

PROPAGAZIONE SONORA E PREVISIONE DEL RUMORE NEGLI AMBIENTI DI LAVORO

Angelo Farina

Dipartimento di Ingegneria Industriale – Università di Parma – Via delle Scienze
43100 PARMA – [HTTP://pcfarina.eng.unipr.it](http://pcfarina.eng.unipr.it)

0. Riassunto

Scopo del presente lavoro è illustrare le peculiari condizioni di propagazione sonora che si sviluppano negli ambienti di lavoro, e valutare con quali metodiche di calcolo sia possibile giungere a previsioni di sufficiente accuratezza.

La normativa di riferimento è la ISO/TR 11690-3, il cui titolo è esattamente uguale a quello della presente relazione. Si tratta di un rapporto tecnico, che illustra le diverse ipotesi di propagazione negli ambienti di lavoro e conseguentemente raccomanda le idonee metodiche di calcolo, in funzione della complessità di tali condizioni di propagazione e della accuratezza richiesta.

In questo lavoro vengono presentate le ipotesi fisiche alla base delle diverse schematizzazioni del campo sonoro, e viene mostrato come le più avanzate tecniche di simulazione computerizzata siano in grado di riprodurre correttamente i fenomeni che avvengono in ambienti anche molto lontani dalle ipotesi di campo diffuso.

Viene però anche mostrato come, con una semplice modifica alla formulazione tradizionale del campo sonoro semi-riverberante, e mantenendo completa coerenza con le normative internazionali, sia possibile operare una corretta simulazione della propagazione sonora in questi ambienti particolarmente “difficili” senza dover necessariamente ricorrere ai suddetti programmi di calcolo.

1. Propagazione del suono negli ambienti

E' comune ricondurre i fenomeni di propagazione del suono (che in realtà sono molto complessi e non sempre schematizzabili in blocchi separati) a semplici modelli causa-effetto, basati su ipotesi minimaliste. Si seguirà qui inizialmente tale approccio “classico”, del quale verranno poi messe in luce le incongruenze ed i limiti.

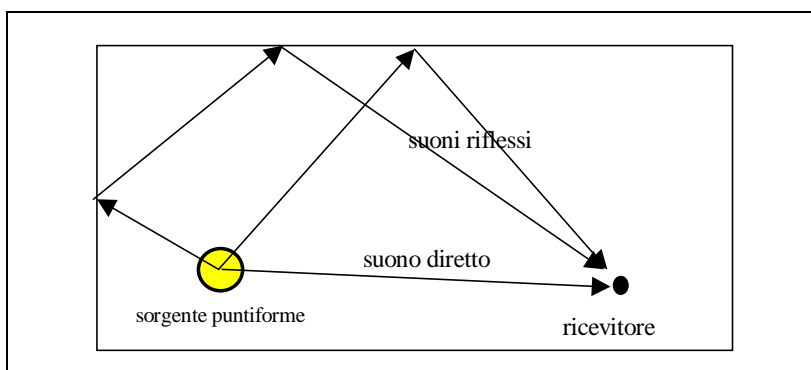
1.1 Lo schema sorgente -> propagazione -> ricevitore

La schematizzazione classica si basa su una sorgente sonora puntiforme ed omnidirezionale, che irradia una potenza sonora indipendente dall'ambiente in cui la stessa viene collocata. Si ipotizza che sorgenti sonore più complesse (estese e direttive) possano sempre essere schematizzate come sovrapposizione degli effetti di un ragionevole numero di sorgenti puntiformi, eventualmente assegnando alle stesse un fattore di direttività non costante nelle varie direzioni (o un vero e proprio “balloon”, come si fa per gli altoparlanti, volendo essere particolarmente precisi).

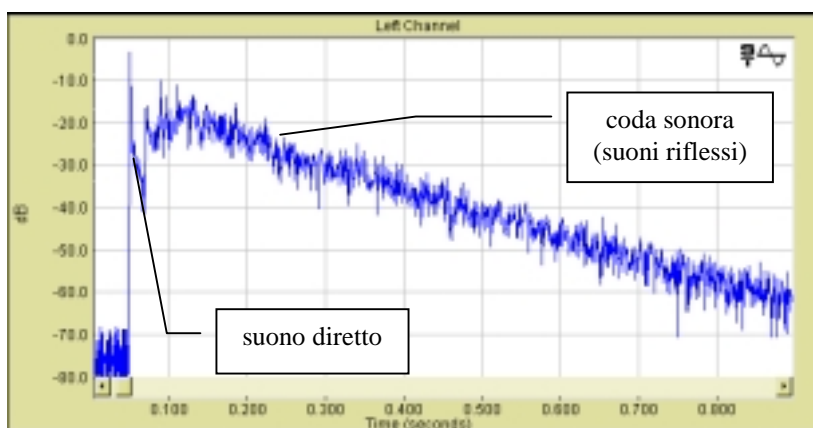
Di conseguenza, volendo caratterizzare la propagazione, ci si limita sempre ad analizzare gli effetti di una singola sorgente puntiforme ed omnidirezionale.

Poichè si hanno normalmente dimensioni degli ambienti, e quindi dei cammini di propagazione, più grandi della lunghezza d'onda, è lecito separare il campo sonoro prodotto in un **campo diretto** (energia sonora che va direttamente dalla sorgente al ricevitore, senza interagire in alcun modo con l'ambiente circostante) ed in un **campo riflesso** (energia sonora che raggiunge il ricevitore dopo aver interagito con le superfici esistenti all'intorno, mediante fenomeni di riflessione speculare e/o diffusa, diffrazione ed eventualmente interferenza).

La seguente figura schematizza tale processo:



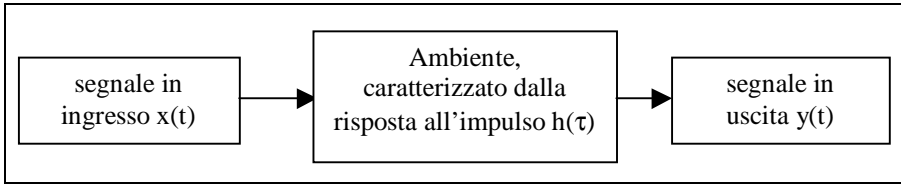
Ovviamente il suono diretto, seguendo il percorso più breve, arriva al ricevitore per primo, e viene poi seguito dalle riflessioni, che vanno a costituire la cosiddetta **coda sonora**. La seguente figura, chiamata risposta all'impulso o ecogramma, rappresenta gli arrivi di energia nel tempo nell'ipotesi che la sorgente emetta un impulso sonoro di breve durata (tipo uno sparo).



Si noti che la figura qui riportata è di origine sperimentale: l'ecogramma può essere infatti facilmente misurato, utilizzando una sorgente impulsiva (pistola, palloncino) oppure un altoparlante che emetta uno speciale segnale pseudo-impulsivo, da cui la risposta all'impulso può venire poi ricostruita matematicamente.

Sempre secondo questo schema concettuale, la sorgente sonora non risente in alcun modo dell'ambiente stesso. L'interazione fra il segnale emesso dalla sorgente e

la propagazione nell'ambiente è dunque lineare, e vale il principio di sovrapposibilità degli effetti. Questo corrisponde a questo semplicissimo diagramma a blocchi, in cui il segnale in ingresso $x(t)$ (che rappresenta il suono generato dalla sorgente) passa attraverso un filtro causale e stabile (l'ambiente), e viene quindi captato al punto ricevitore modificato anche pesantemente, ma pur sempre in modo lineare:



Si deve tener presente che la risposta all'impulso è una caratteristica della propagazione nell'ambiente, e non dipende dalla sorgente sonora, mentre il segnale emesso non dipende dall'ambiente. Il segnale ricevuto $y(t)$ può dunque essere rappresentato matematicamente con una operazione di convoluzione, che si esprime in questo modo:

$$y(t) = \int_{-\infty}^t x(t - \tau) \cdot h(\tau) \cdot d\tau$$

Sebbene computazionalmente intensiva, tale operazione può oggi essere eseguita in tempo reale da un moderno computer: si può in tal modo simulare (ed ascoltare in cuffia) l'effetto di filtraggio prodotto dall'ambiente (aggiunta di echi e riverberazione, modifica della risposta in frequenza) su un qualsivoglia segnale (rumore prodotto da vari macchinari, avvisatori acustici, voce umana, etc.). La risposta all'impulso dunque contiene in se tutte le informazioni sulla propagazione sonora nell'ambiente in esame, per la particolare coppia di posizioni di sorgente e ricevitore considerata. La risposta all'impulso può essere misurata, ma può anche venire calcolata matematicamente da opportuni programmi di simulazione.

1.2 Il fattore di correzione ambientale K

In ambiente di lavoro è tuttavia solitamente poco importante la modificazione del suono prodotta dalla propagazione in termini qualitativi (echi, riverbero, risposta in frequenza), e si concentra gran parte dell'attenzione sul mero dato quantitativo (livello sonoro equivalente in dBA). Per cui la risposta all'impulso risulta un oggetto di complessità esuberante rispetto alle esigenze, e l'intero effetto della propagazione viene banalizzato in un singolo valore numerico, che rappresenta il "guadagno" in dB causato dall'ambiente.

Sovente poi la variazione del livello sonoro con la distanza dalla sorgente d è dominata da quella del suono diretto, che viene facilmente calcolata con la formula della propagazione in campo libero:

$$L_{dir} = L_w + 10 \cdot \lg \left[\frac{Q}{4 \cdot \pi \cdot d^2} \right]$$

In essa compare il livello di potenza della sorgente L_w , ed il fattore di direttività Q (che vale 1 per una sorgente omnidirezionale sospesa a mezz'aria, e vale 2 se essa è appoggiata su un piano riflettente, come accade più sovente).

