

Modelli matematici per la previsione della diffusione del suono

Vengono presentati i principi generali di funzionamento, le approssimazioni ed i campi di impiego dei più diffusi sistemi di calcolo matematico della diffusione del suono, sia in ambienti chiusi che all'aperto.

La maggior parte di questi metodi si presta alla implementazione su elaboratore elettronico, ed oggi sono già disponibili numerosi pacchetti software commerciale per i calcoli acustici. Vengono pertanto delineati i limiti di impiego di ciascun tipo di modello, onde agevolare la scelta in funzione della problematica da studiare.

In this paper the most widely employed mathematical modeling techniques for the prevision of the acoustic field are described, along with their approximations and scopes.

The great part of these models is suitable for numerical computation through computers, and some software packages are already available on the market. Thus, to make easier the choice between various types of models, the limits of each one are described.

1. Introduzione

Lo studio dei campi acustici può essere affrontato con diverse scale di accuratezza, senza che per ciò vengano falsati gli obiettivi del calcolo previsionale. Infatti molti fenomeni complessi, legati alla propagazione delle onde sonore, come la interferenza, la diffrazione e la diffusione sovente non agiscono in maniera significativa, ed è così possibile studiare il campo acustico secondo semplici leggi geometriche; in altri casi occorre considerare alcuni o tutti questi fenomeni, rendendo la trattazione matematica

più complessa ed i tempi di calcolo più lunghi.

Questa variabilità del grado di approssimazione richiesto ha fatto sì che venissero sviluppate molte diverse tecniche predittive, orientate specificatamente alle singole esigenze di applicazione. Pertanto è molto difficile che un modello di propagazione del suono abbia validità generale, essendo impiegabile ad esempio sia per lo studio del rumore da traffico in una città, del rumore entro gli edifici, di un'industria, o del campo acustico entro un teatro, per non parlare della rumorosità entro l'abitacolo dei veicoli.

Infatti, i problemi qui esemplificati richiedono approcci diversi.

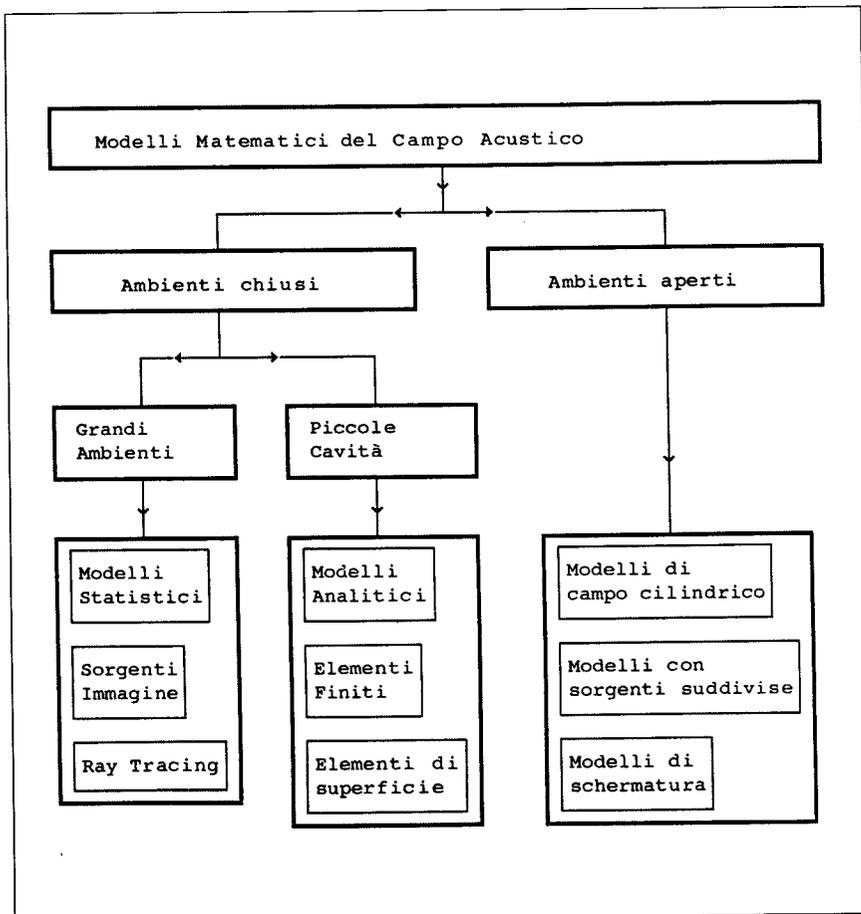
Verranno dunque innanzitutto analizzati i vari tipi di modelli, in funzione del diverso risultato da ottenere.

Verranno poi illustrati i principi di funzionamento di tali modelli, e la loro possibilità di implementazione in codici di calcolo numerico. Verranno infine analizzati i limiti di ciascun modello, definendo correttamente il campo di applicazione ove le ipotesi semplificative introdotte non pregiudicano l'accuratezza dei risultati.

2. Classificazione dei modelli matematici

La prima grossa distinzione riguarda la separazione fra modelli destinati allo studio di ambienti chiusi e modelli di propagazione all'aperto. I primi si suddividono poi ulteriormente in modelli di grandi ambienti (con dimensioni molto maggiori della lunghezza d'onda del suono) e modelli di piccole cavità, ove la natura ondosa del fenomeno di propagazione diviene decisiva.

Nel seguente schema vengono pertanto classificati, con i nomi che tradizionalmente li identificano, i principali modelli matematici per lo studio dei campi acustici.



2.1 Modelli dei grandi ambienti.

Vengono presi in considerazione anzitutto i modelli per i grandi ambienti: in questi casi, solitamente le sorgenti sonore sono poche e ben localizzate (si pensi ai teatri, o agli ambienti industriali in cui sono collocati macchinari rumorosi), ma il campo acustico risultante dipende in gran parte dai fenomeni di riflessione multipla del suono sulle pareti dell'ambiente. Tenuto conto che dette pareti sono perlopiù lisce, e di dimensioni nettamente più grandi della lunghezza d'onda del suono, è possibile pensare che le riflessioni avvengano specularmente, senza alcun effetto di diffrazione dei bordi o di diffusione dovuta alle asperità.

2.2 Modelli statistici

Dei tre modelli per i grandi ambienti qui considerati, il primo (Modello Statistico, o del campo semiriverberante) è quello che fa le ipotesi più drastiche: si suppone infatti che le proprietà acustiche legate al feno-

