

**"RAMSETE"**  
**UN NUOVO SOFTWARE PER LA PREVISIONE DEL CAMPO SONORO IN  
TEATRI, AMBIENTI INDUSTRIALI ED AMBIENTE ESTERNO**

A. Farina, P. Galaverna, G. Truffelli

Dipartimento di Ingegneria Industriale, Università di Parma

**SOMMARIO**

La memoria presenta un nuovo algoritmo di previsione del campo sonoro in grandi ambienti ed in esterno, basato sul tracciamento di piramidi. L'algoritmo è stato implementato dagli autori in un codice di calcolo su personal computer, comprendente anche un CAD dedicato ed idonei programmi di post-elaborazione.

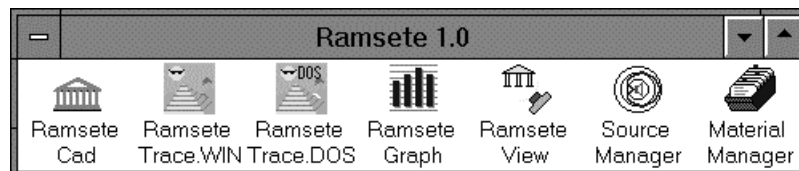
Il pacchetto "Ramsete" si propone quindi come un valido strumento di lavoro per il progettista acustico, sia in fase di definizione di interventi di correzione acustica, sia per la progettazione ex-novo.

Vengono presentati sommariamente i vari programmi di calcolo che costituiscono il sistema, e viene spiegato il fondamento teorico dell'algoritmo di calcolo, illustrandone le peculiarità innovative rispetto agli altri tracciatori di fasci divergenti, soprattutto in termini di velocità di elaborazione e di versatilità.

La mancanza di spazio impedisce la presentazione di alcuni risultati ottenuti a confronto con verifiche sperimentali, che mostrano la precisione raggiungibile ed i limiti impliciti nella metodica utilizzata: ad essi verrà entro breve dedicato un apposito articolo sulla Rivista Italiana di Acustica.

**INTRODUZIONE**

Il pacchetto Ramsete è formato da sette programmi:



Ramsete CAD è un vero e proprio CAD per la creazione di geometrie tridimensionali che accetta in ingresso anche disegni realizzati con AutoCAD. Esso consente di lavorare contemporaneamente su più finestre, con vista in pianta, sezioni ed assonometria. Consente di introdurre i principali elementi geometrici: pavimento, pareti, tetti, porte, finestre, ricevitori e sorgenti, cui può essere assegnato un orientamento. Ciò è importante soprattutto per sorgenti direttive. Alla fine il lavoro può essere salvato in un file con l'estensione .RAY oppure .DXF.

Aperto il programma Material Manager ci si ritrova in un ambiente di tipo "spreadsheet" che contiene i dati di assorbimento ed isolamento acustico dei materiali nelle 10 bande di frequenza considerate (da 31.5 a 16000 Hz).

Il Source Manager serve per generare e visualizzare i file che contengono i dati sulle sorgenti sonore (.SPK). Esso comprende anche un modulo, chiamato ISO 3744, per l'utilizzo diretto di dati di livello sonoro rilevati attorno ad una sorgente in accordo con le metodiche per la determinazione dei livelli di potenza sonora secondo le norme ISO [1]. I dati della sorgente possono poi venire editati in forma tabellare o visualizzati in forma grafica. Source Manager è infine in grado di importare file che contengono dati su altoparlanti provenienti dal programma Modeler della Bose Corporation.

Ramsete Trace esiste in due versioni: Windows e DOS (più veloce ma con limiti di memoria). Esso costituisce il tracciatore di piramidi vero e proprio.