Ovviamente, in presenza di suono riflesso oltre che diretto, il livello sonoro effettivo al ricevitore sarà più elevato del solo L_{dir} . La differenza fra livello sonoro effettivo L_{tot} ed il valore di L_{dir} di cui alla precedente relazione viene chiamato fattore di correzione ambientale, ed indicato perlopiù con il simbolo K (sulla citata norma ISO 11690-3 esso viene invece indicato con il simbolo DL_f). Si ha quindi:

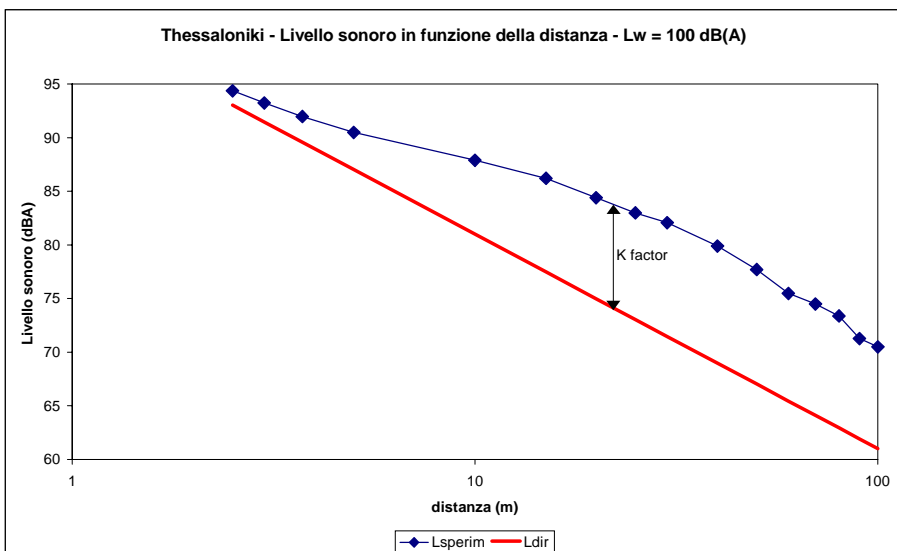
$$L_{tot} = L_W + 10 \cdot \lg \left[\frac{Q}{4 \cdot \pi \cdot d^2} \right] + K$$

In generale, il valore di K è anch'esso variabile in funzione della distanza dalla sorgente d . A breve distanza dalla stessa, il contributo del campo sonoro riflesso è sostanzialmente trascurabile, per cui può essere assunto $K=0$, ed il livello sonoro coincide con quello in campo libero (è come se ci fosse il solo suono diretto).

A maggior distanza, invece, il suono diretto cala rapidamente di intensità (infatti essa diminuisce con il quadrato della distanza d , e quindi il livello del suono diretto L_{dir} cala di 6 dB per ogni raddoppio della distanza); di conseguenza, diviene importante il contributo del suono riflesso, ed il fattore K può assumere valori significativi (parecchi dB, anche più di 10).

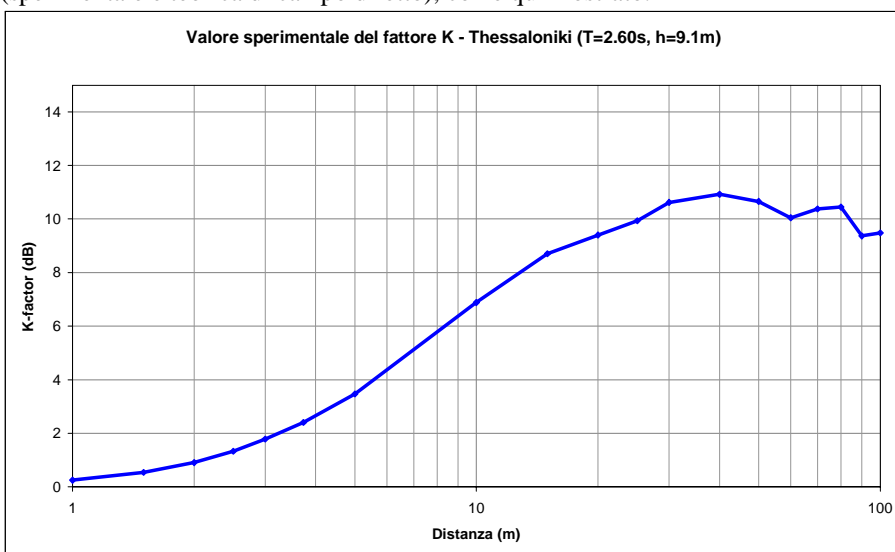
In generale il problema della propagazione in un ambiente di lavoro può dunque essere ricondotto alla determinazione del corretto valore del fattore di correzione ambientale K , determinazione che può avvenire sia per via sperimentale, sia mediante metodi di calcolo. La determinazione sperimentale più semplice e di gran lunga più affidabile viene effettuata impiegando una sorgente campione, perfettamente omnidirezionale e di potenza nota: misurando il livello sonoro a distanza nota da essa, si quantifica direttamente il termine K in base alla sua definizione ed alla formula precedente.

La seguente figura riporta un caso pratico, in cui tale misurazione è stata eseguita in un certo numero di punti, a distanza crescente dalla sorgente sonora; si osserva come il livello sonoro cali in funzione della distanza, secondo una curva che non segue quella del campo libero, ma rimane significativamente più alta di essa a partire da pochi metri dalla sorgente.



Si osserva che, allorchè la distanza dalla sorgente è riportata in scala logaritmica, sia il grafico sperimentale, sia (ovviamente) quello teorico assumano un andamento rettilineo. La pendenza della curva viene espressa sulla base della diminuzione di livello per raddoppio della distanza, e viene indicata normalmente con il simbolo DL2. In campo libero DL2 assume il valore caratteristico di 6 dB/raddoppio, mentre nel caso sperimentale riportato il valore di DL2 è risultato pari a 4.27 dB/raddoppio.

Può ovviamente essere diagrammato anche il valore del fattore di correzione ambientale K, che rappresenta semplicemente la distanza in dB fra le due curve (sperimentale e teorica di campo diretto), come qui mostrato.



Si può infine osservare come, in base alla definizione sopra riportata di fattore di correzione ambientale K (o DLf), tale valore sia facilmente calcolabile a partire dalla risposta all'impulso $h(\tau)$:

$$K = 10 \cdot \lg \left[\frac{\int_0^{\infty} h(\tau) \cdot d\tau}{\int_0^{t_1} h(\tau) \cdot d\tau} \right]$$

In questa relazione il tempo di integrazione finale t_1 , al denominatore, rappresenta un istante successivo al termine dell'onda diretta, ma antecedente all'arrivo della prima onda riflessa, che deve essere scelto opportunamente onde "separare" efficacemente i due campi (diretto e riflesso).

1.3 Il campo semi-riverberante

Esiste un caso particolarmente favorevole, in cui è agevole il calcolo con una semplice formula della propagazione sonora in un ambiente chiuso, in cui siano soddisfatte un certo numero di ipotesi. Se infatti l'ambiente ha forma regolare, dimensioni fra loro confrontabili (lunghezza, larghezza, altezza), sono presente in

sufficiente misura irregolarità geometriche o ostacoli in grado di assicurare una sufficiente diffusione, evitando riflessioni multiple troppo regolari, e se infine anche la distribuzione del materiale dotato di assorbimento acustico è pressochè uniforme in tutto l'ambiente, allora il campo sonoro riflesso può essere descritto con accettabile precisione dalla formulazione nota come campo riverberante, e quantificabile matematicamente in questo modo:

$$L_{\text{rifl}} = L_W + 10 \cdot \lg \left[\frac{4}{\sum_i \alpha_i \cdot S_i} \right]$$

Nelle ipotesi suddette, risulta poi possibile calcolare facilmente anche il tempo di riverbero dell'ambiente, poichè vale la ben nota formula di Sabine [1]:

$$T = 0.16 \cdot \frac{V}{\sum_i \alpha_i \cdot S_i}$$

In cui compaiono i coeff. di assorbimento α e le aree in metri quadrati delle superfici di confine dell'ambiente S .

Se poi si vuole calcolare il livello sonoro complessivo, è sufficiente sommare energeticamente il campo riflesso e quello diretto; si ottiene così la seguente relazione, nota come formula del campo semi-riverberante, poichè assomma in sè la formula del campo libero e la soprastante formula del campo riverberante:

$$L_{\text{rifl}} = L_W + 10 \cdot \lg \left[\frac{Q}{4 \cdot \pi \cdot d^2} + \frac{4}{\sum_i \alpha_i \cdot S_i} \right]$$

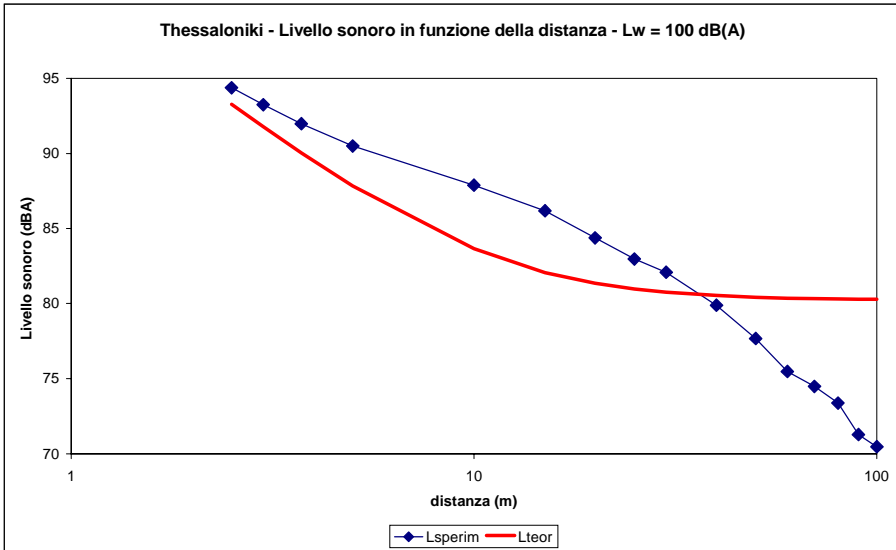
Dal confronto con la relazione di definizione del fattore di correzione ambientale K , si ha poi:

$$K = 10 \cdot \lg \left[1 + \frac{16 \cdot \pi \cdot d^2}{Q \cdot \sum_i \alpha_i \cdot S_i} \right]$$