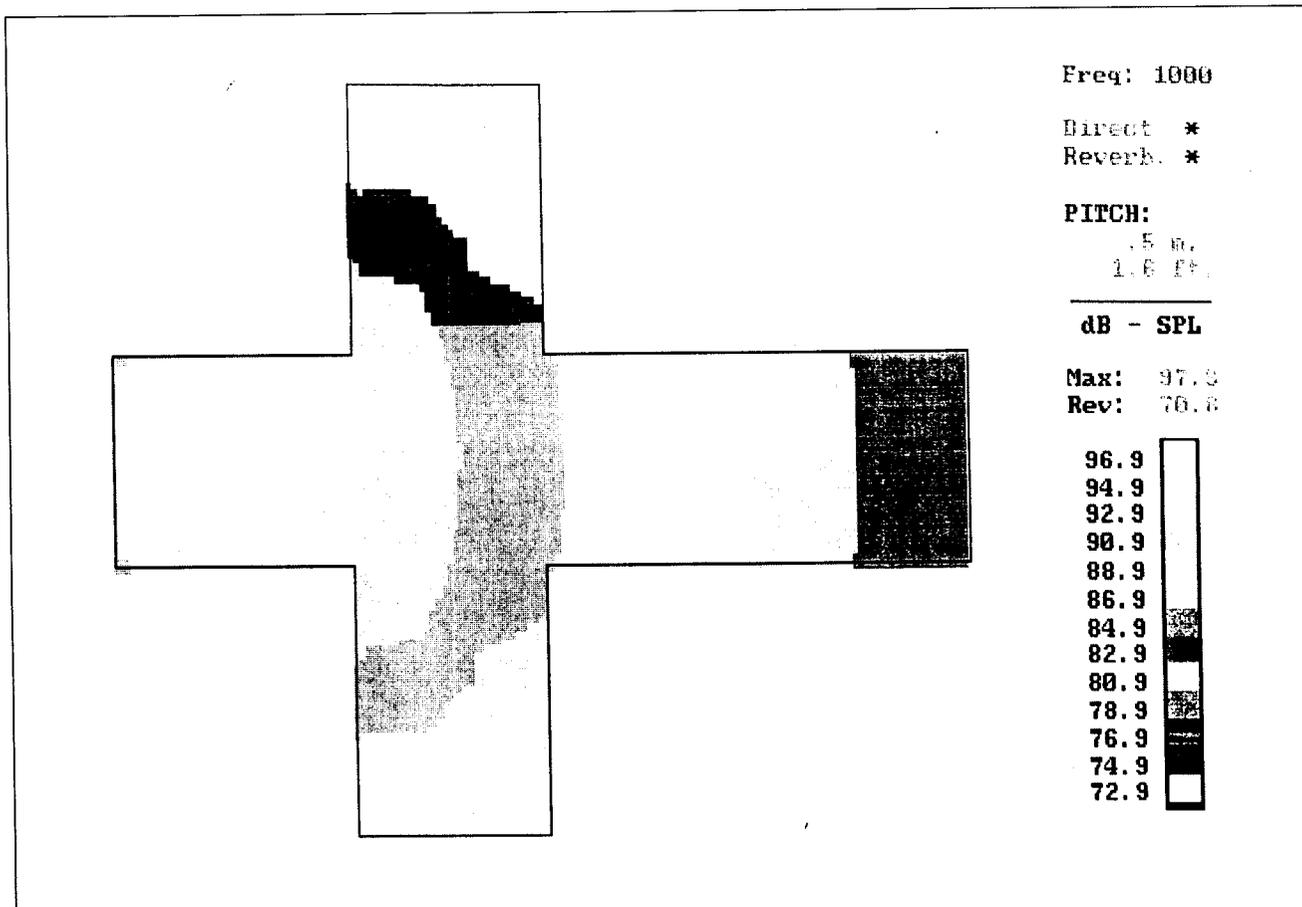


Fig. 1 - Mappa del livello sonoro in campo semiriverberante prodotto da un altoparlante.

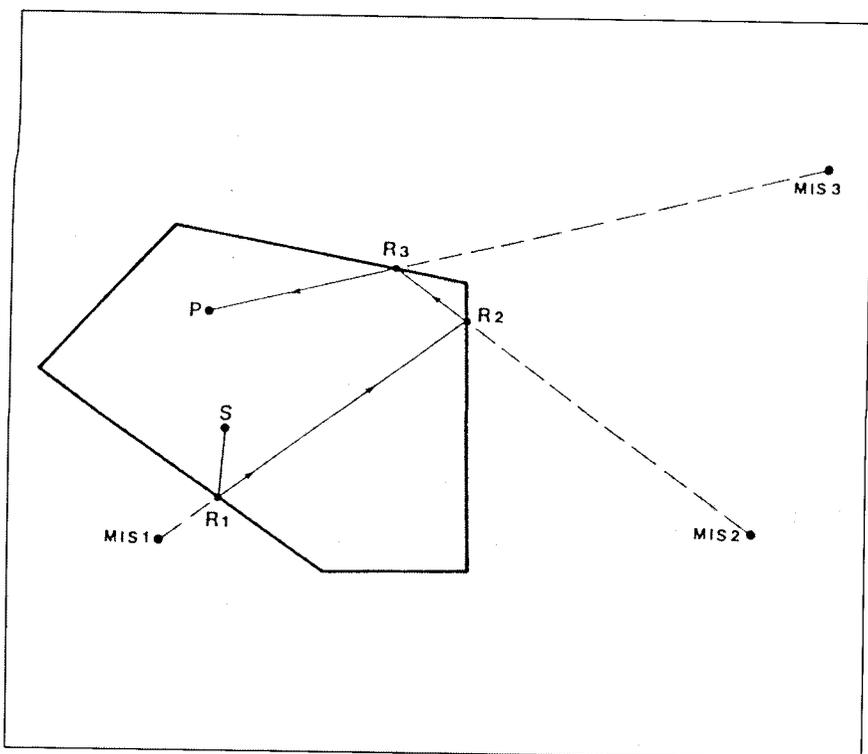


Fig. 2 - Schema di costruzione geometrica delle sorgenti virtuali.

meno delle riflessioni multiple siano uniformi in tutti i punti del locale, e siano governate dalle ipotesi statistiche tipiche della teoria di Sabine. Pertanto si definisce un tempo di riverberazione, il cui valore è uniforme dappertutto, legato alle caratteristiche di assorbimento delle pareti (coeff. di assorbimento α e superficie S) ed al volume V dell'ambiente dalla formula di Sabine (1) (1964):

$$T_{riv} = 0,16 \cdot \frac{V}{\sum_i \alpha_i \cdot S_i} \quad (1)$$

Tenuto poi conto che comunque un ricevitore è soggetto al campo sonoro diretto proveniente dalla sorgente, avente un livello di potenza L_w e posta ad una distanza d , e dotata di direttività Q , si ottiene questa espressione per il livello sonoro L in dB:

$$L = L_w + 10 \cdot \lg \left[\frac{Q}{4 \cdot \pi \cdot d^2} + \frac{4}{\sum_i \alpha_i \cdot S_i} \right] \quad (2)$$

Per impiegare la formula (2) è sufficiente conoscere in dettaglio le caratteristiche emissive della sorgente sonora (questo in generale è sempre richiesto per i modelli dei grandi ambienti), e valutare le proprietà statistiche del campo sonoro, misurando in un punto il tempo di riverberazione, e deducendo poi da esso, tramite la (1), il valore della sommatoria. E' anche possibile una stima analitica del valore di tale sommatoria, poichè sono stati determinati sperimentalmente i coefficienti di assorbimento α di numerosissimi materiali, al variare della frequenza.

Il modello del campo semiriverberante è tuttora uno dei più usati, sia per valutazioni del rumore nell'industria, ove è sovente noto il livello di potenza delle macchine, e la direttività Q è supposta uniforme ($Q = 1$), sia per lo studio della sonorizzazione di teatri e auditori mediante altoparlanti: in quest'ultimo

caso, i costruttori dell'altoparlante forniscono con grande dettaglio i valori di Q in funzione della direzione considerata, e spesso sono in grado di fornire direttamente un codice di calcolo per personal computer, che applica le relazioni suddette, fornendo in uscita mappature grafiche in varie forme del campo sonoro prodotto nell'area occupata dagli ascoltatori. In figura 1 è visibile un esempio di questi risultati, ottenuto mediante un programma di calcolo che sta simulando la diffusione sonora prodotta da un altoparlante a tromba piazzato in una chiesa.