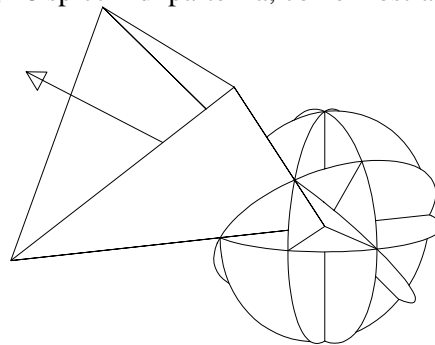
Ramsete Graph legge uno o più file elaborati da Ramsete Trace e consente di visualizzare in forma grafica le seguenti informazioni: risposta all'impulso in ciascun ricevitore; risposta integrata secondo Schroeder (curva di decadimento); spettro in ottave in ciascun punto ricevente; tabelle di tutti i dati (SPL, tempi di riverbero).

Ramsete View è un secondo post-processor, che consente da un lato di effettuare visualizzazioni tridimensionali prospettiche delle geometrie disegnate con Ramsete CAD o con AutoCAD, dall'altro di mappare (sia a colori che con curve isolivello) in pianta o in prospettiva i risultati di Ramsete Graph (livelli sonori, tempi di riverbero) e tutti i tipici parametri acustici (Indici di Chiarezza, Definizione, STI, etc.). E' stato implementato un algoritmo di rendering per dare all'utente la possibilità di ottenere output grafici di livello professionale per la presentazione del proprio lavoro.

#### ALGORITMO DI CALCOLO

La principale peculiarità di Ramsete è l'utilizzo di fasci piramidali al posto dei tradizionali raggi o dei fasci conici.

La generazione delle piramidi è perfettamente isotropa, mediante un algoritmo [2] di progressiva bisezione degli 8 spicchi di partenza, come mostra la seguente figura :



Ciò significa che si può partire da un numero minimo di piramidi pari ad 8 (gli 8 ottanti di una sfera), ed incrementare il numero per potenze di 2: 16,32,64, etc.

Chiaramente il tempo di calcolo cresce con diretta proporzionalità al numero di piramidi tracciate, ma, come verrà chiarito in seguito, il sistema consente calcoli accurati anche con poche centinaia di piramidi.

Il tracciamento del raggio centrale di ciascuna piramide avviene seguendo le usuali ipotesi della acustica geometrica: riflessione speculare all'impatto con una superficie, ubbidendo alla legge di Snell. Dopo ogni riflessione si provvede a costruire la posizione della sorgente immagine rispetto alla superficie impattata, e si prosegue il tracciamento del raggio a partire da tale nuova sorgente virtuale.

La verifica dell'impatto sui ricevitori avviene allorchè uno di essi (schematizzato da un punto di dimensioni nulle) si viene a trovare all'interno della piramide in corso di tracciamento. Questo fatto viene verificato tracciando indietro sulla superficie sferica

della sorgente immagine la congiungente sorgente-ricevitore, e verificando che tale punto sia interno al triangolo costituito dai tre spigoli della piramide.

Se si verifica la condizione di arrivo di energia sul ricevitore, il contributo ricevuto viene memorizzato in una opportuna matrice, costituita da 10 colonne (le 10 bande di frequenza) e da alcune centinaia o migliaia di righe, rappresentanti ciascuna un certo tempo di arrivo rispetto all'istante di emissione. Chiaramente la matrice dei risultati sarà tanto più lunga (e dunque occuperà più memoria) quanto più lunga è la risposta all'impulso da calcolare, e tanto maggiore è la risoluzione temporale voluta. Questo fatto pone dei limiti al numero massimo di ricevitori che possono venire studiati con grande dettaglio, anche se l'attuale implementazione in ambiente Windows ha reso meno drastica questa limitazione, che viceversa era pesantissima con i soli 640 kbytes di memoria concessi dal MS-DOS.

