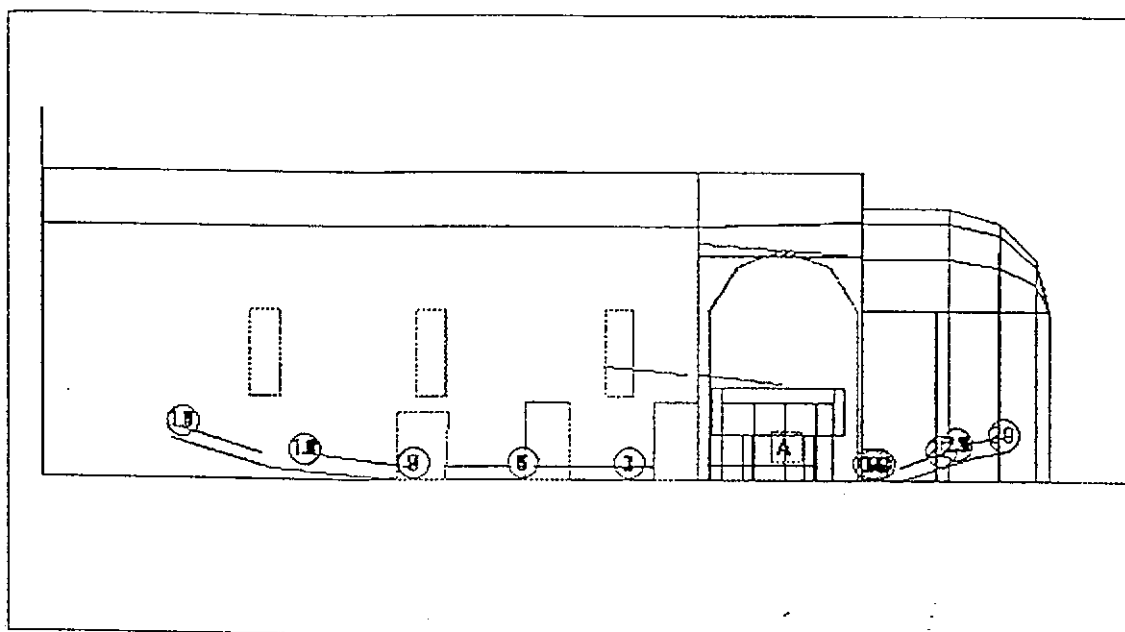


Fig. 7.14. Ipotesi di allestimento "E". Sezione longitudinale.

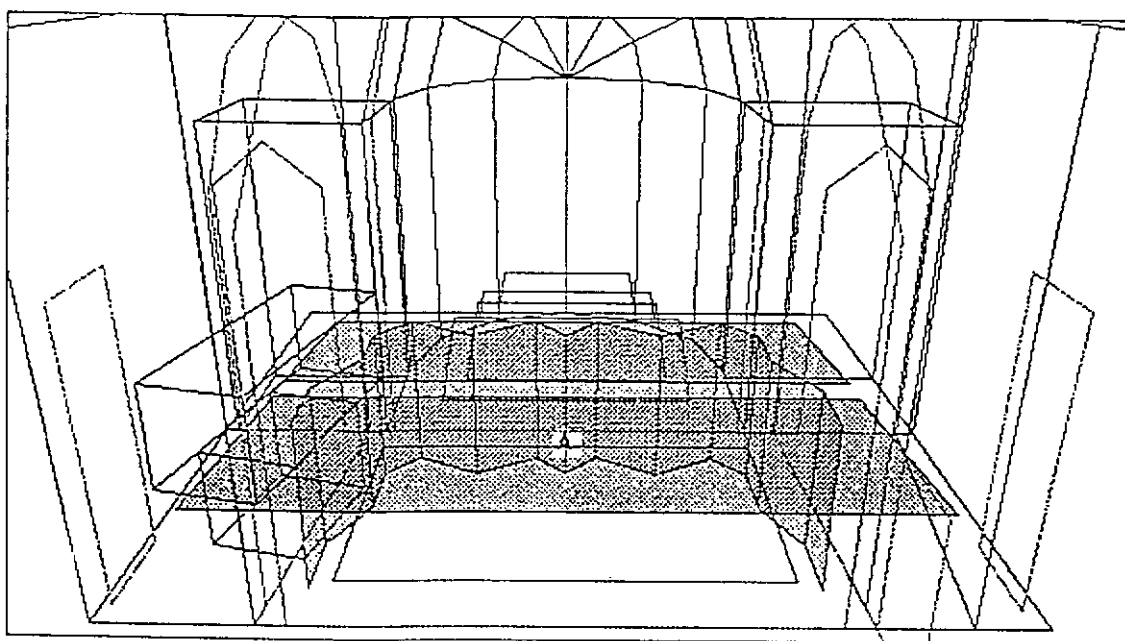


Figura 7.15. Ipotesi di allestimento "E". Vista prospettica dall'interno.

7.4 Valutazioni su base temporale

In questo paragrafo vengono illustrati i risultati ottenuti dall'elaborazione delle risposte all'impulso in alcuni punti particolarmente significativi della sala, onde visualizzare l'effetto prodotto dai pannelli riflettenti, dalla cortina di separazione e dalle quinte sull'andamento temporale dell'energia sonora.

Vengono inoltre prese in considerazione le curve di decadimento sonoro, ottenute dall'integrazione all'indietro della risposta all'impulso (Schroeder backward integration). In particolare, viene valutata la variazione del tempo di riverberazione iniziale (*EDT*, secondo Jordan).

La risoluzione temporale delle risposte all'impulso è stata limitata a 10 ms, che non consente di vedere con grande dettaglio la presenza di echi singoli. Questo per ridurre l'occupazione di memoria, vista la notevole lunghezza delle risposte stesse (4 s) ed il numero di ricevitori (25). Ciononostante è stato possibile osservare come la presenza dei pannelli riflettenti sia in grado di incrementare l'energia sonora di prima riflessione e di ridurre la presenza di echi tardivi.

Per ciascuno dei cinque allestimenti della sala sono state eseguite due simulazioni: la prima in assenza di pannelli riflettenti, la seconda con gli stessi installati e correttamente orientati. La cortina di separazione fra navata principale e transetto è viceversa stata sempre considerata presente, quando la stessa era prevista nella ipotesi progettuale corrispondente (casi "A" e "B").

7.4.1 Caso "A" (ricevitori 20 e 25)

La fig. 7.16 illustra la posizione dei ricevitori più interessanti in questa configurazione.

Per l'analisi temporale sono stati scelti i punti denominati 20 e 25. Il primo infatti è nella zona che più facilmente risente della presenza del transetto sinistro, mentre il secondo si trova al centro dell'abside, in una zona dove facilmente possono avvenire fenomeni di focalizzazione da parte delle pareti curve.

La fig. 7.17 mostra la risposta all'impulso nel punto 20, confrontando la situazione senza pannello riflettente (sinistra) con quella con pannello riflettente (destra).

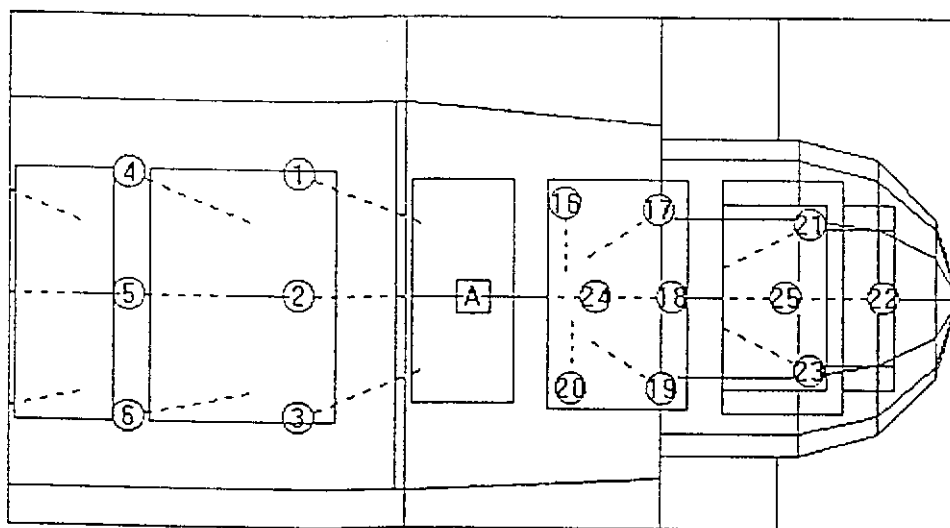


Fig. 7.16. Posizioni dei ricevitori nel caso "A".