2.3 Sorgenti Immagine

Il secondo modello di calcolo che è stato impiegato per lo studio dei grandi ambienti è quello delle sorgenti immagine: esso applica rigorosamente il concetto di riflessione speculare del suono sulle pareti, per cui l'onda riflessa può venire pensata come proveniente da una sorgente virtuale, costituita dalla immagine della sorgente reale "riflessa" dalla parete, come appunto fa uno specchio. La costruzione delle sorgenti immagine del 1° ordine è agevole anche per via puramente grafica, ed è stata impiegata per decenni per ottimizzare l'inclinazione della copertura dei teatri o delle pareti laterali. E' poi possibile costruire sorgenti del 2° ordine, "specularizzando" le sorgenti di 1° ordine rispetto alle altre pareti riflettenti, e così via per gli ordini successivi. La figura 2 riporta, in due dimensioni, lo schema di questa costruzione. Definita una particolare posizione della sorgente e del ricevitore, non è detto che tutte queste sorgenti virtuali siano in grado di inviare effettivamente energia lungo un percorso rettilineo che "attraversi" tutte le superfici che hanno generato la sorgente virtuale. Infatti è molto facile che il raggio sonoro colpisca il piano di una superficie al di fuori del contorno della stessa. Pertanto, dopo aver generato un elevatissimo numero di sorgenti virtuali, bisogna provvedere alla verifica di quelle effettivamente "viste", e da questa verifica sopravvive un numero molto esiguo di tali sorgenti. Questo spiega

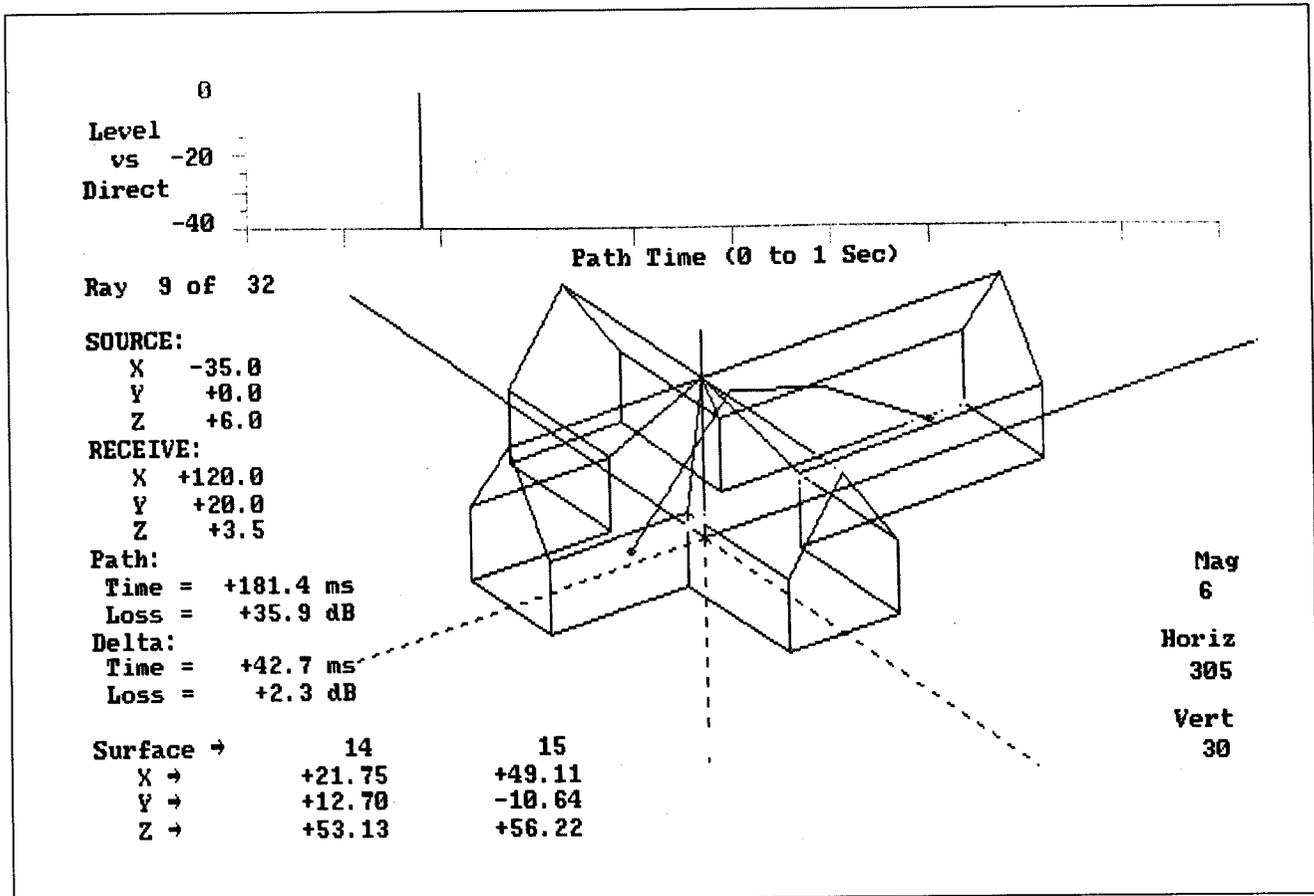


Fig. 3 - Risposta all'impulso calcolata mediante Sorgenti Virtuali.

perchè praticamente non si riesca mai ad arrivare a previsioni che tengano conto di più di 5 ordini di riflessioni. Se lo scopo della previsione è quello di valutare semplicemente il livello sonoro, è probabile che esse siano sufficienti; se viceversa si pretende di ricostruire in dettaglio l'intera coda sonora, per valutare ad esempio 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, ed in tale tempo i raggi percorrono anche più di 1 km, colpendo innumerevoli volte le pareti di contorno. Pertanto il metodo delle sorgenti immagine richiederebbe tempi di calcolo mostruosi, poichè il numero di sorgenti N_s , che viene generato cresce con lo s ordine delle riflessioni O e con il numero S delle superfici secondo questa relazione esponenziale (3):

$$N_s = S \cdot (S - 1)^{(O-1)} \quad (3)$$

Esistono già numerosi modelli di calcolo che consentono lo impiego della tecnica delle sorgenti immagi-

ne: di solito lo scopo di questi programmi è lo studio del campo acustico dal punto di vista temporale, per valutare se esistono echi o riflessioni precoci. Pertanto i dati relativi ai singoli arrivi di energia dalle varie sorgenti immagine vengono tenuti disaggregati, in modo che sia possibile identificare il percorso del raggio sonoro che ne è conseguito. Essi vengono riportati in un diagramma Energia-Tempo, chiamato risposta all'impulso energetica: ogni barra verticale in tale diagramma rappresenta un'onda riflessa ricevuta, la posizione della barra sull'asse delle ascisse ne definisce il ritardo in ms rispetto all'onda sonora diretta, e l'altezza della barra ne definisce il livello. Esso, a rigore, va calcolato tenendo conto sia della direttività Q della sorgente nella particolare direzione consi-

derata, sia del coefficiente di assorbimento α delle singole superfici su cui il raggio ha impattato venendo riflesso. Pertanto, ogni singolo arrivo di energia ha un livello sonoro espresso dalle formule numero (4) in cui d è la distanza fra il ricevitore e la sorgente virtuale. Ovviamente, il livello sonoro complessivo è pari alla somma energetica dei livelli sonori di tutte le riflessioni, oltre che dell'onda diretta. Nella figura 3 si può vedere il risultato di una di queste valutazioni della risposta all'impulso, eseguita con un software commerciale: nella parte alta della figura si vede il diagramma Energia-Tempo, mentre sotto vengono evidenziati, uno alla volta, i percorsi seguiti dai raggi riflessi. A tutt'oggi è stato possibile estendere la risposta all'impulso a tempi così lunghi da consentire il calcolo dei

$$L = L_w + 10 \cdot \lg \left[\frac{Q \cdot (1 - \alpha_1) \cdot (1 - \alpha_2) \cdot \dots \cdot (1 - \alpha_N)}{4 \cdot \pi \cdot d^2} \right] \quad (4)$$