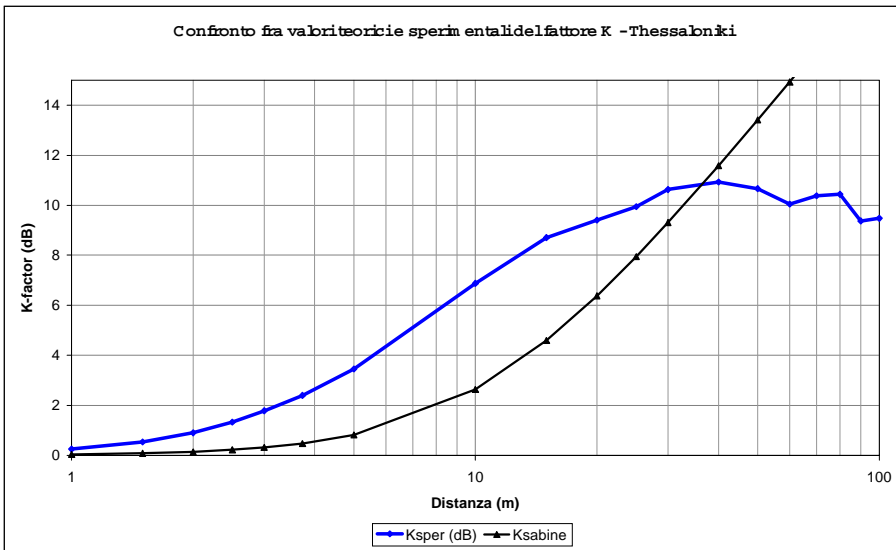
1.4 Gli ambienti bassi e vasti

Purtroppo la formulazione del campo semi-riverberante, riportata nel precedente paragrafo, può essere applicata con successo solo ad un limitato numero di ambienti di lavoro. Nella grande maggioranza dei casi si ha invece a che fare con ambienti bassi e vasti, dove una dimensione del locale (l'altezza) è significativamente minore delle altre due, e dove la distribuzione del materiale fonoassorbente non è uniforme.

In tali frequenti condizioni, si ha quindi un significativo scostamento fra il comportamento reale della propagazione sonora e quello teorico basato sulle formule suddette. Le seguenti due figure mostrano il confronto sperimentale/teorico nel caso dell'ambiente oggetto dei rilievi sperimentali già presentati nel par. 1.2.



Da questo primo grafico già si osserva come il modello teorico del campo semi-riverberante mal si presti ad essere descritto mediante un singolo valore di DL_2 : infatti la curva teorica parte con una pendenza iniziale coincidente con quella di campo libero ($DL_2=6$ dB/radd.), e termina con pendenza pressochè nulla, assumendo via via tutti i valori intermedi.



Si nota facilmente come gli scostamenti siano rilevanti: a 10 m dalla sorgente, l'utilizzo della formula del campo semi-riverberante porta ad una sottostima del livello sonoro di circa 6 dB(A).

Ciò significa che l'impiego della formula del campo semiriverberante, purtroppo oggi diffusissimo, andrebbe invece limitato ai soli casi in cui le ipotesi di campo diffuso sono effettivamente soddisfatte.

Si deve però anche notare che quanto sopra non invalida di per se lo schema concettuale descritto al par. 1.2: il concetto di separare il campo diretto da quello riflesso e la definizione del fattore K sono in realtà perfettamente validi anche in ambienti bassi e vasti, soltanto non si può impiegare in tali ambienti la semplice formula descritta al par. 1.3 per valutare numericamente tali termini.

Come verrà mostrato al par. 3 di questo lavoro, è viceversa possibile mantenere lo schema di calcolo semplificato impiegando una formula modificata per la quantificazione dell'incremento causato dal campo riflesso, ottenendo un ottimo accordo con i risultati sperimentali, senza dover fare impiego di complessi metodi di calcolo computerizzato della propagazione, basati sulla simulazione della risposta all'impulso.

Va qui osservato invece che la norma ISO/TR 11690-3:1997 fornisce indicazioni più restrittive. Infatti essa suggerisce che, allorchè le ipotesi di campo diffuso non siano soddisfatte, la metodica di simulazione impiegata sia obbligatoriamente di "Tipo 2", cioè basata sui metodi dell'acustica geometrica (sorgenti immagini, ray tracing, etc.), che vengono descritti nel successivo capitolo.

2. Metodiche di calcolo numerico della propagazione sonora

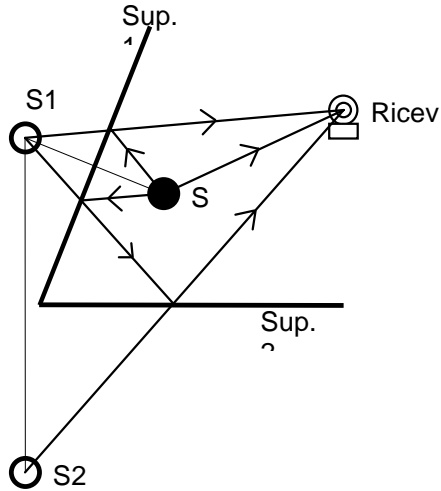
Vengono qui descritte succintamente le principali metodiche di calcolo basate sulle assunzioni dell'acustica geometrica. Secondo tale semplificazione, l'energia sonora si propaga mediante raggi rettilinei, subendo fenomeni di riflessione sulle superfici (con modalità speculare e/o diffusa) ed eventualmente diffrazione sui bordi degli ostacoli. La natura ondata del fenomeno viene completamente trascurata, cosicchè la modellazione secondo l'acustica geometrica non è in grado di riprodurre i fenomeni di interferenza o risonanza. Inoltre il calcolo viene di solito eseguito su base puramente energetica, senza tenere conto della fase di treni d'onda diversi, allorchè gli stessi giungono simultaneamente sul ricevitore.

Nonostante le semplificazioni suddette, le metodiche di calcolo basate sull'acustica geometrica sono in grado di fornire previsioni attendibili della propagazione sonora in ambiente di lavoro, considerando che solitamente viene richiesto unicamente il valore complessivo in dB(A) in ciascun punto di calcolo. L'unico inconveniente è che, tanto più raffinato è il metodo di calcolo impiegato, tanto maggiore è il numero e l'accuratezza richiesta dei dati in ingresso necessari.

2.1 Modelli alle Sorgenti Immagine

Sembra che già gli antichi greci usassero costruire i teatri all'aperto basandosi sulla previsione della riflessione del suono, ed è plausibile che tale previsione venisse effettuata con la tecnica delle Sorgenti Immagine. In effetti questo sistema è in uso, nella sua implementazione grafica diretta, sin dal secolo scorso.

La seguente figura illustra la costruzione di una sorgente del primo ordine, ed a partire da questa di una sorgente del 2° ordine (riflessione doppia):



Una volta individuata la posizione di una sorgente immagine, si calcola il contributo al campo sonoro nel punto ricevente considerando la stessa come sorgente in campo libero alla distanza effettiva fra sorgente immagine e ricevitore, con potenza sonora ridotta per effetto dell'assorbimento di energia da parte delle pareti su cui l'onda ha impattato, ed impiegando dunque la relazione:

$$L_p = L_W + 10 \cdot \lg \left(\frac{Q_{\vartheta} \cdot \prod_i (1 - \alpha_i)}{4 \cdot \pi \cdot r^2} \right)$$

Poichè in base alla distanza percorsa è noto il tempo impiegato dall'onda a raggiungere il ricevitore, è possibile costruire a partire dai singoli arrivi d'energia sonora la risposta all'impulso energetica in ciascun ricevitore. Essa può poi venire integrata all'indietro, onde ottenere il decadimento sonoro di una sorgente stazionaria interrotta, e valutare dunque sia il livello sonoro a regime, sia il tempo di riverberazione.

La costruzione può essere via via iterata fino ad ordini molto elevati, ma procedendo in tal modo il numero di sorgenti immagine create cresce a dismisura. Se si considera ad esempio una semplice stanza parallelepipedica, si osserva come il numero di sorgenti immagine del primo ordine sia pari a 6, quelle del 2° ordine sono 30, quelle del 3° ordine 150, quelle del 4° ordine 450, e via così in progressione geometrica.

In una stanza parallelepipedica la generazione delle coordinate delle sorgenti immagine è pressochè automatica, e si è sicuri che esse sono sempre sicuramente "viste" da tutti i ricevitori. Pertanto in questa geometria particolarmente semplice il metodo è molto efficace, ed è possibile generare iterativamente sorgenti di ordine molto elevato, arrivando a descrivere correttamente buona parte della coda riverberante costituita dall'arrivo di tutte le onde riflesse.

Quando viceversa la geometria è più complicata, è necessario operare un test di visibilità fra ciascuna sorgente immagine e ciascun ricevitore, per essere sicuri che il raggio riflesso colpisca il piano di ciascuna parete interessata dalle riflessioni in un punto interno all'elemento di superficie stesso. Si scopre che in tal caso, pur venendo

generate centinaia di migliaia di sorgenti immagine (il numero è impressionante in ambienti di forma molto irregolare), solo una piccolissima percentuale delle stesse supera i test di visibilità e tutte le altre non contribuiscono al campo sonoro nel ricevitore considerato. Poichè il calcolo comprende ora numerosi, complicati controlli, e gli stessi vanno ripetuti per ciascun ricevitore, l'elaborazione diviene molto lenta, ed è solitamente impossibile generare sorgenti immagine di ordine superiore al 4° o 5°: ciò chiaramente è del tutto insufficiente alla previsione dell'intera coda sonora, e pertanto la parte mancante di essa deve venire in qualche modo ricostruita, ad esempio ricorrendo ancora una volta alla teoria statistica del campo diffuso.