Il valore memorizzato è una "intensità sonora scalare" (cioè non è il vettore intensità che si misura con gli intensimetri, ma piuttosto un valore fittizio, legato al quadrato della pressione sonora), ottenuta dalla relazione:

$$I = \frac{Q \cdot W}{4 \cdot \pi \cdot d^2} \cdot \prod_i b_i \alpha_i \zeta \quad (1)$$

in cui W è la potenza sonora della sorgente, Q è la direttività nella direzione considerata, d è la distanza fra la sorgente virtuale ed il ricevitore, ed i valori di  $\alpha_i$  sono i coefficienti di assorbimento delle superfici su cui il raggio ha impattato.

La presenza della direttività significa che è possibile impiegare sorgenti dotate di "balloon" di direttività molto dettagliati, definiti con risoluzione di 10° sia in longitudine che in latitudine per ciascuna banda di frequenza. Anche nel caso si adottino poche piramidi, con apertura angolare maggiore di 10°, il dato di direttività impiegato è sempre quello relativo alla effettiva congiungente sorgente-ricevitore, e pertanto il calcolo dell'onda diretta è sempre esatto.

Il tracciamento delle piramidi viene proseguito fino ad ordini elevatissimi (anche se è possibile limitarlo ad un ordine prefissato), in modo da ricostruire l'intera coda sonora, in ciascun punto ricevitore. Questo modello pertanto, al contrario degli altri tracciatori di fasci divergenti sinora implementati [3,4,5], non impiega alcuna relazione dell'acustica statistica per ricostruire la parte tardiva della coda riverberante, rimanendo sempre del tutto deterministico.

Al crescere del percorso la "base" della piramide si allarga progressivamente, e finisce per diventare più grande dell'intero ambiente. In queste condizioni tutti i ricevitori si trovano sempre entro la piramide, e dunque vengono sempre colpiti dai raggi. Questo fatto è decisivo, perchè in tal modo la coda riverberante mantiene una sufficiente dettagliatezza, e non compaiono i frastagliamenti tipici di altri modelli di calcolo, che danno luogo ad una probabilità di impatto su un ricevitore decrescente con il percorso compiuto dallo stesso. Infatti, sia con i tradizionali modelli di Ray Tracing, sia con i più recenti modelli ibridi (Ray Tracing + Image Sources), è necessario tracciare un numero di raggi crescente con il quadrato della lunghezza della risposta all'impulso.

Ad esempio Lehnert [6] indica il numero minimo di raggi da lanciare per un Ray Tracing tradizionale:

$$N_{\min} = 2 \cdot \pi \cdot \frac{H_s}{H_r} \cdot \frac{L}{R} \quad (2)$$

In cui  $l_{max}$  è la lunghezza massima del tragitto di un raggio, ed  $r$  è il raggio del ricevitore. Ad esempio, con un ricevitore avente 1 m di raggio, ed una risposta all'impulso lunga 1s ( $l_{max}=340m$ ), si ottiene  $N=726336$  !

Maercke e Martin [3], invece, indicano il numero minimo di raggi necessari per un tracciatore di coni (metodo ibrido):

$$N_{min} = 50 \cdot \frac{l_{max}}{l_{cm}} \cdot \frac{r}{R} \quad (3)$$

Se si ipotizza, come prima, una risposta all'impulso lunga 1s ed un libero cammino medio  $l_{cm}$  di 15 m, si ottiene  $N=25689$ . Il metodo ibrido è dunque decisamente più veloce, ma richiede comunque calcoli di durata non trascurabile.

Con il tracciatore di piramidi, invece, la precisione del risultato non dipende così drasticamente dal numero di raggi lanciati. Il numero di piramidi da tracciare dipende infatti soltanto dalla desiderata risoluzione temporale richiesta alla risposta all'impulso e non dalla sua lunghezza. Ciò significa che, anche con un numero ridotto di piramidi (ad esempio 256) è possibile prevedere correttamente risposte all'impulso di parecchi secondi, con una risoluzione temporale discreta (10 ms).