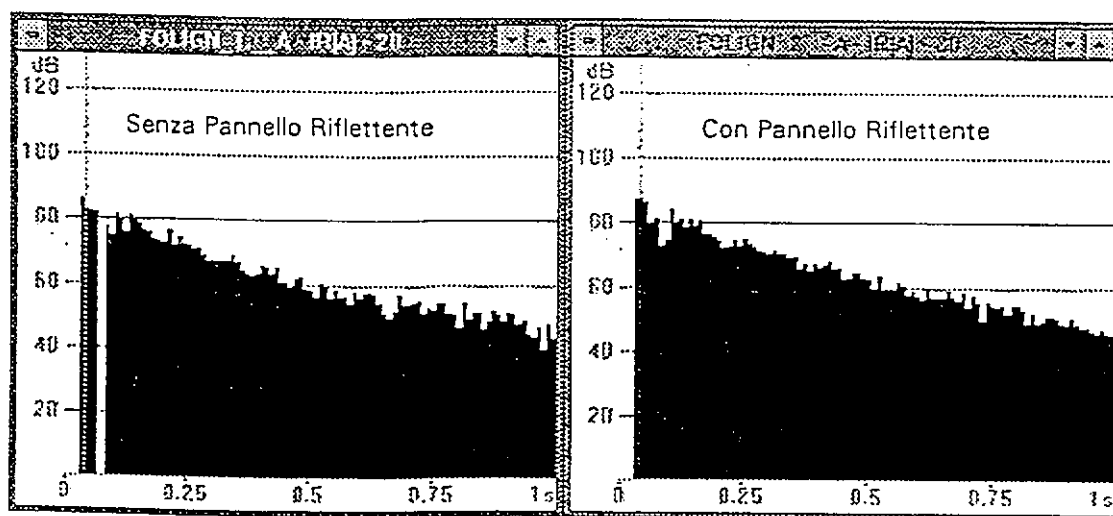


Fig. 7.17. Caso "A". Risposte all'impulso nel punto 20.

Si può notare come la presenza del pannello riflettente incrementi l'energia delle prime riflessioni, colmando il "buco" che altrimenti sarebbe presente.

La fig. 7.18 mostra lo stesso confronto nel punto 25. In questo caso si può notare che, oltre ad incrementare il livello delle prime riflessioni, la presenza del pannello riflettente tende a ridurre l'evidenza del fenomeno di focalizzazione, che è invece ben evidente in assenza dello stesso, con una concentrazione di energia riflessa quasi dello stesso livello dell'onda diretta.

Si nota inoltre che la presenza del pannello riflettente tende a regolarizzare l'andamento della coda sonora riverberante, rendendola più "liscia" e meno fluttuante.

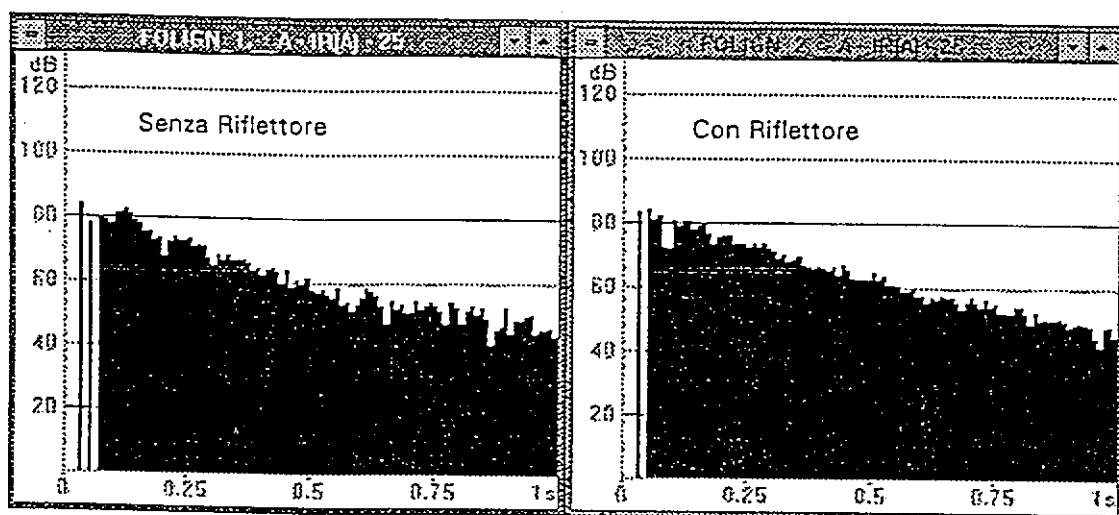


Fig. 7.18. Caso "A". Risposte all'impulso nel punto 25.

L'effetto dell'installazione del pannello riflettente sul tempo di riverberazione è modesto. Nel seguente grafico (fig. 7.19) vengono poste a confronto le situazioni prima e dopo l'installazione dello stesso, nel punto 20. Si può dunque concludere che l'installazione del riflettore nella configurazione "A" è sicuramente benefico. Si può anche affermare che la presenza della cortina fonoassorbente, la parziale esclusione del volume della navata principale, e la presenza delle superfici assorbenti costituite dalle poltroncine imbottite e dal pubblico hanno ridotto i valori del tempo di riverbero entro limiti più che ragionevoli per questo tipo di sala.

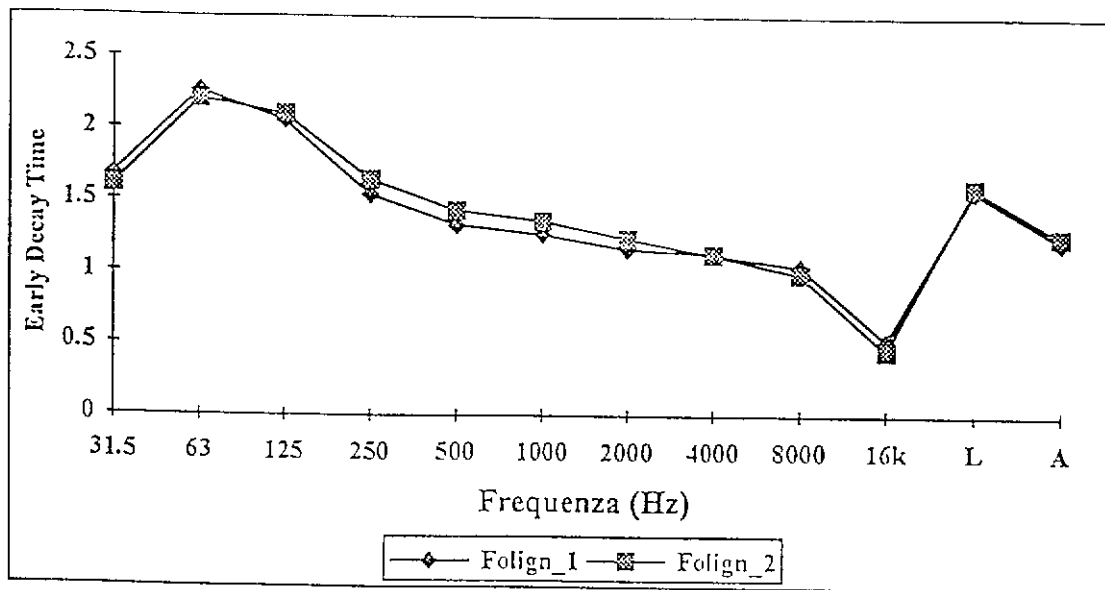


Figura 7.19. EDT per il caso "A", punto 20.

Resterebbe da far scendere un po' il tempo di riverbero alle basse frequenze, e questo è fattibile realizzando sia il palco che le gradinate per il pubblico mediante cassaforme in legno di spessore non elevato, in grado di agire come casse risonanti alle basse frequenze.

In ogni caso si può affermare che, nell'ipotesi di un allestimento parziale dello spazio, con un limitato dispendio di fondi, questa configurazione "A" appare promettente in termini di qualità del campo sonoro.

7.4.2 Caso "B" (ricevitori 4 e 11)

La fig. 7.20 illustra la posizione dei ricevitori in questa configurazione.

Sono stati scelti i ricevitori 4 ed 11: il primo rappresenta un punto situato di lato, all'inizio del secondo blocco di poltroncine, mentre il secondo punto è situato al centro dell'ultima fila di poltroncine.

La fig. 7.21 mostra la risposta all'impulso nel punto 4, confrontando la situazione senza pannello riflettente (sinistra) con quella con pannello riflettente (destra).

In questo caso la differenza è veramente minima, poichè nella navata principale, grazie alle pareti laterali riflettenti e vicine, sono già presente numerose, forti riflessioni laterali precoci, e dunque l'incremento al campo sonoro di prima riflessione fornito dal pannello inclinato posto sopra la sorgente sonora, pur dando comunque un certo miglioramento, risulta quasi impercettibile.