In ambienti perfettamente diffusi i risultati ottenibili con la tecnica ibrida (sorgenti immagine + coda riverberante) sono accettabili. Viceversa, in ambienti marcatamente non diffusi, come sovente sono quelli industriali, solo la prima parte della risposta all'impulso è corretta, e la coda mostra significativi scostamenti dall'andamento reale. In tale situazione, il metodo delle sorgenti immagine può produrre errori non molto diversi da quelli ottenibili con la semplice formula del campo semiriverberante, e dunque la maggior onerosità del calcolo non trova alcuna giustificazione.

2.3 Ray Tracing

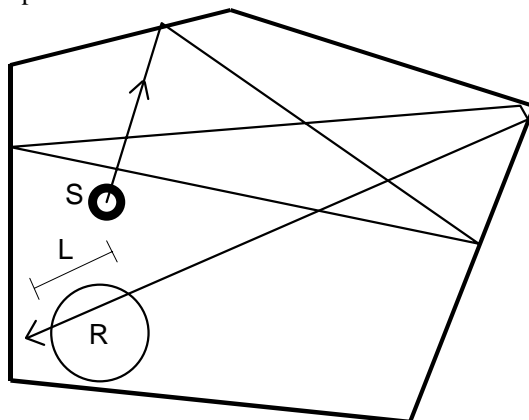
Questa tecnica è stata sviluppata da Krokstadt [2] ormai da 30 anni, e nella sua formulazione originale può essere considerata fra i Metodi di Montecarlo. A partire dalla sorgente sonora (puntiforme) si lancia un gran numero di "raggi sonori" in direzioni scelte a caso, con una certa energia iniziale dipendente dalla direttività della sorgente nella particolare direzione considerata. E' pertanto necessario disporre di un algoritmo di generazione dei raggi che produca, mediamente, una uniforme distribuzione degli stessi su una sfera, e ciò costituisce di per sè un problema non banale.

I raggi vengono poi seguiti nei loro rimbalzi sulle superfici di contorno, che possono avvenire sia con legge speculare che diffusa; in quest'ultimo caso, viene nuovamente impiegato un generatore di numeri casuali per reindirizzare il raggio in una direzione arbitraria, eventualmente tenendo conto di una legge probabilistica di diffusione, quale ad esempio quella di Lambert. Ad ogni rimbalzo, l'energia posseduta dal raggio viene ridotta della quota assorbita dal materiale, che può essere resa variabile in funzione dell'angolo di incidenza (ad esempio con le note relazioni di Davis o London [3]). Si può anche tenere conto dell'attenuazione dovuta alla dissipazione nel mezzo (aria), mentre **non deve essere presa in considerazione la divergenza sferica**, cioè l'attenuazione di livello sonoro causata dall'allontanamento progressivo dalla sorgente: a ciò provvede già la divergenza fra i raggi, e la conseguente riduzione del numero di essi che va ad impattare su un ricevitore, al crescere della distanza dello stesso dalla sorgente.

I ricevitori sono costituiti da corpi di dimensione finita, solitamente sfere (onde risultare omnidirezionali). Anche il meccanismo di verifica di impatto con un ricevitore è molto delicato, poichè da esso dipende la congruenza fisica del modello e la sua stabilità statistica. Sono stati in passato proposti ricevitori ad intensità, nei quali si calcola il contributo del raggio che colpisce la sfera come rapporto fra l'energia emessa (in questo caso sarebbe meglio parlare di potenza) e la superficie del ricevitore stesso.

Tuttavia, in campo diffuso è meglio parlare di densità dell'energia sonora, calcolando l'energia per unità di volume che si viene a stabilire nella sfera ricevente. Solo tale tipo di ricevitore è infatti in grado di fornire il valore corretto del livello sonoro sia in campo libero, sia in campo diffuso.

La seguente figura illustra lo schema di generazione dei raggi, di tracciamento degli stessi, e di impatto su un ricevitore sferico a densità:



La quota di Densità di Energia Sonora (in J/m^3) che arriva sulla sfera ricevente è proporzionale alla lunghezza L del segmento di raggio che la interseca. In particolare, se la sorgente sonora ha una potenza W (in Watt) ed una direttività Q_0 , e la stessa emette N raggi, che si propagano alla velocità del suono c_0 , il raggio "trasporta" una energia per metro di lunghezza E' (in J/m) pari a:

$$E' = \frac{W \cdot Q_0}{N \cdot c_0}$$

E dunque il ricevitore ottiene un contributo alla propria Densità di Energia sonora che è pari a:

$$D' = \frac{E' \cdot L}{V} \cdot \prod_i (1 - \alpha_i) \cdot e^{-\beta \cdot x}$$

in cui il termine β entro l'esponenziale rappresenta il coefficiente di dissipazione del mezzo (aria), dipendente dalla frequenza, dalla temperatura e dall'umidità relativa (x è ovviamente il percorso complessivo del raggio, da cui dipende anche il tempo di arrivo del contributo suddetto).

Affinchè si abbia sufficiente stabilità statistica, è necessario sparare un numero di raggi così elevato che almeno un certo numero di essi colpisca il ricevitore al termine della loro corsa. Se ad esempio si utilizza un ricevitore con raggio di 1m, e si vuole inseguire i raggi per 2s di storia, la probabilità che un raggio colpisca il ricevitore (concettualmente situato a $2 \cdot c_0 = 680$ m dalla sorgente) è pari al rapporto fra l'area del cerchio massimo della sfera (π) e l'area su cui i raggi si sono dispersi ($4 \cdot \pi \cdot 680^2$), che è pari a $1/1849600$. Volendo dunque che 3-4 raggi almeno arrivino, occorrerebbe lanciarne parecchi milioni!

Ovviamente, in campo più o meno diffuso si può anche ammettere che arrivino al ricevitore molti meno raggi, poichè finchè valgono le ipotesi dell'acustica statistica

essi mediamente si equivalgono (a parità di tempo di corsa) in termini di contributo energetico.

Infatti, nel campo riverberante si ha una frequenza n di arrivo dei raggi sul ricevitore pressochè costante:

$$n = N \cdot \frac{c_0 \cdot \pi \cdot R^2}{V}$$

Pertanto è sufficiente che sia adeguatamente alto il numero di impatti che si verificano entro ciascun segmento temporale in cui la risposta all'impulso è suddivisa. Se ad esempio si utilizza una divisione in classi di 1 ms, in un ambiente Sabiniano avente volume $V=10000 \text{ m}^3$ si ha che un ricevitore di 1m di raggio richiede 1000 raggi per dar luogo a 100 impatti ogni ms.

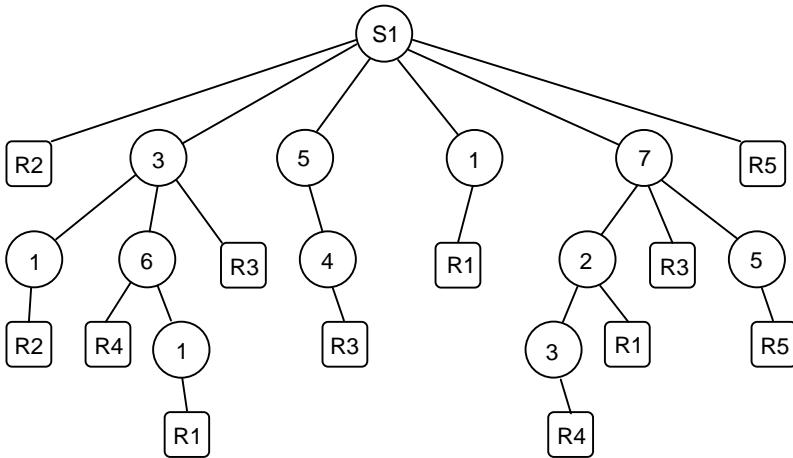
In ogni caso, in presenza di superfici diffondenti la stabilità statistica del metodo è ottenuta solo con il crescere del numero di raggi, che raramente può essere ridotto a qualche decina di migliaia. Pertanto i tempi di elaborazione restano piuttosto elevati.

Un altro difetto del metodo è che, anche se è abbastanza facile considerare superfici diffondenti, risulta viceversa problematico tenere conto in modo semplice della diffrazione da parte di ostacoli (schermi). Risulta invece possibile considerare **volumi diffondenti**, ovvero regioni dello spazio in cui i raggi subiscono una redirezione casuale: ciò può servire a tenere conto della presenza di ostacoli semitrasparenti, quali scaffalature aperte, regioni intricate di tubazioni o cavi, macchinari complicati, etc. .

2.4 Modelli Ibridi (Ray Tracing + Image Source)

Alla base di questo tipo di modelli sta l'originale intuizione di Vorlander [4], che ha proposto di impiegare il Ray Tracing come pre-processore di un tradizionale codice alle sorgenti immagine: il tracciamento dei raggi serve dunque in questo caso soltanto ad identificare quelle successioni di superfici capaci di generare una sorgente immagine valida (che viene comunque assoggettata ai tradizionali test di visibilità), generando in tal modo un numero di possibili sorgenti immagine di parecchi ordini di grandezza inferiore rispetto a quello prodotto dall'arbitraria combinazione di tutte le superfici.