Volendo viceversa una risoluzione temporale molto spinta, onde apprezzare i singoli echi e valutare con precisione il loro tempo di arrivo, si può utilizzare una risoluzione di 1ms ed un numero di piramidi di 2048.

Come in tutti i tracciatori di fasci divergenti (beam tracing, cone tracing, etc.), la coda sonora tende ad essere sottostimata in campo riverberante, poichè al crescere delle dimensioni della base di ciascun fascio aumenta la probabilità di "perdere" una sorgente immagine. E' pertanto necessario effettuare una correzione della coda sonora (che viceversa non era necessaria con algoritmi tipo "ray tracing", a patto però di tracciare effettivamente il numero di raggi richiesto dalla 2).

Ramsete impiega una correzione della coda sonora di tipo moltiplicativo, come originariamente suggerito da Naylor [4]. L' Intensità sonora ricevuta viene pertanto così corretta:

$$I_{corr}(t) = I(t) \cdot e^{-\frac{l_{cm}^2 \cdot N}{4 \cdot c_0^2 \cdot \beta \cdot t^2}} \quad (4)$$

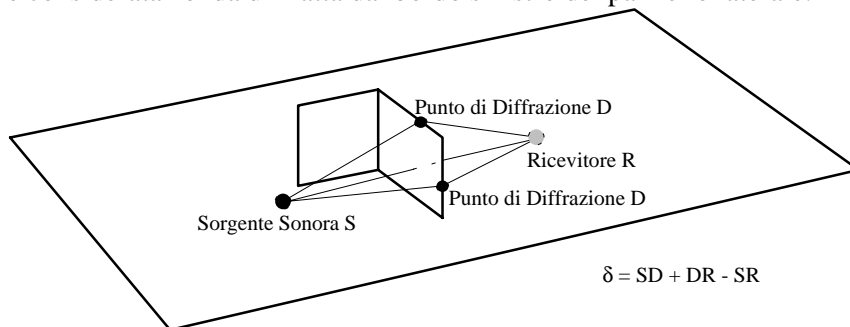
Nella relazione (4) compaiono due parametri dipendenti dalla natura del campo sonoro: il Libero Cammino Medio  $l_{cm}$ , che viene calcolato da Ramsete in base ad una statistica sull'effettiva percorrenza dei raggi sparati in asse alle piramidi, ed il coefficiente adimensionale  $\beta$ , che dipende dalla natura più o meno sabiniana del campo sonoro (in campo perfettamente diffuso risulta  $\beta=0.3$ ).

L'altro aspetto che differenzia il tracciatore piramidale di Ramsete dagli altri metodi di Beam Tracing è la possibilità di dichiarare "obstructing" alcune superfici.

Quando una piramide colpisce una di queste superfici, vengono attivati ulteriori controlli, onde verificare se dietro di essa si trova un ricevitore. In tale caso, si calcola il contributo sullo stesso fornito dall'onda sonora che ha attraversato la superficie (in base al potere fonoisolante della stessa). Si verifica poi se la superficie presenta bordi liberi, ed in caso affermativo viene portato un ulteriore contributo di energia al ricevitore a partire da ciascun bordo libero, calcolato con la nota relazione di Keller/Maekawa [7]:

$$I_{\text{diff}} = I \cdot \frac{\tanh \sqrt{2 \cdot \pi \cdot |N|}}{\sqrt{10} \cdot \sqrt{2 \cdot \pi \cdot |N|}} \quad ; \quad N = \frac{2 \cdot \delta \cdot f}{c_0} \quad (\text{n}^\circ \text{ di Fresnel}) \quad (5)$$

La seguente figura mostra le traiettorie dei raggi che vengono tracciati in questi casi (diffratti ed attraversante). L'algoritmo di ricerca dei bordi liberi non è ricorsivo, pertanto non viene considerata l'onda diffratta dal bordo sinistro del pannello laterale.