Nella fig. 7.22 sono invece riportate le risposte all'impulso nel punto 11.

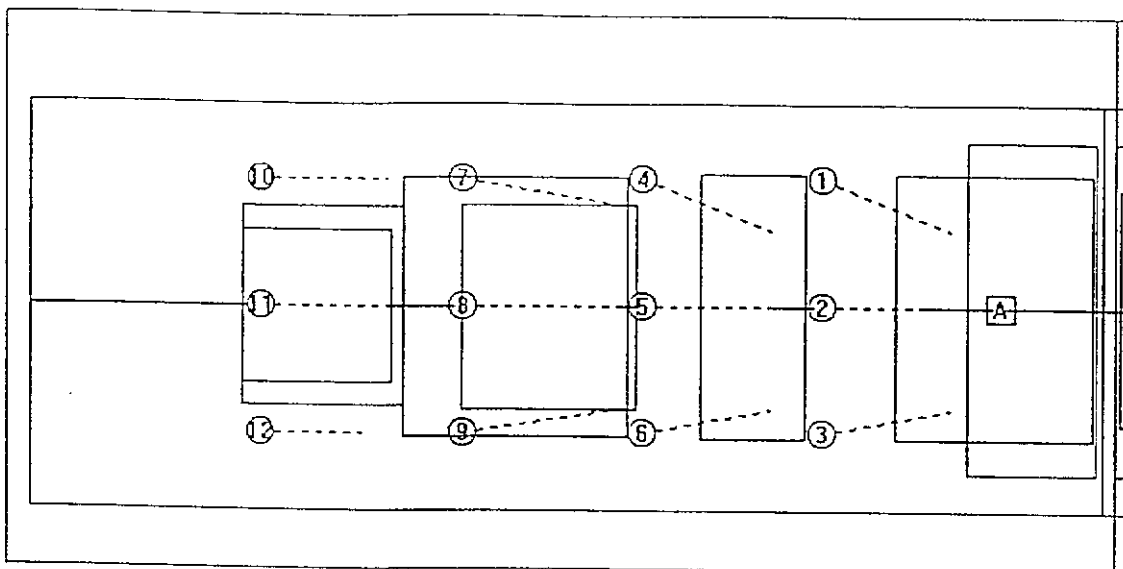


Figura 7. 20. Posizione dei ricevitori nel caso "B".

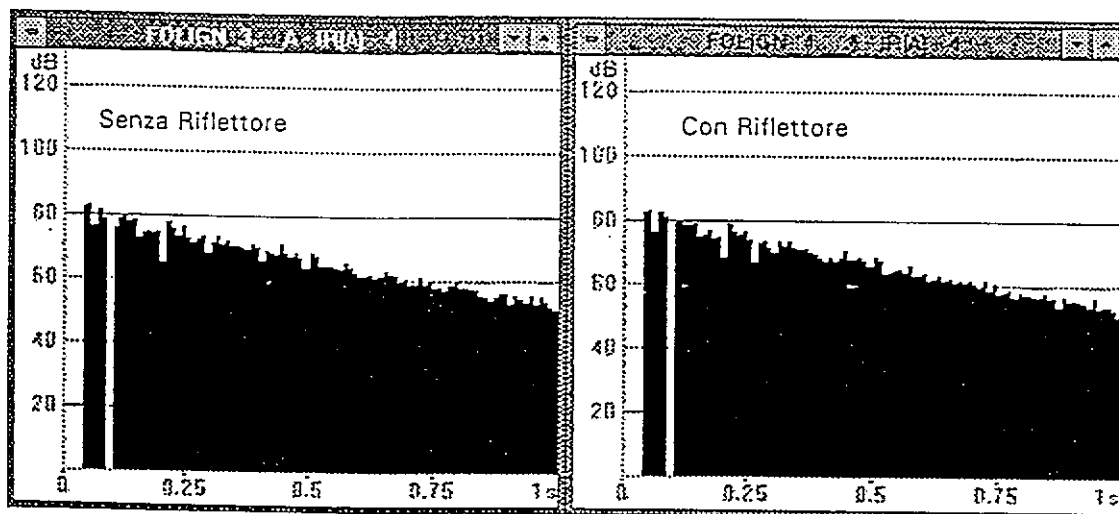


Fig. 7.21. Caso "B". Risposte all'impulso nel punto 4.

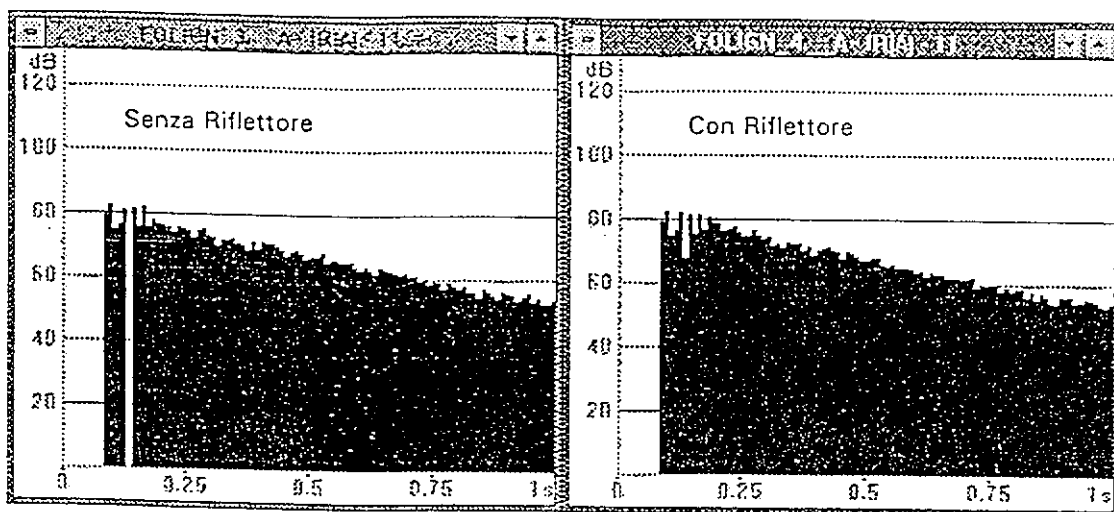


Fig. 7.22. Caso "B". Risposte all'impulso nel punto 11.

In questo punto l'effetto del riflettore è maggiormente visibile, poichè esso colma un "buco" circa 50 ms dopo l'onda diretta e rafforza inoltre il segnale anche nella zona dei 20 ms dopo l'onda diretta.

Infine, la fig. 7.23 mostra la variazione del tempo di riverberazione *EDT* nel punto 11.

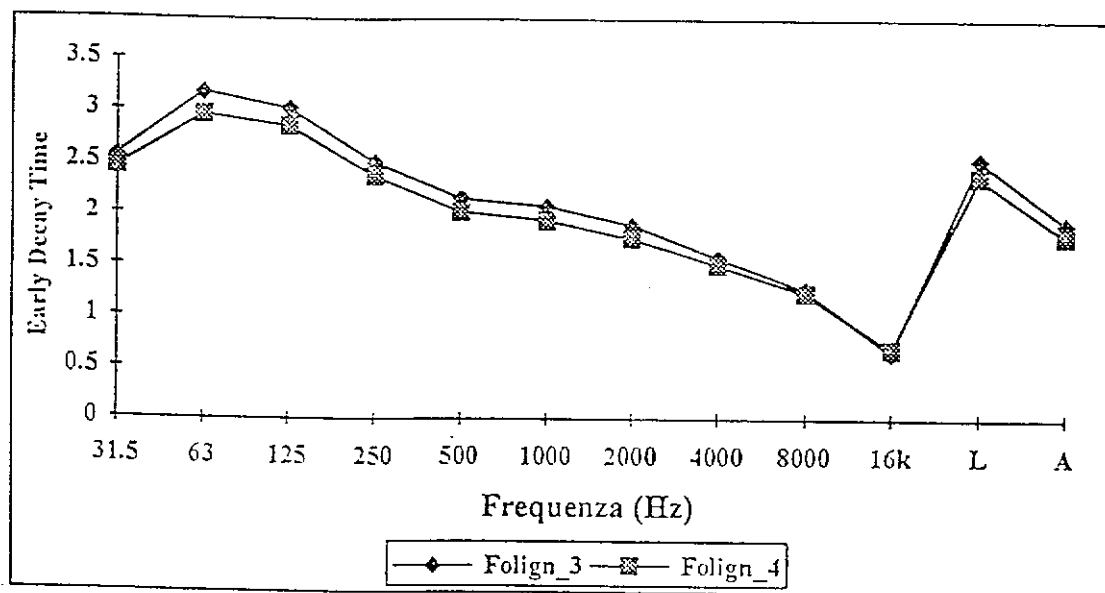


Figura 7.23. *EDT* per il caso "B", punto 11.