Il problema di questo metodo è costituito dal fatto che il Ray Tracing tende a generare più di una volta la stessa sorgente immagine: occorre dunque verificare che la stessa non sia già stata presa in considerazione, onde non contare due volte il suo contributo. La tecnica più efficiente per effettuare questo controllo è la costruzione di una struttura dati ad albero, in cui la radice è la sorgente sonora, e le ramificazioni rappresentano impatti sulle singole superfici. La seguente figura rappresenta un albero di questo tipo, limitato al 3° ordine di riflessioni:



Sebbene il metodo ibrido abbia considerevoli vantaggi rispetto all'originale metodo delle Sorgenti Immagine, tuttavia esso è comunque troppo lento per poter affrontare lo studio di sorgenti immagine di ordine molto elevato, anche se consente abbastanza agevolmente di arrivare a studiare fino al 10° ordine anche in ambienti di forma complessa. Infatti, se si vuole essere sicuri di trovare **tutte** le sorgenti immagine, occorre che il Ray Tracing preliminare impieghi un numero di raggi pari almeno al minimo teorico affinché almeno uno descriva l'intera traiettoria, in base alla relazione già vista. Pertanto, anche se la fase di verifica delle sorgenti è divenuta molto rapida, la ricerca delle stesse richiede comunque un tempo di calcolo molto elevato onde tracciare centinaia di migliaia di raggi.

Inoltre in questo caso non si può fare affidamento sulle leggi dell'acustica statistica onde ridurre il numero di raggi da tracciare. In questo caso, infatti, se una sorgente immagine non viene riconosciuta si ha una riduzione del livello sonoro al ricevitore, mentre con il Ray Tracing, riducendo il numero di raggi lanciati, cala sì il numero di impatti sul ricevitore, ma ciascun raggio che impatta porta una maggior energia, e pertanto in termini di livello sonoro non si hanno grossi problemi.

Pertanto il metodo ibrido non pare adatto alle applicazioni in ambiente industriale, ove non è molto importante avere una grande precisione sulla determinazione del tempo di arrivo delle riflessioni, e viceversa è importante essere sicuri di non sottostimare il livello sonoro al ricevitore. Il metodo ibrido è invece adatto allo studio degli echi in teatri o auditori, poichè consente facilmente di identificare i cammini dei raggi sonori che danno luogo ad echi fastidiosi.

2.5 Beam Tracing

Il Beam Tracing è risultato da una naturale evoluzione del Ray Tracing, avvenuta progressivamente nel tempo, in parte in modo non voluto (in seguito cioè ad implementazioni errate dell'algoritmo originale, nel quale si metteva in conto anche l'attenuazione per divergenza sferica, come invece non si dovrebbe fare).

Concettualmente il modo più semplice di realizzare un Beam Tracing è quello di implementare un Ray Tracing nel quale il raggio del ricevitore non è costante, ma cresce man mano che il raggio si allontana dalla sorgente. In questo modo il numero di raggi da tracciare non cresce più con il quadrato della lunghezza della risposta all'impulso da studiare, poichè il rapporto fra area del cerchio massimo della sfera

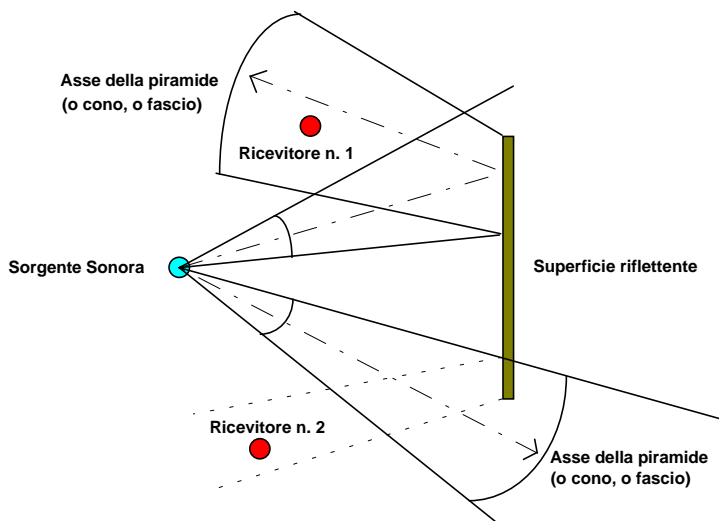
ricevente ed area su cui si disperdono i raggi diviene costante. Il problema di questa implementazione è dato dal fatto che, al crescere del raggio del ricevitore, esso tende a fuoriuscire dalle superfici di confine dell'ambiente, e pertanto tende a ricevere energia anche quando il suo centro è nascosto dietro superfici solide. Alla fine, il ricevitore diviene più grande dell'ambiente stesso, e riceve energia sempre, qualunque sia la traiettoria del raggio.

Un diverso modo di ottenere lo stesso effetto è quello di tracciare dalla sorgente raggi divergenti, o coni. In questo caso il ricevitore torna ad essere puntiforme, e quando lo stesso è interno al cono esso gli comunica una certa intensità di energia sonora, calcolata con la relazione (4) come per le sorgenti immagine. Ovviamente i coni non coprono bene la superficie di una sfera: se essi sono adiacenti, restano degli sguinci non illuminati, mentre se essi sono sovrapposti, in modo da coprire l'intera superficie sferica, si creano delle lunette illuminate due volte. Il Cone Tracing è stato pertanto abbandonato, ed al suo posto si preferisce impiegare dei fasci di apertura non ben delimitata, in cui l'energia sonora viene fatta decrescere con legge gaussiana allontanandosi dall'asse del fascio. Tale implementazione è dovuta a Vian, Martin e Maercke [5].

Esiste anche una variante, dovuta a Naylor [6], che impiega il cone tracing come preprocessore di un metodo alle sorgenti immagine, utilizzando coni sovrapposti ed eliminando le sorgenti doppie mediante la tecnica già vista di memorizzazione dell'albero delle riflessioni. I risultati ottenuti in tal modo sono leggermente più precisi di quelli ottenibili con la formulazione di Vian, poichè non esiste in questo caso una convergenza statistica al risultato, che è perfettamente deterministico.

Un'altro tracciante di fasci divergenti, che evita il problema della sovrapposizione fra i fasci, è costituito dal Pyramid Tracing: esso verrà dettagliatamente descritto nel paragrafo successivo. Qui va comunque citato il significativo contributo di Lewers [7], che pur avendo implementato correttamente la generazione di fasci a base triangolare (che coprono perfettamente la superficie sferica), non ha tuttavia compreso la causa della perdita di immagini di ordine elevato, addebitandola a scarsità di diffusione, e l'ha corretta dunque impropriamente sovrapponendo un modello diffusivo al tracciamento deterministico di piramidi.

Purtroppo anche il Beam Tracing non è in grado di prevedere correttamente l'intera coda riverberante, poichè quando la base dei coni (o fasci) diviene grande rispetto alle dimensioni delle superfici di confine si ha la perdita di un numero progressivamente crescente di sorgenti immagine, giacchè l'intero cono viene redirezionato seguendo la sorte del raggio centrale allo stesso, come mostrato dalla seguente figura:



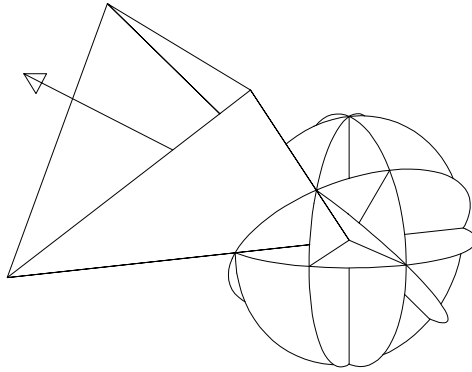
E' pertanto necessario correggere la risposta all'impulso ottenuta, ed a questo scopo sono state proposte varie tecniche, di tipo sia additivo che moltiplicativo, nessuna delle quali è però applicabile con sicurezza in condizioni di campo sonoro non diffuso, quando le ipotesi dell'acustica statistica non sono rispettate.

2.6 Pyramid tracing

Il tracciamento di piramidi si è affacciato solo recentemente sulla scena delle metodiche di simulazione acustica; esso è stato sviluppato esplicitamente per risolvere tutte le limitazioni sinora contenute nei sistemi di modellizzazione del campo sonoro in grandi ambienti, che attualmente sono più idonei allo studio dei teatri che degli ambienti industriali.

In particolare il tracciamento di piramidi consente di tenere conto dell'effetto di diffrazione sul bordo libero delle schermature o degli ostacoli, e considera pure la quota di energia che passa attraverso le superfici (dotate di Potere Fonoisolante finito).

La generazione delle piramidi è perfettamente isotropa, grazie all'algoritmo di Tenenbaum et al. [8], costituito da una progressiva bisezione degli 8 spicchi di partenza, come mostra la seguente figura:



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. Pertanto non viene fatta alcuna ipotesi di diffusione del campo sonoro, che può dar luogo a tempi di riverbero variabili da punto a punto, a decadimenti con doppia pendenza, ad echi molto ritardati, etc.