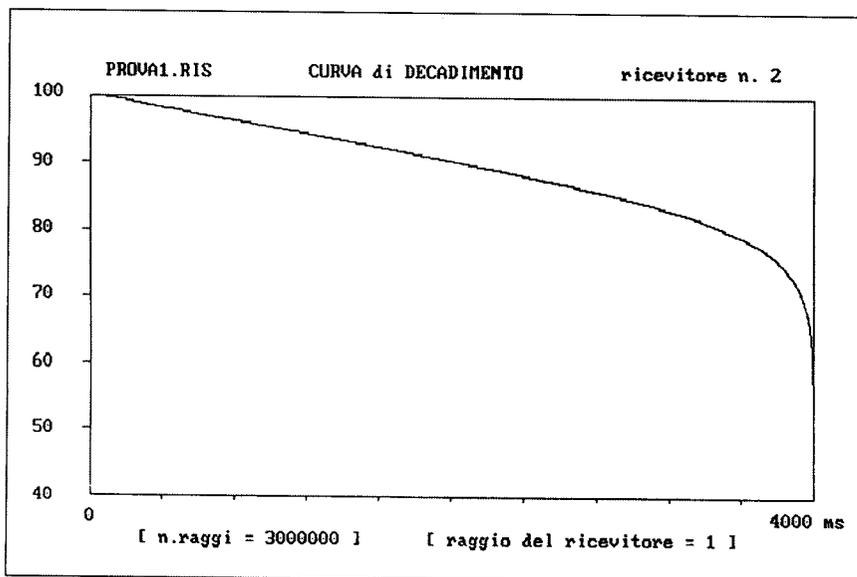


Fig. 4 - Risposta all'impulso calcolata mediante Ray Tracing.

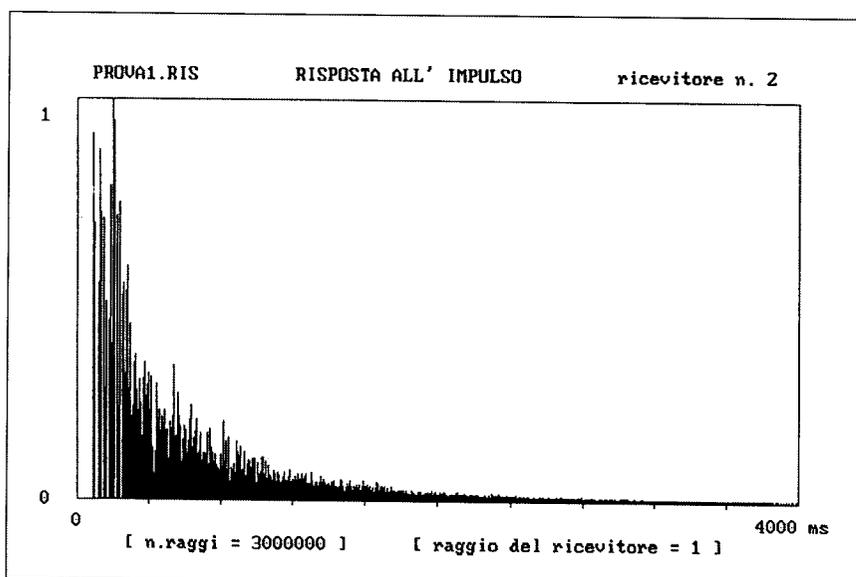


Fig. 5 - Risposta all'impulso calcolata mediante Ray Tracing.
Curva di decadimento sonoro ottenuta dalle risposte all'impulso di Figura 4.

tempi di riverberazione solo nel caso di ambienti di forma parallelepipedica, per i quali è estremamente semplice generare le sorgenti immagine, e non vi sono sorgenti da scartare.

2.4 Ray Tracing

Rimane infine la tecnica detta del Ray Tracing, basata sul seguente semplice concetto: a partire da una posizione ben definita della sorgente, si lanciano a casaccio raggi sonori in tutte le direzioni, con energia proporzionale alla direttività della sorgente stessa. I raggi si propagano restando rettilinei, e rimbalzan-

do via via entro l'ambiente per effetto delle riflessioni multiple. Entro l'ambiente si trovano anche numerosi ricevitori costituiti solitamente da sfere aventi un certo diametro. Ogni qual volta un raggio interseca una sfera ricevitore, le comunica una certa dose di energia, che è proporzionale alla lunghezza del segmento di raggio intersecato. Dividendo in ciascun ricevitore l'energia complessiva ricevuta per il volume della sfera si calcola poi la Densità di Energia sonora, e da essa il livello sonoro. Affinchè i risultati siano statisticamente stabili, è necessario però lanciare moltissimi raggi, in modo che mediamen-

te essi abbiano coperto tutte le possibili direzioni. Pertanto la precisione del metodo cresce con il numero dei raggi lanciati, così come il tempo di calcolo. Quest'ultimo cresce anche con la lunghezza temporale della storia di ciascun raggio, trascorsa la quale il raggio viene abbandonato. Poichè comunque si tratta di relazione di proporzionalità lineare fra il numero di raggi lanciati, la durata temporale della loro storia ed il tempo di calcolo, esso non diviene mai smisurato come con le sorgenti immagine ed, ad esempio, anche con un personal computer si possono studiare risposte all'impulso molto lunghe (alcuni secondi) con bassa precisione, o risposte più corte (400 ms) con grande precisione, a seconda se lo scopo della simulazione è lo studio della caratteristica temporale del campo acustico o la valutazione del livello sonoro complessivo.

In figura 4 è riportato, ad esempio, un diagramma della risposta all'impulso energetico lungo ben 4s, relativo ad una simulazione eseguita in una chiesa molto riverberante. Da tale diagramma è poi possibile ricavare il decadimento di un segnale stazionario per la valutazione diretta del tempo di riverberazione (Fig. 5), oppure si possono calcolare direttamente altri descrittori temporali del campo acustico, come l'Indice di Chiarezza.

3. Modelli per piccole cavità

Quando le dimensioni dell'ambiente chiuso sono confrontabili con quelle della lunghezza d'onda sonora, la natura ondosa del fenomeno di propagazione non può più venire trascurata. Occorrono dunque modelli in grado di risolvere in qualche modo l'equazione dell'onda di D'Alambert, corredata delle opportune condizioni al contorno sulle superfici che delimitano la cavità.