In questo caso si nota che un certo effetto di riduzione del tempo di riverbero comincia a divenire osservabile, grazie alla redirectione del campo sonoro verso la superficie altamente assorbente del pubblico causata dal riflettore inclinato.

Si osserva anche che in questa configurazione i tempi di riverberazione sono si calati rispetto alla situazione attuale, grazie all' azione fonoassorbente del pubblico e della cortina di separazione, ma rimangono decisamente più alti che nel precedente caso "A".

Sarebbe pertanto auspicabile che, se si decide di privilegiare inizialmente questo allestimento "B", vengano introdotte ulteriori superfici assorbenti nella navata principale, possibilmente nella parte posteriore della stessa, sia sulle pareti laterali che sulla parete di fondo. Sarebbero ottimali tende di velluto rimborsate e sovrapposte, o altro materiale di adeguato spessore drappeggiato a mo' di tendaggi.

In ogni caso, nelle risposte all'impulso si osservano echi provenienti dalla parete di fondo della sala, che dunque andrebbe in ogni modo trattata: se non è possibile renderla fonoassorbente, si può almeno cercare di renderla diffondente, dotandola di asperità di notevoli dimensioni.

7.4.3 Caso "C" (ricevitori 11 e 22)

La fig. 7.24 illustra la posizione dei ricevitori in questa configurazione.

Il punto 11 è lo stesso già considerato nello studio del caso "B", mentre il punto 22 corrisponde a quello che era il punto 25 nel caso "A" (al centro dell'abside).

La fig. 7.25 mostra la risposta all'impulso nel punto 11, confrontando la situazione senza pannello riflettente (sinistra) con quella con pannello riflettente (destra).

In questo punto la differenza causata dalla presenza del riflettore è pressochè inesistente. Si osserva inoltre che il campo sonoro è relativamente povero di riflessioni precoci, segnalando una situazione non proprio ottimale. Probabilmente il riflettore rivolto verso la navata principale è troppo corto per contribuire efficacemente al rinforzo del suono in questo punto molto lontano, oppure è necessario aggiustarne leggermente l'inclinazione. La fig. 7.26 mostra invece la situazione nell'abside.

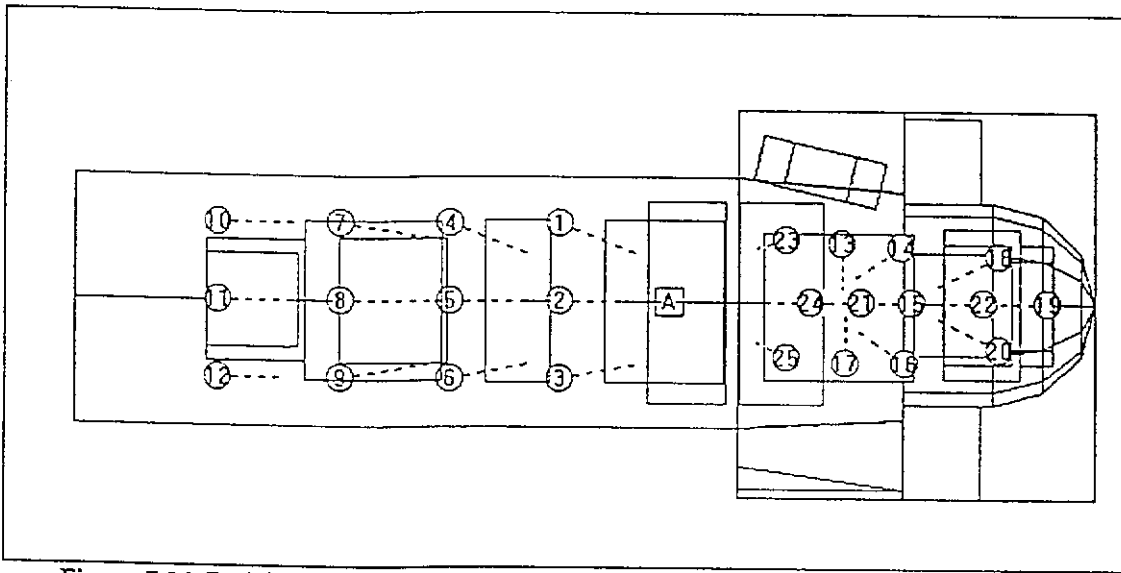


Figura 7.24. Posizione dei ricevitori nel caso "C".

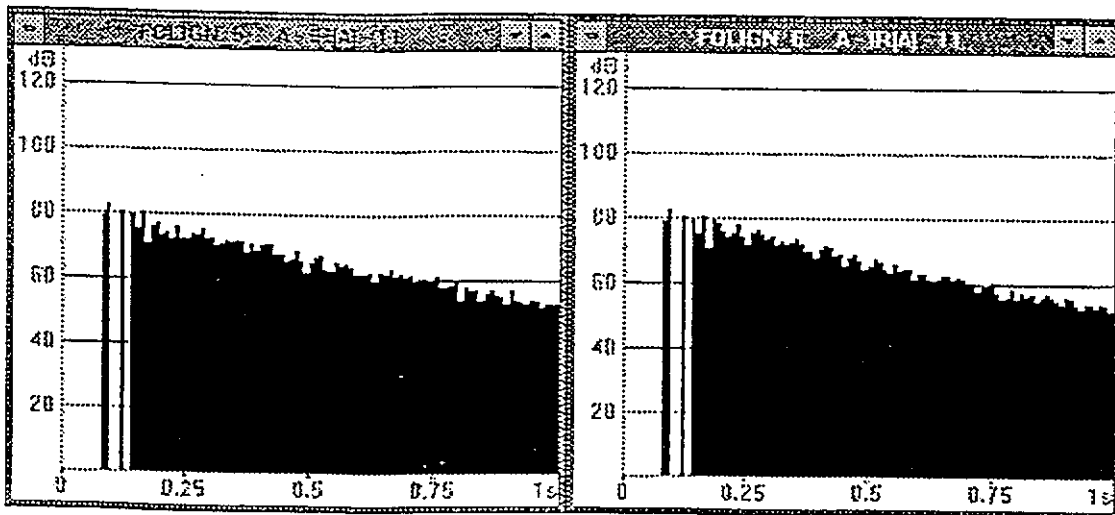


Figura 7.25. Caso "C". Risposte all'impulso nel punto 11.

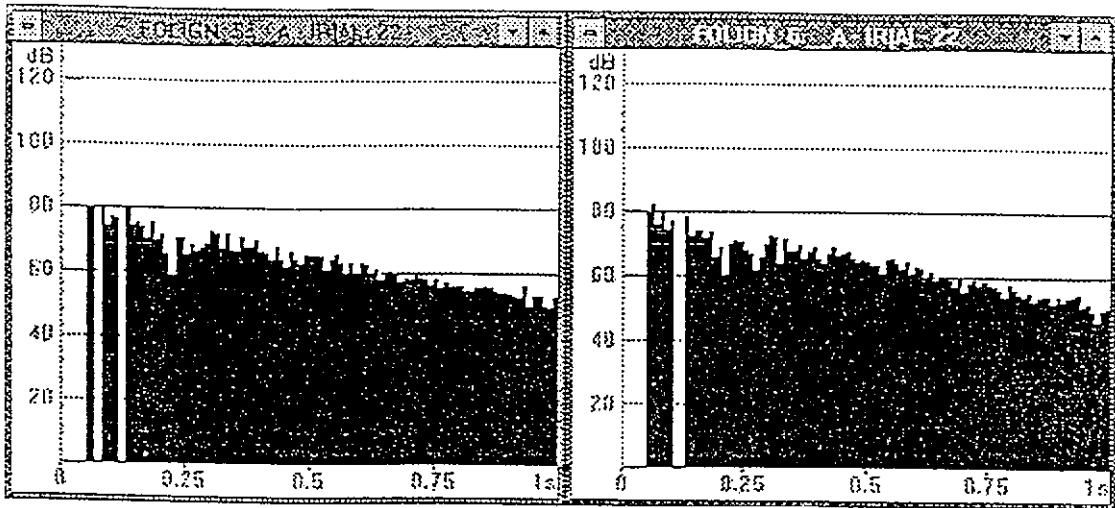


Figura n. 7.26. Caso "C". Risposte all'impulso nel punto 22.

Si ritrova la situazione già evidenziata nel caso "A": il contributo al campo sonoro di prima riflessione prodotto dal riflettore è sensibile, e si ottiene anche una riduzione dell'effetto di focalizzazione.

Infine, per quanto riguarda i tempi di prima riverberazione, la fig. 7.27 illustra i risultati ottenuti nel punto 22.