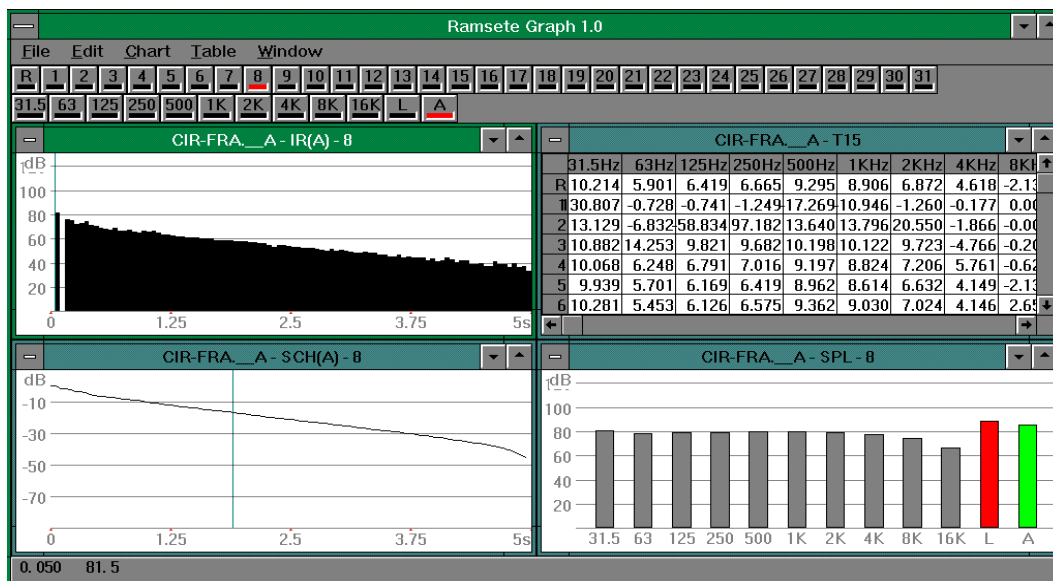
Il controllo sulle superfici obstructing è esteso anche alle sorgenti immagine, e pertanto si può valutare l'effettiva efficacia di una barriera in presenza di campo riverberante.

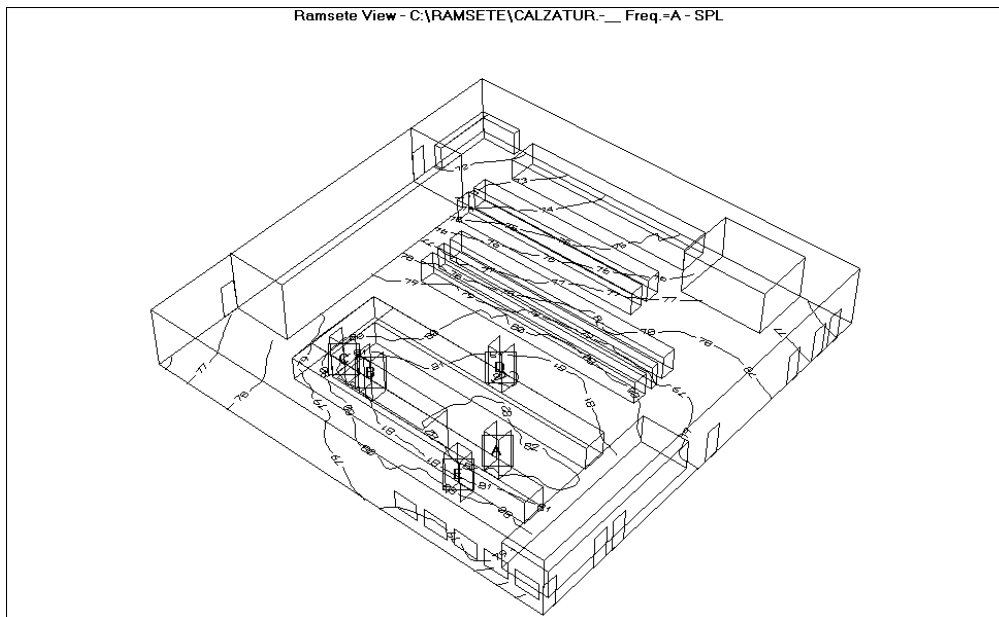
Grazie a queste possibilità, l'algoritmo di tracciamento è in grado di affrontare lo studio della propagazione sonora anche in spazi geometricamente complessi, in presenza di schermature parziali o totali. E' pure possibile valutare l'efficacia di cabine per la sosta degli operai, oppure prevedere l'emissione di rumore verso ricevitori esterni all'edificio.