3.1 Soluzioni analitiche

Nel caso di cavità dalla forma semplice (sfere, cilindri, parallelepipedi) sono state trovate soluzioni analitiche al problema differenziale su esposto. Ciò richiede solitamente la restrizione a particolari casi anche

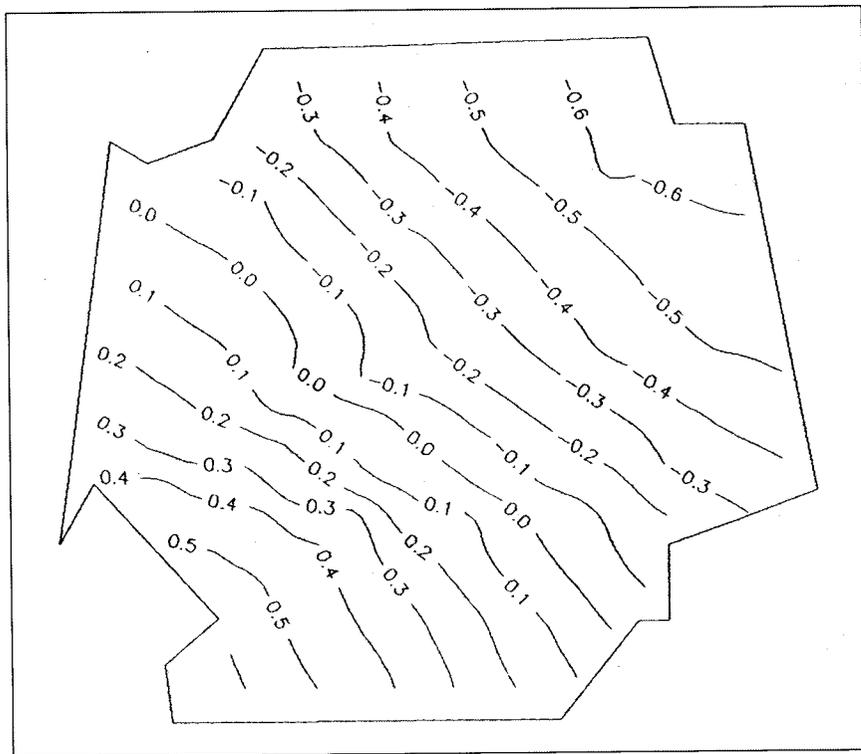


Fig. 6 - Campo acustico previsto all'interno della cabina di un trattore mediante modello agli Elementi Finiti.

per le condizioni al contorno, che devono pure esse godere di semplificazioni o simmetrie. In tali casi, comunque, la soluzione analitica è efficientissima. Sebbene le formule solutive siano spesso enormemente complesse, esse sono comunque facilmente solubili con mezzi di calcolo anche modesti, come una calcolatrice programmabile dotata di un buon corredo di funzioni scientifiche. Dopodichè possono venire calcolate tutte le grandezze del campo acustico, ed in particolare la pressione sonora, in tutti i punti della cavità. Il grosso limite di queste formulazioni è la estrema specificità della loro validità: un dettaglio leggermente diverso nelle condizioni al contorno può rendere del tutto inapplicabile una soluzione, che magari richiede tempi lunghissimi per lo sviluppo analitico, o diviene irrealizzabile. Inoltre è difficile reperire tali soluzioni: oggi ben pochi studiosi si dedicano seriamente alla ricerca di esse, ed in pratica il lavoro di Morse (1948) rimane a tutt'oggi quanto di più avanzato sia stato pubblicato in materia.

3.2 Elementi Finiti

La necessità di integrare l'equazio-

ne di D'Alambert anche su domini di forma irregolare, e con condizioni al contorno variabili, ha portato allo sviluppo di metodi numerici di soluzione, basati sulla tecnica degli elementi finiti.

Il volume oggetto di studio viene suddiviso in sottodomini di forma standardizzata (ad esempio tetraedri). All'interno di ciascun sottodominio si ammette che la pressione sonora sia descrivibile in maniera semplificata (ad esempio con interpolazione lineare fra i 4 valori ai vertici del tetraedro).

In tal modo è possibile mettere l'equazione di Helmholtz (derivata dall'equazione di D'Alambert, avendo ammesso l'eccitazione mediante onde sinusoidali), con le opportune condizioni al contorno, in forma integrale, e calcolare analiticamente il valore dell'integrale in funzione delle pressioni sonore nei vertici.

In ciascun nodo del reticolo deve essere soddisfatta una condizione di ortogonalità fra il valore incognito della pressione sonora e le funzioni di interpolazione impiegate. Imponendo simultaneamente tali condizioni di ortogonalità, si ottiene un sistema di N equazioni in N incognite, che risolto fornisce le

pressioni sonore nei nodi del reticolo (Farina e Piva, 1990). Le condizioni al contorno possono essere costituite dal valore locale dell'impedenza acustica delle pareti, o dalla loro velocità nel caso di sorgenti sonore (pareti vibranti).

E' anche possibile imporre ovunque una condizione di pareti rigide, in modo da ottenere un sistema di equazioni omogeneo: gli autovalori di tale sistema di equazioni forniscono le frequenze di risonanza della cavità, e gli autovettori rappresentano i modi acustici della stessa. La soluzione ad una sollecitazione esterna può pertanto venire calcolata anche a partire da una soluzione modale della cavità, ma spesso l'informazione richiesta è costituita proprio dall'individuazione delle frequenze di risonanza dell'abitacolo di un veicolo e della posizione dei massimi del livello sonoro a tali frequenze.

Ad esempio, in figura 6 è visibile il primo modo acustico dell'abitacolo di un trattore agricolo, con l'indicazione dei livelli sonori, ottenuta mediante soluzione agli elementi finiti.

In figura 7 si vede viceversa il reticolo di elementi finiti adottato.

Il grosso problema nell'implementazione di codici agli elementi finiti risiede nell'enorme numero di incognite che si viene a generare: infatti, perchè i risultati siano attendibili, è necessario che i lati degli elementi siano piccoli rispetto alla lunghezza d'onda (almeno $1/8$). Pertanto, al crescere della frequenza massima da analizzare, cresce a dismisura il numero di elementi, e proporzionalmente di incognite. Di conseguenza la tecnica degli elementi finiti può venire impiegata proficuamente solo su grossi computers, in grado di risolvere estesi sistemi di equazioni lineari.

3.3 Elementi di Superficie

Il grosso problema degli elementi finiti è la discretizzazione di un dominio tridimensionale, che richiede da un lato notevoli mezzi grafici ed una paziente introduzione di dati, dall'altro produce una enorme quantità di incognite, molte delle quali non richieste.

Una semplificazione notevole si ha

imponendo una discretizzazione solo della superficie di contorno della cavità, impiegando anche in questo caso figure geometriche semplici (ad es. triangoli).

Ciascun elemento di superficie collabora poi al campo acustico nella cavità con una interazione che è descritta dalla Funzione di Green. In prima approssimazione, si ammette che ciascun elemento di superficie agisca come un elemento di una superficie piana indefinita, e pertanto viene usata la Funzione di Green per le superfici piane. Le incognite non possono essere in questo caso direttamente le pressioni sonore, ma in genere si utilizza il potenziale della velocità delle particelle ϕ .

Il valore dell'incognita in ciascun vertice degli elementi di contorno può venire esplicitato, tramite le funzioni di Green, in funzione dei valori delle incognite negli altri vertici. Anche in questo caso si ottiene dunque un sistema di N equazioni in N incognite, che può venire risolto. Una volta ottenuti i valori di ϕ sulle superfici di contorno, si può calcolare la pressione sonora nei punti voluti all'interno della cavità mediante sovrapposizione degli effetti delle funzioni Green di tutti gli elementi (Fyfe e Coyette, 1988). Sebbene la trattazione matematica sia nettamente più complessa di quella degli Elementi Finiti, il metodo degli Elementi di Superficie si va rapidamente affermando, grazie soprattutto alla maggior facilità di descrivere i dati del problema (è necessario generare soltanto un modello del contorno), ed alla possibilità di studiare anche cavità con aperture, quantificando la radiazione attraverso esse verso l'esterno. Anche in questo caso è necessario disporre di computers di elevata potenza di calcolo, anche se la riduzione del numero di incognite rende possibile la soluzione di problemi semplici anche con Personal Computers di elevate prestazioni.