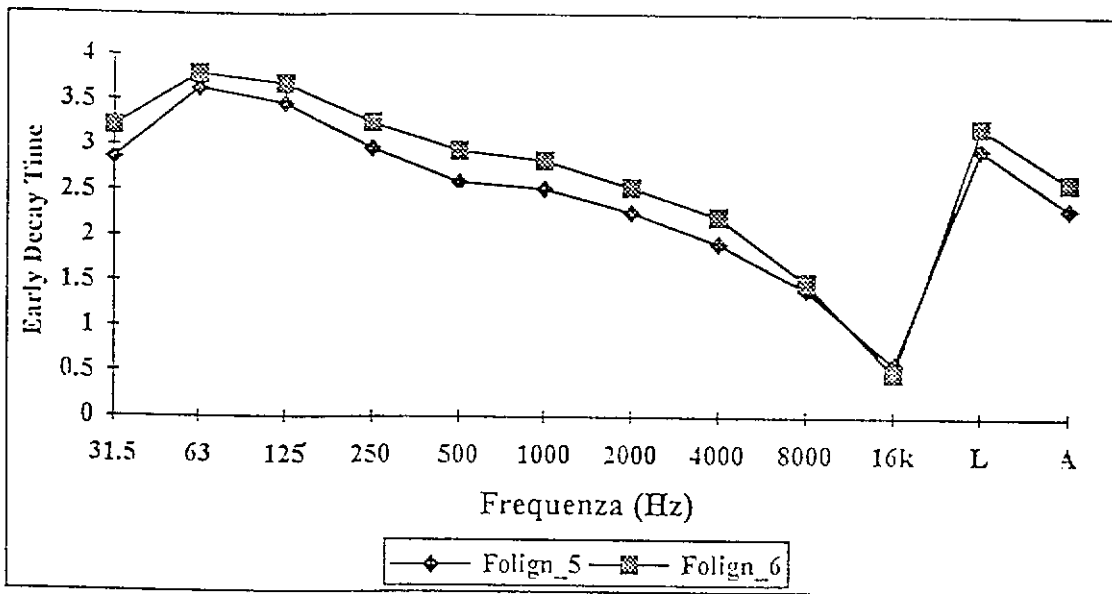


Figura n. 7.27. EDT per il caso "C", punto 11

In questo caso si osserva un significativo aumento dei tempi di prima riverberazione in presenza dei riflettori. E' evidente dunque che questa configurazione andrebbe rivista, modificando probabilmente l'orientamento del riflettore rivolto alla navata principale.

Anche in questo caso, inoltre, si applicano le considerazioni fatte per il caso "B" relativamente all'utilità di introdurre ulteriori superfici assorbenti. Infatti, lasciando comunicanti fra loro i due volumi, si verificano tempi di riverberazione ancora più alti che nei casi precedenti, decisamente inaccettabili per l'utilizzo previsto per la sala (musica sinfonica). Probabilmente in questa configurazione è necessario introdurre materiale assorbente anche nella zona dei transetti e dell'abside, ad esempio installando la cortina fonoassorbente, che

non viene più impiegata per separare la navata principale dal transetto, ed escludere così il volume del transetto sinistro (che è comunque inutilizzato).

7.4.4 Caso "D" (ricevitori 14 e 22)

La fig. 7.28 mostra la posizione dei ricevitori in questo caso. Come nel caso precedente, sono stati selezionati i ricevitori 14 (corrispondente al punto 11 dei casi "B" e "C") e 22.

La fig. 7.29 mostra le risposte all'impulso nel punto 14. In questo caso l'effetto dei riflettori è chiaramente visibile e ben proficuo, poichè la parte iniziale della risposta all'impulso viene considerevolmente arricchita.

La fig. 7.30 riporta invece la situazione nell'abside.

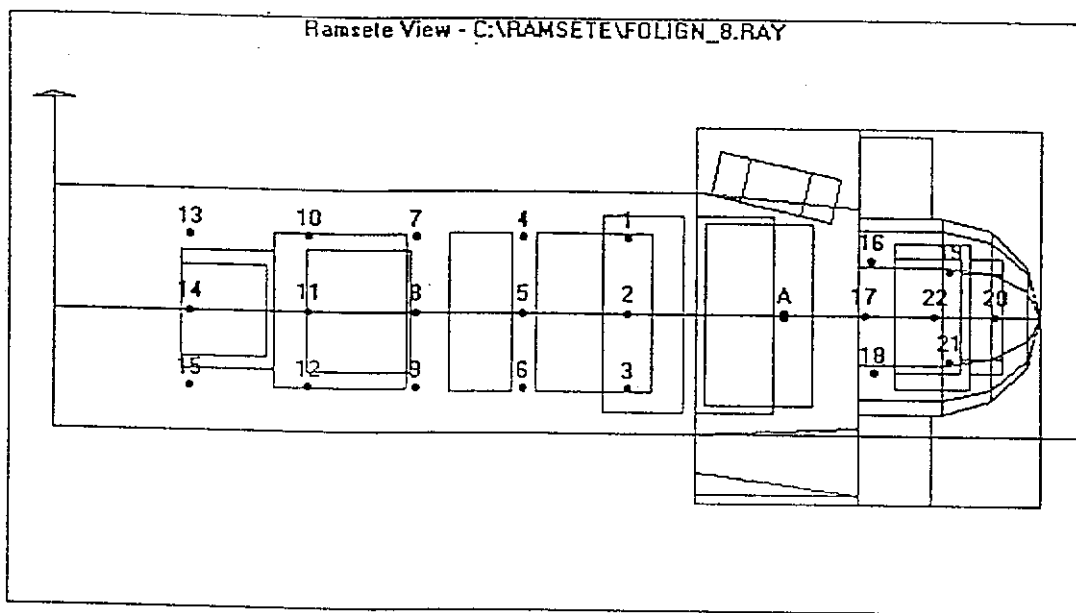


Fig. 7.28. Posizioni dei ricevitori nel caso "D".

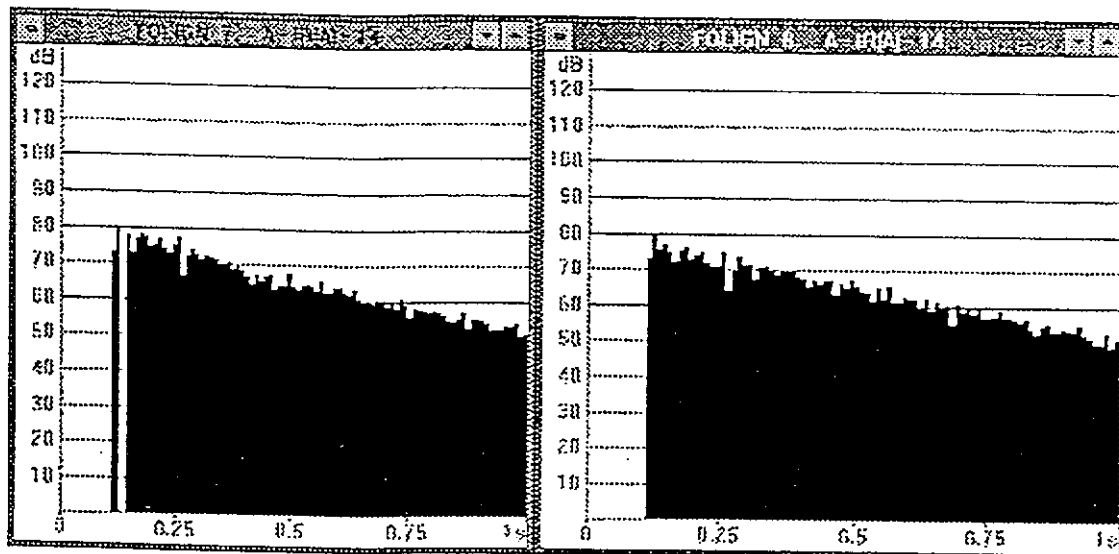


Figura 7.29. Caso "D". Risposte all'impulso nel punto 14.

Questa volta l'effetto dei riflettori è abbastanza modesto nell'abside: si nota soprattutto una regolarizzazione del decadimento sonoro, con l'eliminazione di ondulazioni nella risposta all'impulso, senza

che venga colmato il "buco" esistente dai 20 ai 40 ms dopo l'onda diretta. Anche in questo caso sarebbe opportuno rivedere leggermente il posizionamento del riflettore rivolto verso questa zona. Infine, la fig. 7.31 riporta i tempi di riverberazione *EDT*.

Anche in questo caso la presenza dei pannelli riflettenti ha fatto crescere leggermente i tempi di riverberazione, che comunque risultano più contenuti che nel caso precedente, restando in ogni modo un po' troppo alti.