Inoltre il modello è impiegabile anche nell'ambiente esterno, ad esempio per la verifica di schermature attorno a sorgenti fisse, purchè la distanza dei ricevitori non sia così grande da dover considerare, oltre all'attenuazione dell'aria, anche effetti atmosferici che portino alla curvatura dei raggi sonori, che attualmente non sono ancora stati implementati.

### ESEMPIO

Le seguenti figure danno un esempio dei risultati ottenibili con Ramsete:





### CONCLUSIONI

Sono stati illustrati i fondamenti teorici del metodo di calcolo basato sul tracciamento di piramidi. Poichè si tratta comunque di un programma di calcolo basato sulle ipotesi della acustica geometrica, anche Ramsete è soggetto ad alcune limitazioni. In particolare non tiene conto di fenomeni di interferenza, di risonanza e della diffusione del suono in presenza di superfici scabre.

Vanno peraltro anche sottolineati i significativi progressi che sono stati conseguiti rispetto agli altri algoritmi di calcolo basati su tecniche di Ray Tracing o Beam Tracing: drastica riduzione dei tempi di calcolo, modellazione degli effetti di diffrazione delle schermature e del potere fonoisolante dei materiali, funzionamento corretto anche in campo non Sabiniano [8] (e persino all'aperto).

Il tracciatore è inoltre stato corredato di una serie di programmi accessori, implementati sotto Windows, che rendono estremamente agevole sia l'introduzione dei dati che la visualizzazione dei risultati.

### BIBLIOGRAFIA

- [1] A. Farina - "Previsione del rumore in ambiente di lavoro a partire dai dati di potenza sonora" - atti del convegno Rumore e vibrazioni: certificazione delle macchine, Modena 2-3 dicembre 1993.
- [2] Tenenbaum R., Slama J., Ballesteros M. - "Numerical simulation of room acoustics: a new approach for source modelling" - Proc. of 14th. ICA, F6-11, Beijing 3-10 september 1992.
- [3] D. van Maercke, J. Martin - "The prediction of echograms and impulse responses within the Epidaure software" - Applied Acoustics Vol. 38 no.s 2-4, pag. 93 (1993).
- [4] G.M. Naylor - "ODEON - Another hybrid room acoustical model" - Applied Acoustics Vol. 38 no.s 2-4, pag. 131 (1993).
- [5] T. Lewers - "A combined Beam Tracing and Radiant Exchange computer model of room acoustics" - Applied Acoustics Vol. 38 no.s 2-4, pag. 161 (1993).
- [6] H. Lehnert - "Systematic errors of the Ray-Tracing algorithm" - Applied Acoustics Vol. 38 no.s 2-4, pag. 207 (1993).
- [7] Z. Maekawa - "Simple estimation methods for noise reduction by various barriers" - Rivista Italiana di Acustica, vol. XI, n. 3 - settembre 1987.
- [8] A. Farina, A. Cocchi - "Correzione acustica di ex-chiese riadattate per utilizzo concertistico: un esempio di progettazione di interventi non-sabiniani con l'ausilio del calcolatore" - Proc. of Acoustics and Recovery of Spaces for Music - Ferrara, 27-28 October 1993.