4. Propagazione all'aperto

Nel caso dello studio del rumore nel territorio la situazione è nettamente diversa da quella sinora considerata: le sorgenti sono numerose,

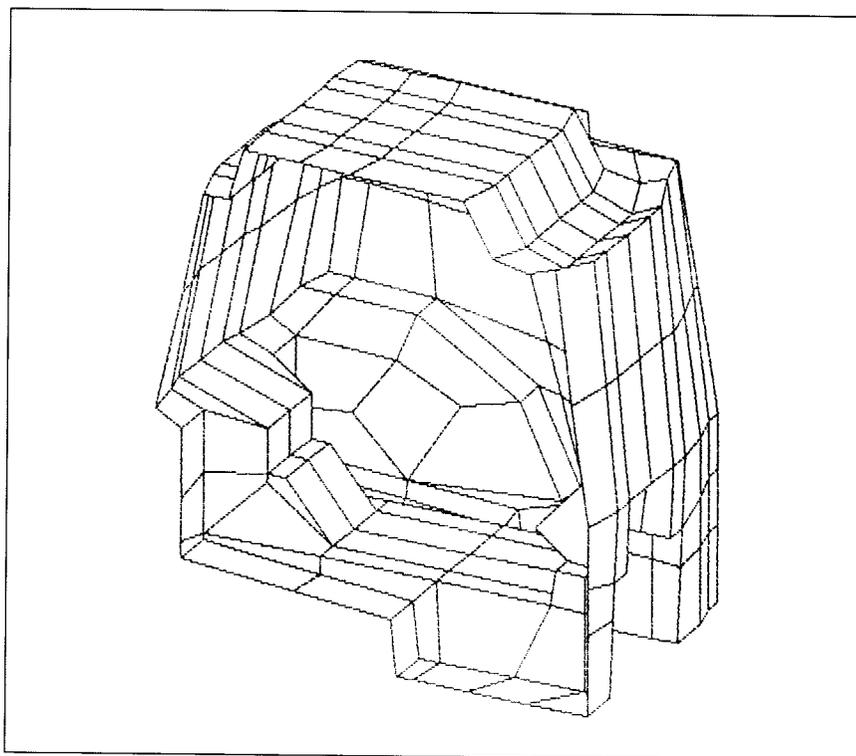


Fig. 7 - Reticolo di elementi finiti relativo all'esempio di figura 6.

spesso distribuite lungo linee stradali o ferroviarie; gli ostacoli fisici che si oppongono a questa propagazione sono in genere molto grandi rispetto alla lunghezza d'onda, ma nella "zona d'ombra" da essi creata diviene decisivo il contributo delle onde sonore diffratte dai bordi degli ostacoli.

Inoltre sono presenti fenomeni disturbanti (vento, gradienti termici) che incurvano i raggi sonori. Pertanto non sono applicabili né le semplici relazioni dell'acustica geometrica, utilizzate per lo studio dei grandi ambienti chiusi, né la teoria ondulatoria con soluzioni discretizzate, visto l'enorme numero di discretizzazioni necessarie a coprire distanze anche di chilometri.

A seconda del tipo di sorgente sonora (concentrata o distribuita lungo una linea) sono state pertanto sviluppate tecniche di calcolo appropriate, che solitamente comprendono anche la modellizzazione della potenza sonora della sorgente, poiché essa in questo caso non è solitamente nota.

4.1 Modelli di campo cilindrico

A questa categoria di modelli appartengono numerosissime formu-

le, di origine semiempirica o sperimentale, volte alla previsione della rumorosità prodotta dal traffico stradale lungo un'arteria, in funzione della distanza da essa e dei parametri caratteristici del traffico; sono state presentate anche alcune formule per la previsione del rumore delle linee ferroviarie. Nonostante l'apparente diversità di tutte queste relazioni, esse hanno una struttura comune, basata sull'ipotesi di una sorgente sonora costituita da una linea retta indefinita, avente una certa potenza sonora per metro lineare.

Tale dato può essere ottenuto, in linea di principio, conoscendo la potenza sonora di ciascun veicolo (L_w), il numero di veicoli che transitano in un'ora (Q_h) e la velocità media degli stessi in km/h (V).

Infatti, supponendo che i veicoli mantengano una distanza costante fra l'uno e l'altro, si ha facilmente

$$L_{wlm} = L_w + 10 \cdot \lg \left[\frac{Q_h}{1000 \cdot V} \right]$$

Poiché il campo è cilindrico, il livello sonoro cala di 3 dB ad ogni rad-

doppio della distanza d , secondo la relazione (6):

$$L = L_{wlm} + 10 \cdot \lg \left[\frac{1}{2 \cdot \pi \cdot d} \right] \quad (6)$$

Rimane da definire quanto vale il livello di potenza di un singolo veicolo, L_w : a tale scopo sono necessari rilievi sperimentali, che hanno consentito di stimare un valore medio valido per la situazione europea. Tale livello varia poi con L_w la velocità V dei veicoli, secondo una relazione del tipo (7):

$$L_w = L_{w0} + 10 \cdot \lg \left[\left(\frac{V}{V_0} \right)^m \right] \quad (7)$$

Per quanto riguarda il rumore da traffico stradale, solitamente si ammette che un veicolo pesante corrisponda alla emissione di potenza sonora di un certo numero C di veicoli leggeri (da 5 ad 8, secondo i vari studi).

Pertanto, raggruppando tutte le relazioni suesposte in un'unica formula di calcolo, si ottiene la relazione (8), in cui sono state raggruppate nella costante K_0 , sia la potenza di un singolo veicolo, sia tutte le grandezze numeriche L_{w0} invarianti ($2\pi, V_0$, etc.).

Quasi tutte le relazioni di calcolo presentate per valutare il rumore da traffico veicolare sono del tipo della (8); si cita qui ad esempio il classico modello prodotto dal CNR Italiano (Cannelli et al., 1983). An-

che per il rumore ferroviario vengono impiegate relazioni analoghe, solo che in questo caso compare la lunghezza dei convogli ferroviari L_i , come mostrato dalle formule (9), in cui la sommatoria è estesa a tutti i treni che passano in un'ora. Tutte le relazioni considerate forniscono il Livello Sonoro Equivalente sul periodo di un'ora: esso è oramai considerato il descrittore privilegiato degli effetti del rumore sulla comunità, ed ha il grosso vantaggio di essere del tutto invariante alla successione temporale dei passaggi dei veicoli entro il periodo considerato: infatti il valore rimane lo stesso sia che i veicoli passino uniformemente per tutta l'ora, sia che essi passino tutti in pochi minuti.

Volendo viceversa quantificare il livello istantaneo nel corso del passaggio di un singolo veicolo, cosa importante soprattutto per le sorgenti di rumore sporadiche, come i treni o gli aerei, sono stati svilup-

pati modelli più dettagliati, con formule in cui compare anche il tempo corrente, che forniscono lo intero profilo temporale di passaggio del rumore.

Ad esempio Cato (1976) ha fornito la relazione (10) per la rumorosità istantanea di un treno (10).

Relazioni ancora più complesse sono state fornite per la rumorosità degli aerei, dei quali va osservato qui soltanto che essi, essendo sorgenti sonore concentrate e non lineari, danno luogo ad una rumorosità che si attenua di 6 dB ogni raddoppio di distanza, contro i 3 dB delle sorgenti lineari.