Restano dunque valide anche nel caso "D" le prescrizioni già illustrate nei casi "B" e "C" riguardo l'introduzione di ulteriori superfici fonoassorbenti.

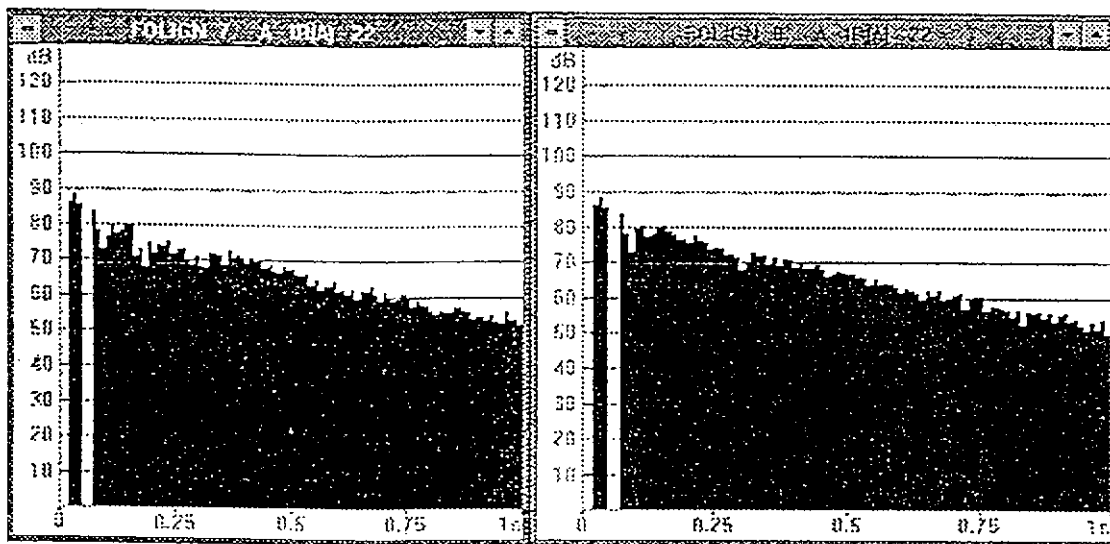


Figura 7. 30. Caso "D". Risposte all'impulso nel punto 22.

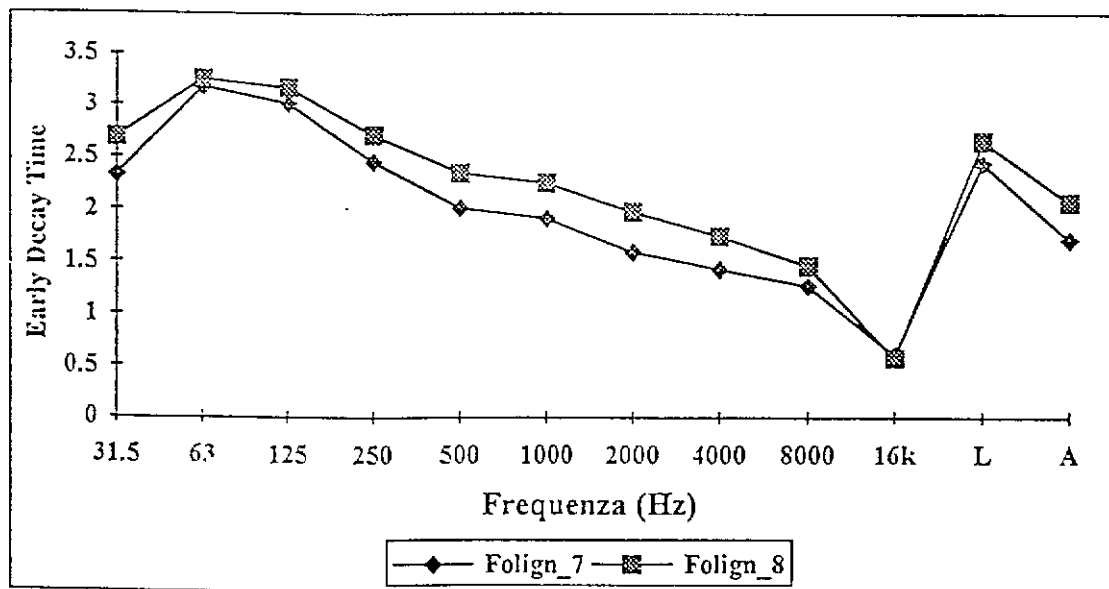


Figura 7.31. *EDT* per il caso "D".

7.4.5 Caso "E" (ricevitori 14 e 22)

In quest'ultimo caso la disposizione dei ricevitori è la stessa del caso "D". In effetti l'unica modifica rispetto ad esso è l'introduzione delle quinte a delimitare l'orchestra.

Poichè però così facendo si preclude l'utilizzabilità per il pubblico della zona absidale, sono stati scelti i ricevitori 4 e 14 (cioè le stesse posizioni considerate nel caso "B").

La fig. 7.32 riporta le risposte all'impulso nel punto 4.

In questo punto l'effetto della presenza del riflettore è notevole. Esso infatti incrementa sostanziosamente il campo sonoro di prima riflessione.

Confrontando questa figura con la precedente 7.21, si osserva che la presenza delle quinte ha comunque nettamente incrementato il campo di prima riflessione, ed ha viceversa fatto scomparire l'arrivo di riflessioni disturbanti fra 100 e 200 ms dopo l'onda diretta.

La fig. 7.33 mostra poi la situazione nel punto 14.

In questo caso si osserva anzitutto che in questo punto l'onda diretta giunge piuttosto attenuata, causa la notevole distanza percorsa, e la presenza della superficie assorbente del pubblico che assorbe completamente la riflessione del pavimento. Pertanto la massima energia arriva 30-40 ms dopo il segnale diretto, e la presenza del riflettore, che pure è benefica, non riesce a modificare sostanzialmente la situazione.

E' probabile, come già osservato, che un riflettore più esteso verso la navata principale possa fornire qualche miglioramento.

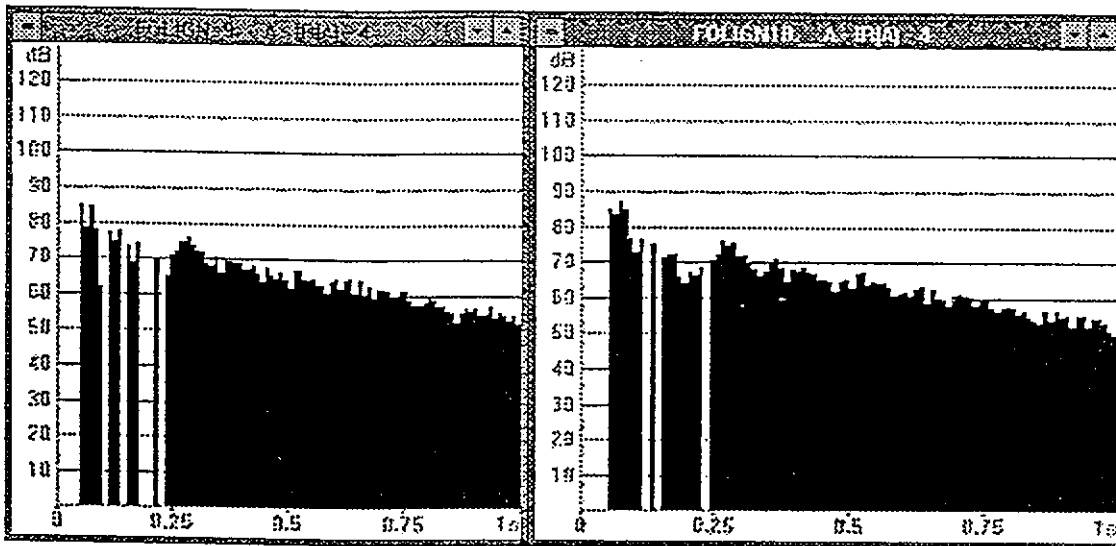


Fig. 7.32. Caso "E". Risposte all'impulso nel punto 4.