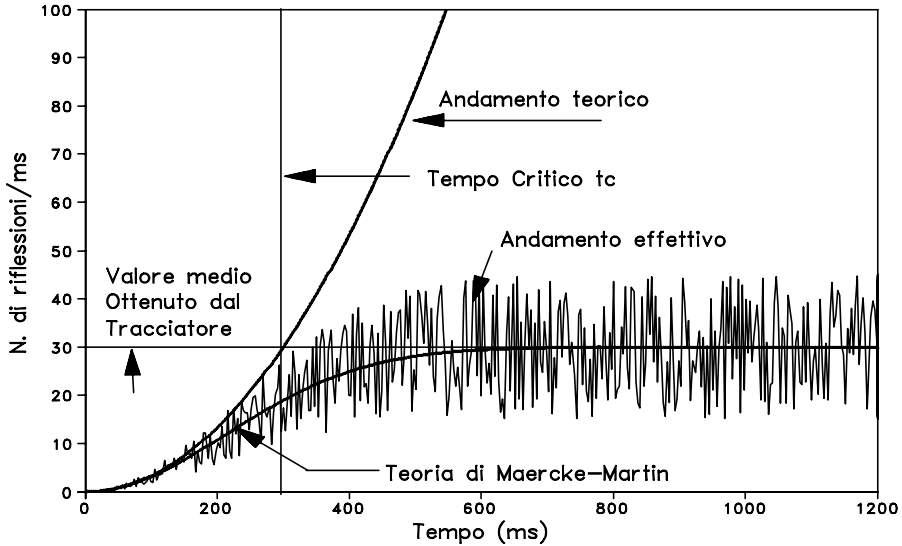
La correzione della coda sonora, effettuata per le ragioni viste al precedente paragrafo, è di tipo moltiplicativo. Essa si basa sul fatto che il numero di impatti su un ricevitore nell'unità di tempo $n(t)$, ottenuto da un tracciatore di fasci divergenti, può essere descritto matematicamente, secondo Maercke/Martin [5], dalla relazione:

$$n(t) = \frac{4 \cdot \pi \cdot c_0^3 \cdot t^2}{V} \cdot \left(1 - \exp \left(\frac{lcm^\alpha}{t^2 \cdot c_0^\alpha} \cdot \left(\frac{N}{4 \cdot \beta} \right)^{\alpha/2} \right) \right) = \frac{4 \cdot \pi \cdot c_0^3 \cdot t^2}{V} \cdot \left(1 - \exp \left(\frac{t_c^\alpha}{t^\alpha} \right) \right)$$

L'andamento teorico secondo la teoria delle sorgenti immagine è invece costituito semplicemente dal primo fattore della relazione suddetta, senza il termine fra parentesi, e pertanto cresce con il quadrato del tempo.

Nella relazione compaiono tre parametri dipendenti dalla natura del campo sonoro: il Libero Cammino Medio lcm , che viene calcolato in base ad una statistica sull'effettiva percorrenza dei raggi sparati in asse alle piramidi, ed i coeff. adimensionali α e β , che dipendono dalla natura più o meno rispondente alle ipotesi di perfetta diffusione del campo sonoro (in campo perfettamente diffuso risulta $\alpha=2$ e $\beta=0.1$).

Il Tempo Critico t_c , che compare nella relazione precedente, rappresenta il punto di ideale separazione fra la prima parte della coda sonora, in cui vengono rilevate correttamente tutte le sorgenti immagine, e la parte tardiva in cui il numero di arrivi di energia nell'unità di tempo è costante: esso è infatti definito come il punto di intersezione fra la parabola, corrispondente all'andamento teorico, e la retta orizzontale che rappresenta il numero costante di intercettazioni rappresentato dalla relazione suddetta. La seguente figura illustra una situazione reale, a confronto con le stime teoriche di cui sopra:



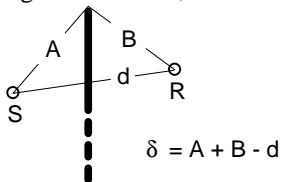
La correzione della coda riverberante viene dunque eseguita semplicemente dividendo l'energia sonora per il termine fra parentesi della relazione precedente, che è sempre minore di 1 e va diminuendo progressivamente al crescere di t .

In pratica la stima di t_c è vincolata alla scelta di un opportuno valore dei coeff. α e β , scelta che può essere fatta cercando il valore che minimizza la differenza fra la coda sonora esatta, ottenuta con un numero di raggi N molto elevato, e la coda sonora stimata lanciando un ridotto numero di raggi.

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

$$L_{\text{diff}} = L_{\text{dir}} - 5 - 20 \cdot \lg \left(\frac{\sqrt{2 \cdot \pi \cdot |N|}}{\tanh \sqrt{2 \cdot \pi \cdot |N|}} \right)$$

in cui L_{dir} è il livello diretto, che giungerebbe al ricevitore se la parete "obstructing" non ci fosse, ed N è il n° di Fresnel, dato da:



$$N = \frac{2}{\lambda} \cdot \delta = \frac{2 \cdot f}{c_0} \cdot \delta$$

Grazie a queste possibilità, l'algoritmo di tracciamento di piramidi è in grado di affrontare lo studio della propagazione sonora anche in spazi geometricamente complessi, in presenza di schermature parziali o totali, ed in ambienti con comportamento molto lontano da quello di campo diffuso.

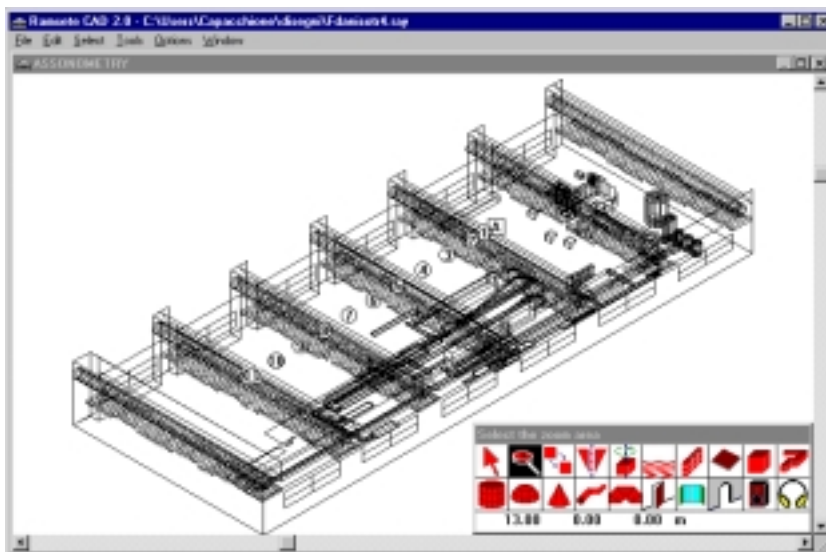
3. Un esempio di impiego del Pyramid Tracing in ambiente basso e vasto

Volendo saggiare la affidabilità delle simulazioni numeriche effettuabili in ambienti industriali bassi e vasti, è stata operato il calcolo con la metodica del Pyramid Tracing in un grande ambiente adibito ad imbottigliamento, nel quale erano precedentemente state eseguite dettagliate misurazioni sia della propagazione del campo sonoro, sia della emissione sonora delle macchine installate, sia infine dei livelli sonori prodotti in tutto l'ambiente dal funzionamento delle stesse

Si tratta quindi di un caso in cui sia i dati di ingresso, sia quelli in uscita del programma di calcolo sono verificati sperimentalmente, e quindi è possibile valutare effettivamente la capacità dello stesso di riprodurre correttamente i fenomeni di propagazione che avvengono in un ambiente basso e vasto.

3.1 Rappresentazione geometrica

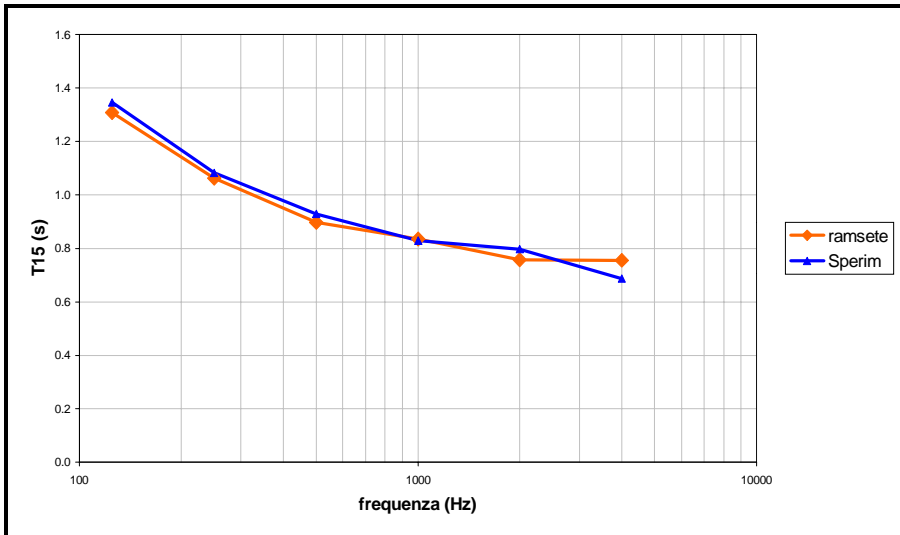
Partendo da un disegno CAD in pianta dello stabilimento, è stato costruito il modello tridimensionale dello stesso, comprensivo dei principali ingombri costituiti dai macchinari installati. All'interno dello stesso sono stati innanzitutto collocati una singola sorgente sonora omnidirezionale ed una serie di ricevitori posti a distanze crescenti dalla sorgente, nelle esatte posizioni in cui la stessa situazione era stata fatta oggetto di rilevamenti sperimentali, come mostrato dalla seguente figura.



3.2 Simulazione del tempo di riverberazione

Agendo opportunamente sulla scelta dei materiali, e dopo aver ottimizzato la scelta dei fattori adimensionali di correzione della coda α e β , si è riusciti ad

ottenere un buon accordo fra i valori sperimentali e quelli calcolati del tempo di riverberazione medio dell'ambiente, come mostrato dalla seguente figura.