4.2 Modelli con sorgenti suddivise

Le relazioni sviluppate al precedente paragrafo funzionano correttamente solo per distanze non eccessive dalla sorgente, in assenza di ostacoli, e con sviluppo pressoché rettilineo dello asse viario. In molte

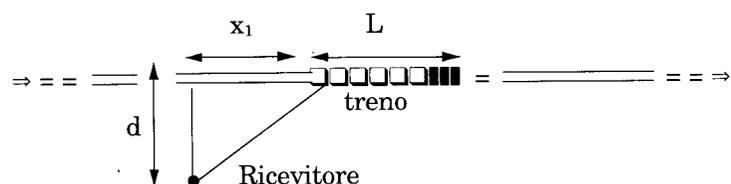
$$L = K_0 + 10 \cdot \lg \left[\frac{Q_{hl} \cdot (V_1)^{m-1} + C \cdot Q_{hp} \cdot (V_p)^{m-1}}{d} \right] \quad (8)$$

$$L = K_0 + 10 \cdot \lg \left[\frac{\sum_i (L_i \cdot (V_i)^{m-1})}{d} \right] \quad (9)$$

$$L = 42 \cdot \lg(v) - 10 \cdot \lg(L) + 11,5 + 10 \cdot \lg(Q)$$

$$Q = \left\{ \frac{1}{a} \cdot \left[\frac{a \cdot (b+1)}{a^2 + (b+1)^2} - \frac{a \cdot b}{a^2 + b^2} + \tan^{-1} \left(\frac{b+1}{a} \right) - \tan^{-1} \left(\frac{b}{a} \right) \right] \right\}$$

$$a = \frac{d}{L} ; b = \frac{x_1}{L}$$



(10)

situazioni concrete si hanno più strade che si intersecano, vi sono curve, viadotti, svincoli, ci sono edifici che schermano parzialmente la propagazione, ed elementi vegetali che la attenuano. Pertanto è necessario ricorrere a procedimenti più raffinati.

L'approccio seguito solitamente in questi casi, ed adottato anche dalle principali normative ufficiali europee sulla protezione dal rumore, è quello di suddividere le sorgenti sonore in tratti di lunghezza limitata, calcolare la potenza sonora di ciascun tratto con le relazioni viste sopra, e sommare poi energeticamente nel punto di ascolto scelto tutti i contributi delle sorgenti così individuate.

Un altro raffinamento seguito è quello di introdurre una serie di termini correttivi alle relazioni viste, per tenere conto del tipo di pavimentazione, della pendenza della strada, della vicinanza di incroci, dell'attenuazione prodotta da masse vegetali, etc. Con tali raffinamenti, le relazioni di calcolo si complicano a tal punto che non è più possibile eseguire un calcolo

manuale per tutti i singoli tratti, e si deve ricorrere a codici di calcolo computerizzati. In tal modo si può ottenere rapidamente il calcolo automatico del livello sonoro in una estesa griglia di punti ricevitori collocati sul territorio. Con opportuni algoritmi di interpolazione grafica, è poi possibile da tali dati costruire la mappa del rumore mediante curve isolivello. In figura 8 è visibile una mappa costruita con tali tecniche, in cui è presente contemporaneamente sia il rumore proveniente dalle strade che da una linea ferroviaria.

4.3 Modelli di schermatura

Uno dei problemi più grossi per il calcolo del campo sonoro nell'ambiente esterno è costituito dal fenomeno della diffrazione da parte degli ostacoli. Infatti, in presenza di una ostruzione al raggio sonoro diretto congiungente la sorgente con il ricevitore, si verifica che una parte dell'energia sonora giunge comunque a destinazione, scavalcando l'ostacolo a causa della curvatura che i fronti d'onda subiscono in-

cidendo sul bordo libero dello stesso.

Tale fenomeno può essere studiato per via analitica solo in condizioni particolarmente semplici (tono puro, schermo sottile semi-infinito, sorgente e ricevitore puntiformi). Sono però state ottenute relazioni semi-empiriche per il calcolo della attenuazione ΔL prodotta da una barriera; di esse, la più famosa è quella dovuta alle formule (11) dovute a Maekawa (1987) che lega l'attenuazione ΔL alla lunghezza d'onda λ ed alla differenza di cammino δ tramite il Numero di Fresnel N .

Come indicato, l'attenuazione è dunque funzione della frequenza f . Pertanto essa andrebbe calcolata per ogni frequenza di centro banda contenuta nello spettro di emissione della sorgente considerata. Solitamente, però, lo scopo della previsione del campo sonoro all'aperto è semplicemente la determinazione del livello sonoro equivalente ponderato A ($L_{Aeq,T}$). Pertanto dai dati alle singole frequenze può essere ricostruito il livello complessivo in $dB(A)$.

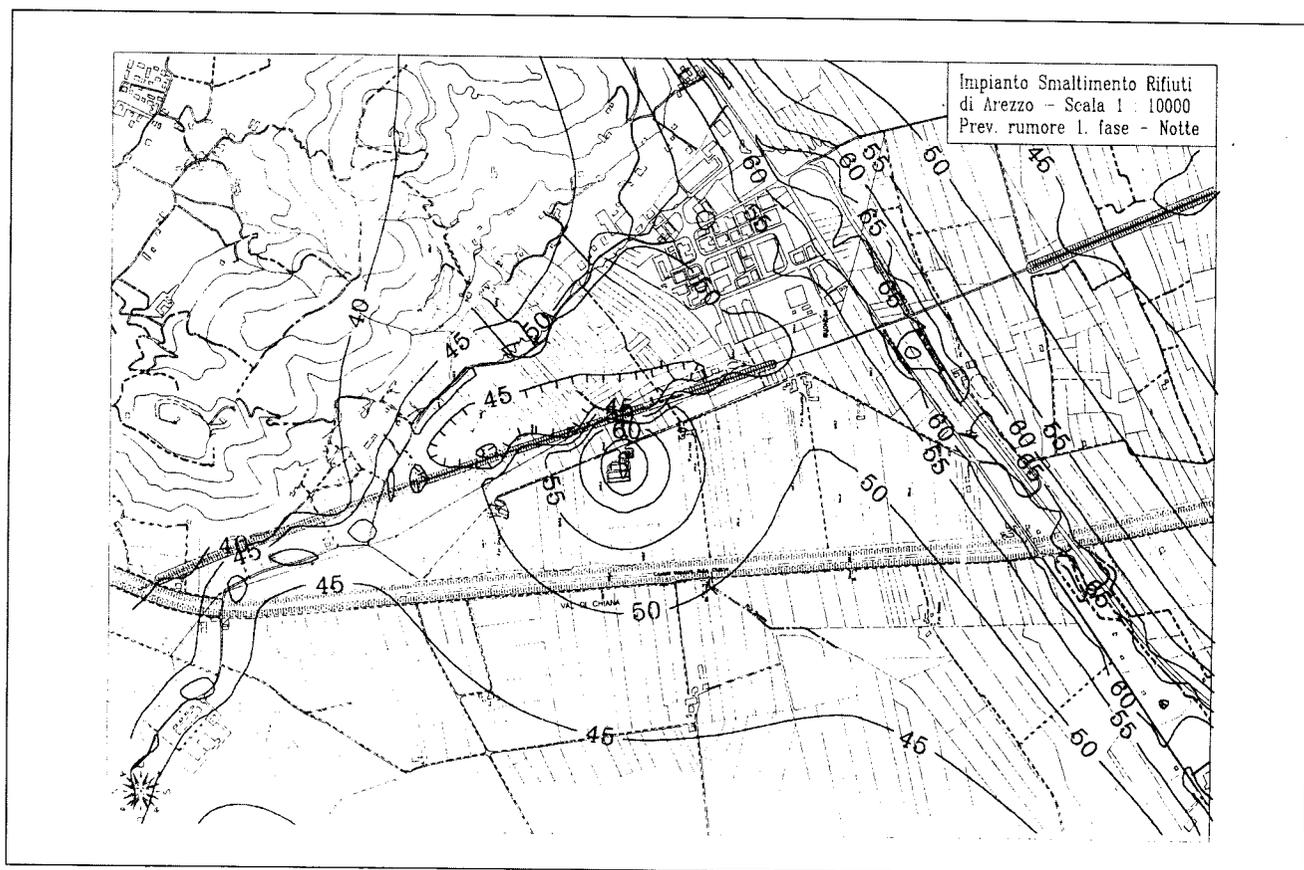


Fig. 8: Mappa del rumore prodotto da strade e ferrovia.