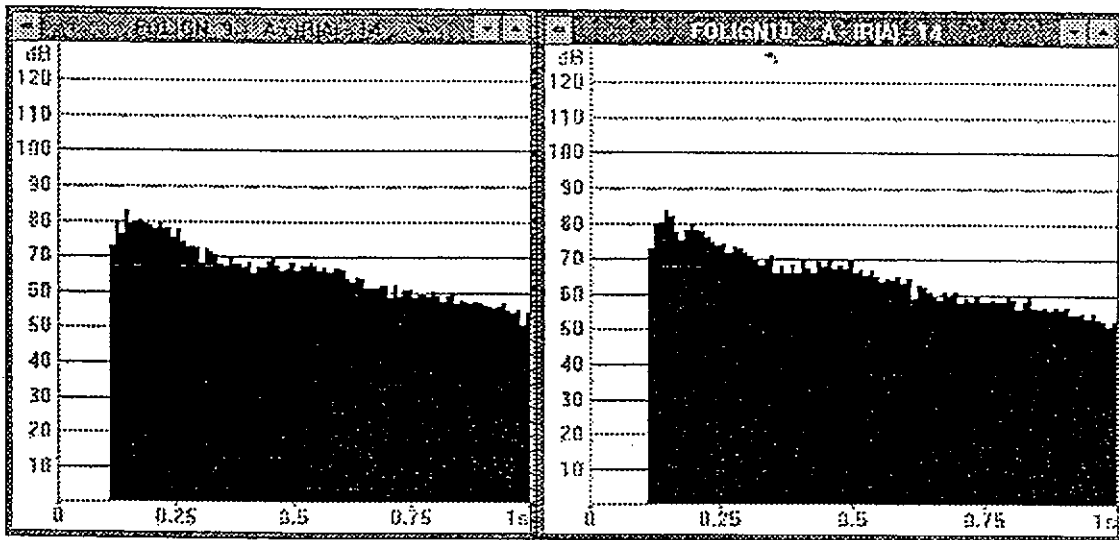


Figura 7.33. Caso "E". Risposte all'impulso nel punto 14.

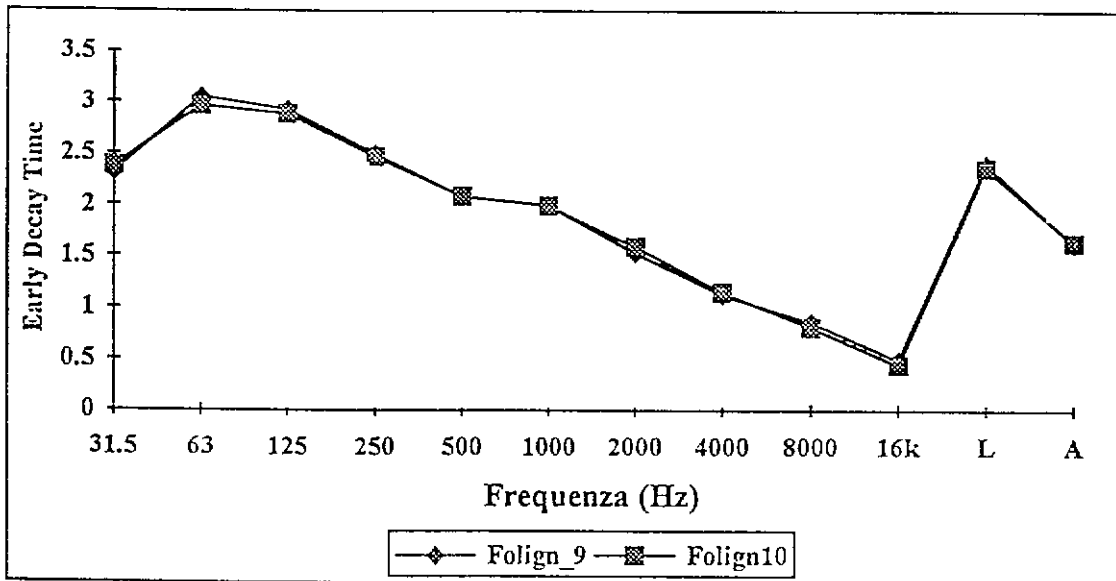


Figura 7.34. EDT per il caso "E".

Infine, la fig. 7.34 riporta i tempi di riverberazione *EDT* per quest'ultimo caso: la variazione causata dall'installazione dei pannelli riflettenti è quasi nulla. Tuttavia i valori dei tempi di riverberazione non sono altissimi, anche se la situazione è tutto sommato assimilabile al caso "B" nel quale pure veniva impiegata solo la navata principale. Questa configurazione ha comunque il vantaggio di fornire una maggior capienza, e rendere disponibile una zona per l'orchestra più funzionale rispetto al caso "B".

Considerato che la zona absidale non viene utilizzata, e che un po' di assorbimento in più non farebbe certo male, si propone come ulteriore miglioria di collocare la cortina fonoassorbente di separazione fra il transetto e l'abside stessa. Ciò evirebbe anche eventuali ritorni focalizzati verso gli orchestrali stessi.

7.4.6 Confronto finale fra i tempi di riverberazione delle cinque ipotesi studiate

La fig. 7.35 illustra il confronto fra i tempi di riverbero dei cinque casi studiati, relativamente alla configurazione completa di pannelli riflettenti.

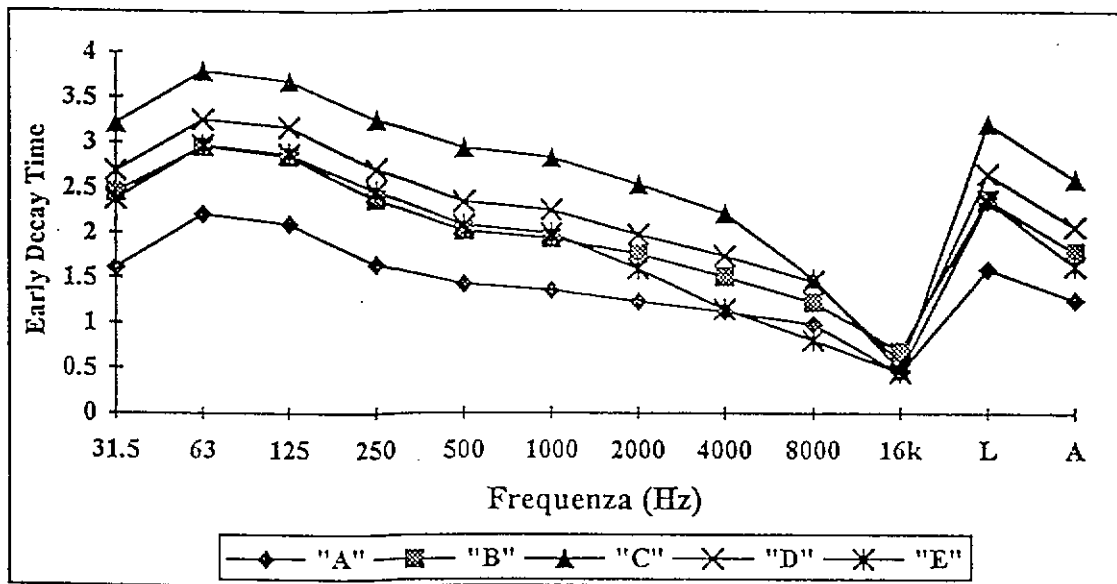


Fig. 7.35. Confronto fra i tempi di riverberazione EDT dei cinque casi studiati

Si osserva che il caso "A" è decisamente il più favorevole. I casi "B" e "E" (solo navata principale) sono fra loro quasi eguali. Seguono poi il caso "D" ed infine il caso "C" che è il peggiore.

In base a questa prima analisi si può dunque concludere che l'ipotesi di realizzare anzitutto l'allestimento "A" è la più sicura, e consente di rendere operativa almeno una parte della sala, con condizioni acustiche accettabili. Essa consente comunque in futuro la possibilità di effettuare anche gli altri allestimenti.

7.5 Considerazioni conclusive

I rilevamenti sperimentali hanno evidenziato una serie di problemi di carattere acustico, pur lasciando intravedere la possibilità di realizzare, effettuate le opportune opere e correzioni, uno o più ambienti acusticamente accettabili a diversi livelli.

Le simulazioni effettuate all'elaboratore, di cui si è riferito, hanno quindi consentito di valutare gli effetti derivanti dalla realizzazione di una vera e propria "macchina teatrale", capace di intervenire sull'acustica della sala organizzata secondo diverse configurazioni.

Dall'esame dei risultati conseguiti con le simulazioni numeriche si possono desumere le seguenti considerazioni:

- la configurazione "A" è sicuramente quella che consente di realizzare le migliori condizioni di ascolto;
- la configurazione "B" appare alquanto interessante in quanto consente di ridurre la profondità della sala, eliminando così un problema che era emerso nel corso delle misure. La presenza del pannello riflettore consentirà poi di migliorare la distribuzione delle prime riflessioni, specie dopo che si sarà intervenuti, a realizzazione ultimata, a tararne opportunamente l'inclinazione;
- la configurazione "C" corrisponde ad una modalità di utilizzazione ancora da indagare, nel senso che la sua utilizzazione potrà essere portata al meglio solo a realizzazione ultimata, tarando opportunamente l'inclinazione di entrambi i pannelli riflettori;

· la configurazione "D" migliora la situazione rispetto alla precedente, specie in relazione ai valori del tempo di riverberazione. Anche qui peraltro rimane da effettuare una più accurata valutazione dell'inclinazione dei pannelli riflettori;

· la configurazione "E" è stata ipotizzata allo stato attuale solo come indicazione di una strada da seguire: la realizzazione di una adeguata "camera per orchestra" è sicuramente un traguardo da raggiungere, specie in un ambiente non nato per far musica, se non per organo, tenuto conto del fatto che oggi molti teatri d'opera si stanno attrezzando in tal senso anche se l'ambiente è già di per se abbastanza adeguato allo scopo.