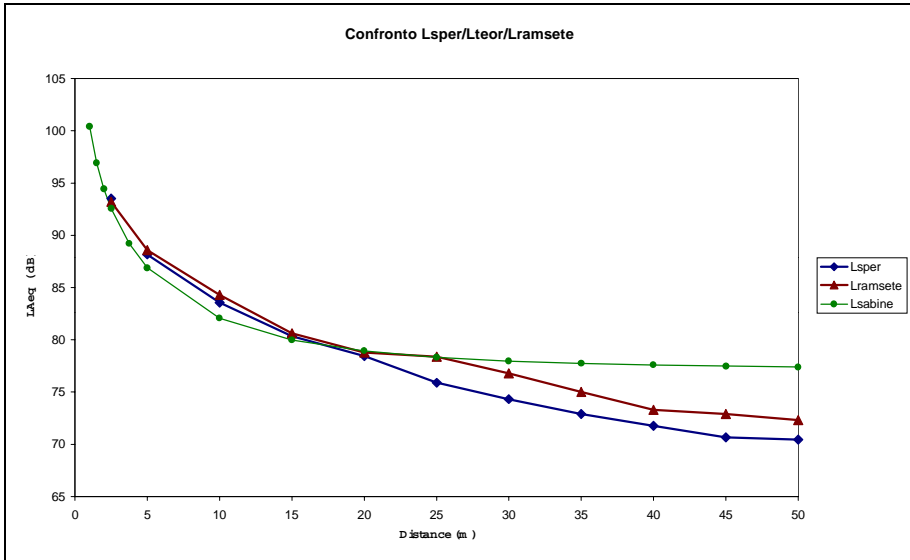
Va osservato che i valori dei parametri α e β , risultanti dal procedimento di ottimizzazione, sono risultati pari rispettivamente a 2 e 0.5. Ciò significa che l'ambiente è puramente obbediente, dal punto di vista geometrico, alle ipotesi di Sabine ($\alpha=2$), ma presenta una distribuzione del materiale fonoassorbente molto disuniforme (praticamente è tutto sul soffitto), che causa una riverberazione maggiore rispetto a quella che si avrebbe con campo veramente diffuso, e quindi l'elevato valore di β causa un incremento dell'energia associata alla coda riverberante.

In pratica, quindi, pur avendosi un tempo di riverbero particolarmente basso, il massiccio trattamento fonoassorbente non è sufficiente ad impedire che le peculiari caratteristiche di propagazione tipiche degli ambienti bassi e vasti portino il livello sonoro ad incrementarsi di alcuni dB rispetto al puro campo diretto.

3.3 Simulazione del decadimento con la distanza

Essendo stato tarato il valore del tempo di riverberazione, in campo diffuso si otterrebbe in modo pressoché automatico di avere il decadimento del livello sonoro con la distanza coincidente con i risultati sperimentali. Ciò in generale non accade in campo non diffuso, visto che si possono avere ambienti con caratteristiche di propagazione molto diverse, pur ad assoluta parità ed uniformità dei valori del tempo di riverberazione.

Nel caso in esame, invece, il programma di simulazione, senza necessità di ulteriori aggiustamenti, ha fornito direttamente una stima di livelli sonori in ottimo accordo con i dati rilevati sperimentalmente, come mostrato dalla seguente figura.



Non si è pertanto ritenuto necessario andare a correggere ulteriormente i parametri di calcolo, onde eliminare anche il piccolo errore residuo, visto che comunque il programma di simulazione ha fornito risultati in sufficiente accordo con i risultati sperimentali, decisamente più accurati di quelli ottenibili con la formula del campo semiriverberante.

In termini numerici, la seguente tabella confronta i valori calcolato e misurato del decadimento di livello per raddoppio di distanza (DL2):

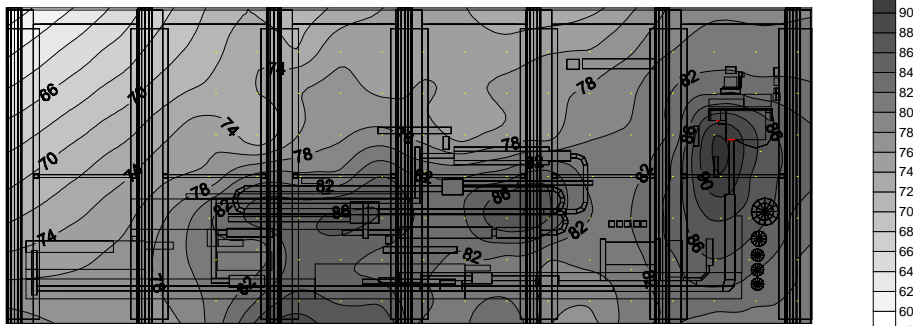
Caso	DL2 (dB/radd.)
Pyramid tracing	4.86
Campo semiriverberante	3.38
Sperimentale	5.45

3.4 Simulazione della propagazione del rumore emesso dalle macchine

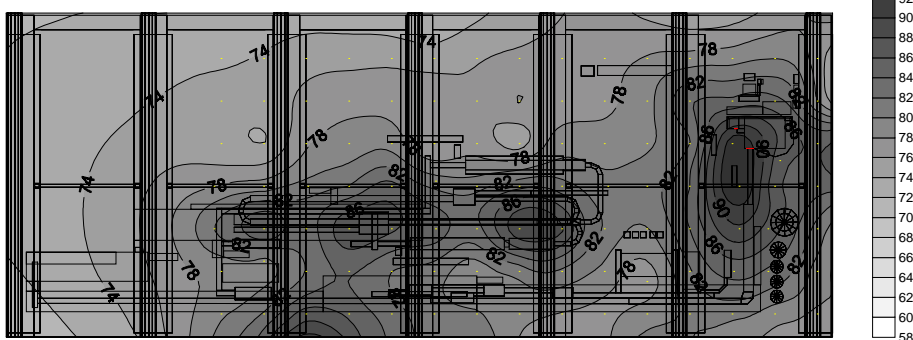
Dopo aver introdotto nella geometria numerica un adeguato numero di sorgenti sonore, i cui dati di potenza e direttività sono stati ottenuti da rilievi acustici diretti eseguiti sulle singole macchine, è stato operato un nuovo calcolo, utilizzando una griglia regolare di ricevitori esattamente corrispondente a quella impiegata per i rilevamenti fonometrici nello stabilimento.

Le seguenti due immagini pongono a confronto le mappature ottenute dalla elaborazione dei dati rilevati sperimentalmente e calcolati dal programma.

Mappatura con valori sperimentali



Mappatura con valori calcolati con Ramsete



Come si può notare, anche in questo caso l'accordo è ottimo, con valore medio quadratico dello scostamento inferiore a 2 dB(A).

Si conclude quindi che le moderne metodiche di calcolo numerico basate sulle ipotesi dell'acustica geometrica sono in grado, introducendo i corretti dati in ingresso, di produrre simulazioni con accuratezza più che sufficiente.

4. Metodica di calcolo semplificato per ambienti bassi e vasti

Il risultato ottenuto nel caso ora illustrato non deve illudere sulla possibilità di un diffuso impiego delle tecniche di simulazione numerica. Infatti il risultato ottenuto è stato possibile solo a caro prezzo: innanzi tutto il modello è stato tarato sulla base di dettagliati ed estensivi rilievi sperimentali, che da soli sono costati ben più del programma di calcolo stesso; sono poi state necessarie oltre 100 ore-uomo per la messa a punto del modello geometrico e la taratura dei parametri di calcolo; infine è stato necessario reperire dettagliatissime informazioni sulle sorgenti sonore in azione, con un grado di approfondimento ben difficilmente raggiungibile nella vita reale.

In sostanza si è trattato di una dimostrazione di potenzialità tecnica, che è oggi raggiungibile, ma che non è ancora (e non lo sarà per molti anni) alla portata della gran parte degli operatori in ambito industriale. E questo non perchè li strumenti di misura e di calcolo non siano disponibili, ma perchè il tempo necessario al reperimento delle informazioni geometriche ed acustiche necessarie è così grande da rendere antieconomico lo studio acustico, tranne che per impianti ad altissima tecnologia e di per se estremamente costosi, quale quello cui qui ci si è riferiti.

In sostanza occorre quindi un metodo di calcolo con lo stesso grado di complessità della vecchia e sana formulina del campo semi-riverberante, ma che possa essere impiegato tranquillamente in ambienti bassi e vasti senza commettere gli errori del tutto inaccettabili che tale formula solitamente produce.

L'autore ha già affrontato questo approccio in passato, ma ora, grazie all'ultimo anno di ricerche, ha rivisto e migliorato la formulazione empirica a suo tempo sviluppata [9].

Nel seguito viene dunque illustrata la nuova formulazione semplificata per la stima della propagazione sonora in ambienti bassi e vasti, e ne viene saggiata la funzionalità per confronto con i dati sperimentali acquisiti nel corso di 4 diverse campagne di rilevamento, eseguite in ambienti completamente diversi.

4.1 Il fattore di correzione ambientale

In un ambiente basso e vasto, l'impiego della relazione di Sabine per passare dal valore del tempo di riverberazione alle unità assorbenti totali è quantomeno discutibile. In particolare, è decisamente obiezionabile il fatto di prendere in considerazione in tale formula l'intero volume del locale.

Pare così sensato prendere in considerazione un volume ridotto V_r , che dipende unicamente dall'altezza del locale H e non dalla sua estensione in pianta. Per la definizione di tale volume ridotto, si propone di adottare la seguente formula empirica:

$$V_r = 5.64 \cdot T^{0.7} \cdot H^3 + \frac{1.596}{T^{0.7}} \cdot H \cdot \frac{4 \cdot \pi \cdot d^2}{Q}$$

Se a questo punto si impiega la formula di Sabine per ricavare il valore complessivo delle unità assorbenti dell'ambiente, si ottiene:

$$\sum_i \alpha_i \cdot S_i = 0.16 \cdot \frac{V_r}{T} = 0.16 \cdot \frac{5.64 \cdot T^{0.7} \cdot H^3 + \frac{1.596}{T^{0.7}} \cdot H \cdot \frac{4 \cdot \pi \cdot d^2}{Q}}{T}$$

Si nota che in questo modo l'assorbimento totale dell'ambiente non è più una costante, ma varia fortemente con la distanza dalla sorgente.