Per sorgenti sonore aventi uno spettro stabile e ben caratterizzato, come ad esempio il rumore da traffico stradale, sono state ricavate anche relazioni specifiche, che consentono direttamente il calcolo dell'attenuazione complessiva ΔL_A in dB(A). Ad esempio, il modello integrato di calcolo del rumore da traffico e della attenuazione delle barriere RLS81, del Ministero dei Trasporti della Repubblica Federale Tedesca, fornisce la relazione (Bundminister für Verkehr, 1981)(12), nella quale valgono i simboli già utilizzati per la (11).
 Un problema più complesso si ha quando si è in presenza di barriere contrapposte, poichè in questo caso è facile che si verifichino riflessioni multiple fra le barriere, soprattutto se esse hanno uno scarso potere fonoassorbente. In questo caso occorre considerare la sorgente virtuale del

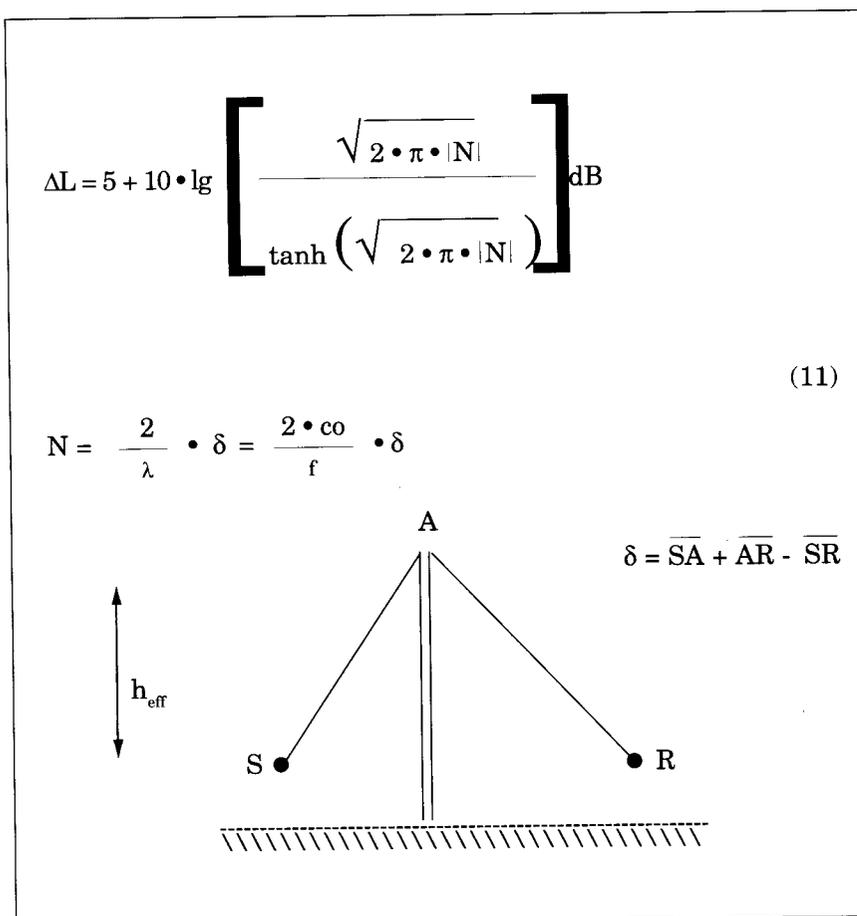
1° ordine, prodotta dall'immagine della strada "riflessa" nelle due barriere; il livello sonoro da essa prodotto, attenuato per effetto dello assorbimento della barriera su cui avviene la riflessione, andrà ad aggiungersi a quello proveniente dalla sorgente reale.
 La quantificazione della perdita per riflessione in dB(A) prodotta da una barriera fonoassorbente può essere oggi effettuata sia in base alla normativa tedesca (ZTV81), sia a quella francese (AFNOR S31-89). A titolo di esempio, in figura 9 viene riportato il risultato di un calcolo eseguito mediante il modello RLS81, in un caso in cui erano presenti due barriere contrapposte in calcestruzzo rivestito di argilla espansa, che in base alle prove eseguite secondo ZTV81 avevano fornito una perdita per riflessione pari a 4 dB(A) (non molto elevata). Si osserva una zona

ove le isolivello sono deformate, per effetto della riflessione sulla barriera contrapposta, producendo un incremento di livello sonoro ai piani alti degli edifici.
 Oggi la maggior parte dei modelli di calcolo ufficiali, di cui si sono dotate le nazioni europee più evolute per garantire la protezione della comunità dai rumori prodotti dai mezzi di trasporto, tiene conto correttamente della riduzione di livello prodotta dalle barriere. Solo alcuni di essi, però, tengono conto esplicitamente dell'effetto delle barriere contrapposte, e consentono quindi di mettere in risalto gli effetti benefici prodotti da barriere fonoassorbenti a confronto di schermi riflettenti.

4.4 Modelli di calcolo per il rumore stradale.

Nel 1988 e 1989 è stata eseguita in Italia una serie di confronti comparati fra misure sperimentali e previsioni numeriche prodotte da numerosi modelli di calcolo del rumore da traffico. I vari gruppi di ricerca hanno poi posto a confronto i risultati delle previsioni in un seminario a ciò dedicato, che ha consentito di trarre le seguenti conclusioni (Pompoli, 1989):

- Esiste una notevole variabilità fra i risultati prodotti da vari modelli a parità di dati introdotti (anche 6-7 dB).
 - Molti modelli non tengono conto di uno o più parametri molto importanti per il calcolo del campo sonoro (assorbimento della aria e del terreno, altezza del ricevitore, differenza velocità fra mezzi leggeri e pesanti etc.)
 - In generale i modelli europei paiono più adatti alla nostra tipologia di veicoli rispetto a quelli di oltre oceano.
 - E' necessaria una notevole dose di esperienza e comprensione dei fenomeni acustici per ottenere risultati attendibili.
- Dallo studio è dunque emerso che attualmente i modelli numerici di previsione non costituiscono affatto un dispositivo infallibile ed automatico per la previsione del rumore nel territorio. Essi debbono essere impiegati con estrema circospezione, ed è sempre opportuno che il



$$\Delta L_A = 8 \cdot \log (1 + 80 \cdot \delta) - 0,1 \cdot \sqrt{K} \quad K = h_{\text{eff}} \cdot (\overline{SA} + \overline{AR}) \quad (12)$$