Riepilogando e concludendo, la realizzazione di un sistema meccanico che consenta di sostenere ad altezza adeguata un complesso di pannelli acusticamente riflettenti costituisce, dal punto di vista acustico, l'elemento qualificante nella trasformazione della ex-chiesa di S. Domenico in sala per l'esecuzione di musica per orchestra senza dover far ricorso ad impianti elettronici di sonorizzazione che spesso falliscono lo scopo e, soprattutto, raramente consentono una qualità d'ascolto paragonabile a quella che si ottiene "dal vivo".

8 BIBLIOGRAFIA

- [1] Y. Ando (1985), "Concert hall acoustics", Springer-Verlag, Berlin.
- [2] B.S. Atal, M.R. Schroeder, G.M. Sessler (1966), "Subjective reverberation time and its relation to sound decay", Proc. 5 ICA, Liège.
- [3] M. Barron, C.B. Chinoy (1979), "1:50 scale acoustic models for objective testing of auditoria", Appl Acoust. 12, 361-75.
- [4] M. Barron (1983), "Auditorium Acoustic Modelling Now", Appl. Acoust. 16, 279-290.
- [5] M. Barron (1984), "Impulse test techniques for auditoria", Appl. Acoust. 17, 165.
- [6] BBC Research Department (1975), "Acoustic scaling: the design of a large music studio for Manchester (Final Report)", Report No. 1975/35.
- [7] L.L. Beranek (1962), "Music, acoustics and architecture", John Wiley & Sons, New York, rist. Krieger, Huntingdon, New York (1979).
- [8] L.L. Beranek, T.J. Schultz (1965) "Some recent experiences in the design and testing of concert halls with suspended panel arrays", Acustica 15, 307.
- [9] L.L. Beranek (1992), "Concert hall acoustics - 1992", J. Acoust. Soc. Am. 92(1), 1-39.
- [10] J. Borish (1984), "Extension of the image model to arbitrary polyhedra", J. Acoust. Soc. Am. 75(6), 1827-36.
- [11] J.S. Bradley (1986), "Predictors of speech intelligibility in rooms", J. Acoust. Soc. Am. 80(3), 837-845.
- [12] A. Cocchi (1990), "Inquinamento da rumore", Maggioli Editore, Rimini, 2 ed.
- [13] A. Cocchi, A. Farina, L. Rocco (1990), "Reliability of scale-model researches: a concert hall case", Appl. Acoust. 30, 1-13.
- [14] L. Cremer, H.A. Müller, T.J. Schultz (1982), "Principles and applications of room acoustics", Applied Science Publishers, London.
- [15] D. Gottlob (1973) "Vergleich objektiver akustischer Parameter mit Ergebnissen subjektiver Untersuchungen an Konzertsälen", Dissertation, Göttingen Univ.
- [16] Hengjian Ye, Shusheng Cui, Sujuan Ye (1983), "Simulation of the absorption characteristics of the materials for acoustic scale model experiment". Revue d'acoustique, 1.
- [17] T. Hidaka, T. Okano, L.L. Beranek (1991), "Studies of Inter-Aural Cross Correlation (IACC) and its relation to subjective evaluation of the acoustics of concert halls", 122 Meeting of the Acoustical Society of America, Houston, Texas.
- [18] H. Hodgson (1988), "On the prediction of sound fields in large empty rooms", J. Acoust. Soc. Am. 84(1), 253.
- [19] T. Houtgast, J.M. Steeneken (1973), "The modulation transfer function in room acoustics as a predictor of speech intelligibility", Acustica 28, 66-73.
- [20] T. Houtgast, J.M. Steeneken, (1985), "A review of the MTF concept in room acoustics and its use for estimating speech intelligibility in auditoria", J. Acoust. Soc. Am. 77(3), 1060-1077.
- [21] V.L. Jordan (1941), "Elektroakustiske Undersøgelser af Materialer og Modeller", Reitzels Forlag/Axel Sandel, København.
- [22] V.L. Jordan (1968), "Einige Bemerkungen über Anhall und Anfangsnachhall in Musikräumen", Appl. Acoust. 1, 29.

- [23] V.L. Jordan (1970), "Acoustical criteria for auditoriums and their relation to model techniques", *J. Acoust. Soc. Am.* 47, 408-12.
- [24] V.L. Jordan (1980), "Acoustical design of concert halls and theaters", Applied Science Publishers, London.
- [25] L.E. Kinsler, A.R. Frey, A.B. Coppens, J.V. Sanders (1982), "Fundamentals of acoustics". 3 ed.. John Wiley & Sons, New York.
- [26] V.D. Knudsen (1932), "Architectural acoustics", John Wiley, New York.
- [27] A. Krokstad, S. Strøm, S. Sørnsdal (1983), "Fifteen years' experience with computerized ray-tracing", *Appl. Acoust.* 16, 291-312.
- [28] K.D. Kryter (1962), "Methods for the calculation and use of Articulation Index", *J. Acoust. Soc. Am.* 34, 1689.
- [29] A. Kulowski (1985), "Algorithmic representation of the ray-tracing technique", *Appl. Acoust.* 18, 449-469.
- [30] R. Kürer, U. Kurze (1967/68), "Integrationsverfahren zur Nachhallauswertung", *Acustica* 19, 313.
- [31] R. Kürer (1969), "Zur Gewinnung von Einzelkriterien bei Impulsmessungen in der Raumakustik", *Acustica* 21, 370.
- [32] H. Kuttruff (1991), "Room acoustics", 3 ed., Elsevier Applied Science, New York.
- [33] H. Lee, B.H. Lee (1988), "An efficient algorithm for the image model technique", *Appl. Acoust.* 24, 87-115.
- [34] H. Lehnert (1993), "Systematic errors of the ray-tracing algorithm", *Appl. Acoust.* 38, 207-221.
- [35] E. Michel (1921), "Hörsamkeit grosser Räume", Viewig, Braunschweig.
- [36] P.M. Morse, K.U. Ingard (1968), "Theoretical acoustics", McGraw-Hill, New York.
- [37] K. Nakagawa, T. Miyajima, Y. Tahara (1993), "An improved geometrical sound field analysis in rooms using scattered sound and an audible room acoustic simulator", *Appl. Acoust.* 38, 115-129.
- [38] G.M. Naylor (1993), "ODEON - Another hybrid room acoustical model", *Appl. Acoust.* 38, 131-143.
- [39] D.J. Nefske, J.A. Wolf, L.J. Howell (1982), "Structural-acoustic finite element analysis of the automobile passenger compartment: a review of current practice", *J. Sound. Vib.* 80(2), 247-266.
- [40] R.J. Pinnington, C.B. Nathanail (1993), "Modelling auditorium acoustics with light", *Appl. Acoust.* 40, 21-46.
- [41] J.-D. Polack (1993), "Playing billiards in the concert hall: the mathematical foundations of geometrical room acoustics", *Appl. Acoust.* 38(2-4), 235-244.
- [42] Presidenza della Repubblica Italiana, Decreto Legislativo 15 agosto 1991, n. 277.
- [43] W. Reichardt, O. Abdel Alim, W. Schmidt (1975), "Definition und Meßgrundlage eines objektiven Maßes zur Ermittlung der Grenze zwischen brauchbarer Durchsichtigkeit bei Musikdarbietung", *Acustica* 32, 126.
- [44] W.C. Sabine (1924), "Collected papers on acoustics", Harvard University Press, Cambridge, rist. Dover, New York (1964).
- [45] M.R. Schroeder (1965), "New method of measuring reverberation time", *J. Acoust. Soc. Am.* 37, 409-12.
- [46] F. Spandöck (1934), "Akustische Modellversuche", *Ann. Phys. (Leipzig)* V, 20, 345-60.
- [47] U. Stephenson (1990), "Comparison of the mirror image source method and the sound particle simulation method", *Appl. Acoust.* 29, 35-72.
- [48] R.A. Tenenbaum, J.G. Slama, M.L. Ballestreros (1992), "Numerical simulation of room acoustics: a new approach for source modelling", *Proc. 14 ICA, Beijing, China, paper F6-11*.