Sostituendo questa espressione nella formula che fornisce il valore del fattore di correzione ambientale K , in campo semi-riverberante, si ha infine:

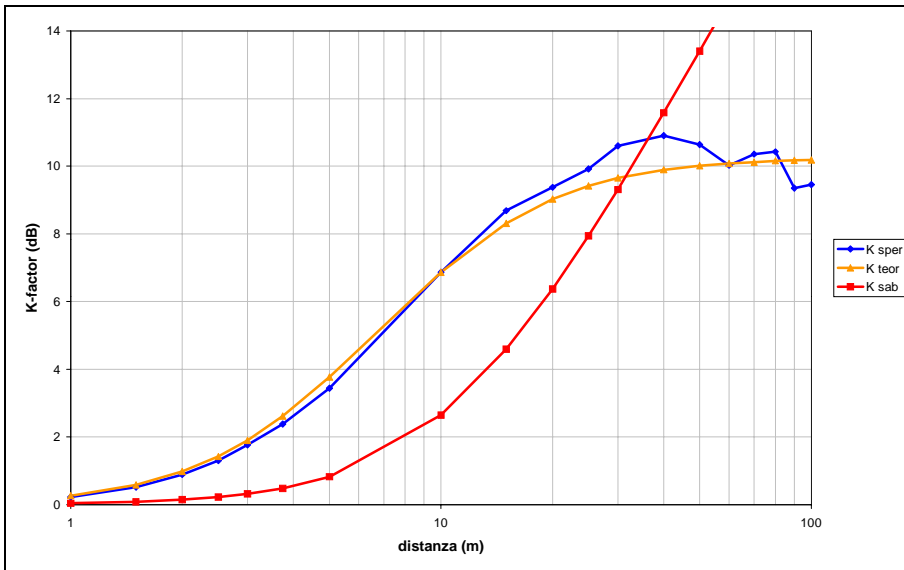
$$K' = 10 \cdot \lg \left[1 + \frac{\frac{16 \cdot \pi \cdot d^2}{Q} \cdot T}{0.16 \cdot \left(5.64 \cdot T^{0.7} \cdot H^3 + \frac{1.596}{T^{0.7}} \cdot H \cdot \frac{4 \cdot \pi \cdot d^2}{Q} \right)} \right]$$

Questa formula è solo leggermente più complicata di quella di partenza, in quanto richiede di conoscere semplicemente il valore del tempo di riverberazione medio del locale e la sua altezza h .

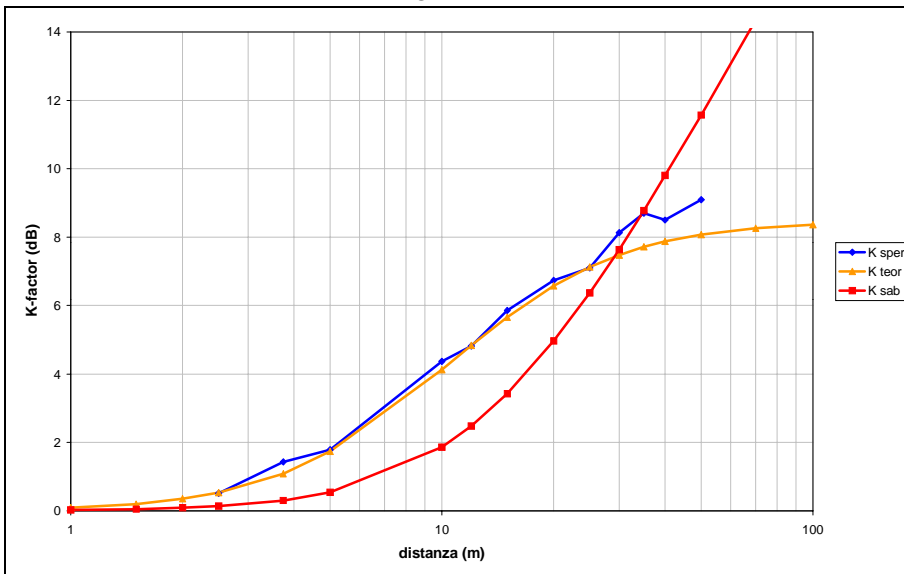
4.2 Confronto con risultati sperimentali

Le seguenti 4 figure mostrano il confronto fra l'andamento del fattore K con la distanza misurato sperimentalmente in 4 diversi stabilimenti e quello calcolato sulla base della precedente formulazione empirica.

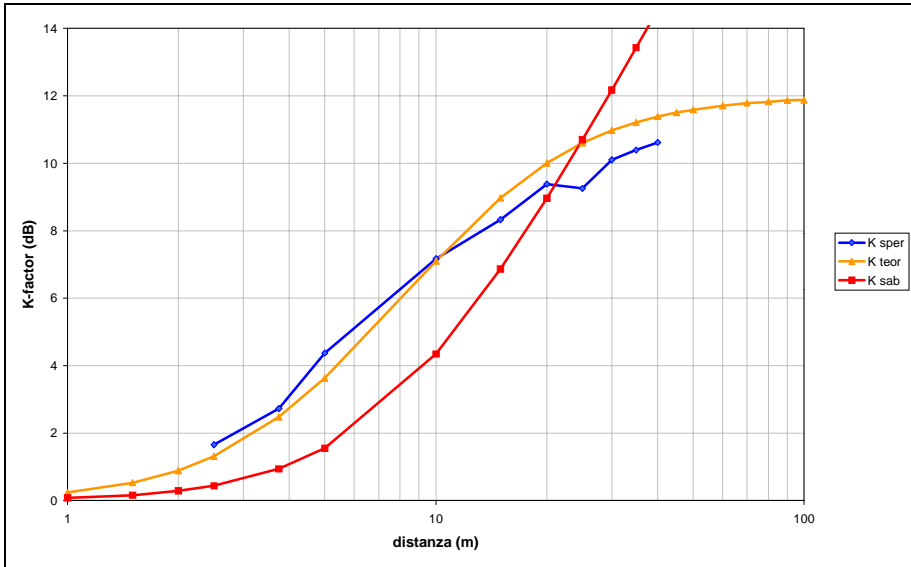
THESSALONIKI



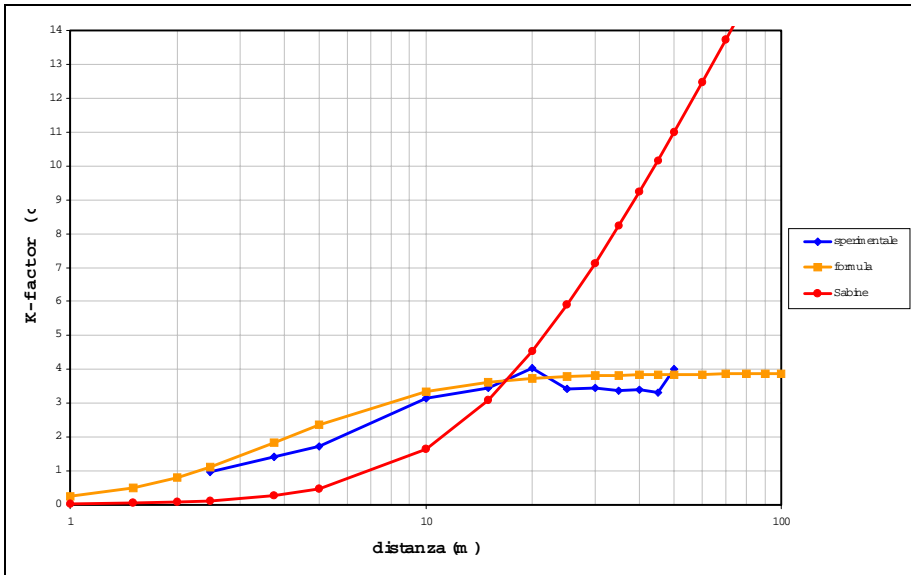
PELFORT-LILLE



PATRASSO



FREDERICIA



Si osserva come in tutti 4 i casi la nuova formulazione empirica consenta un ottimo accordo coi dati sperimentali, mentre quella tradizionale porti ad errori in generale molto elevati.

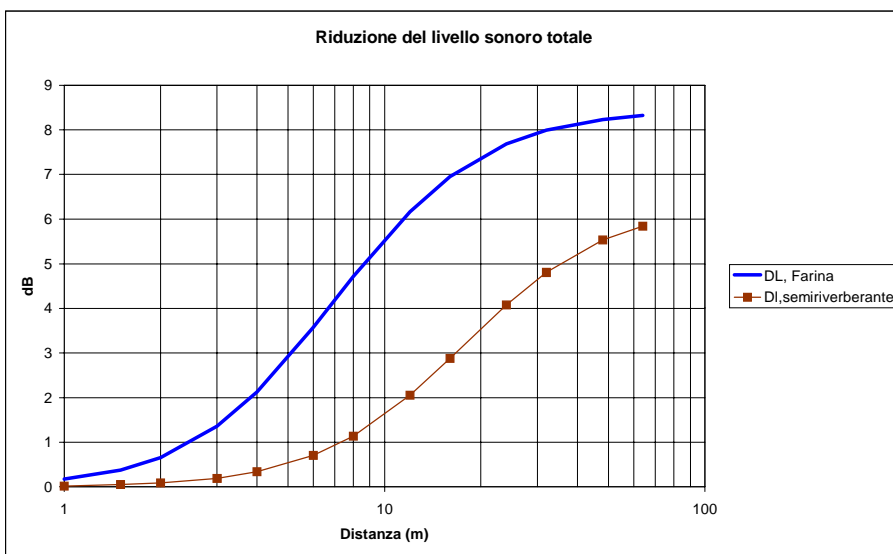
4.3 Valutazione dell'efficacia dei trattamenti fonoassorbenti

Uno dei peculiari effetti della anomala propagazione negli ambienti bassi e vasti è costituito dal fatto che il campo sonoro riflesso è molto più “energetico” di quanto ipotizzabile sulla base della tradizionale formula del campo semi-riverberante. Questo fa sì che i livelli sonori siano anche parecchi dB più alti del previsto, ma questo anomalo incremento può trasformarsi in una grossa riduzione allorchè si va ad installare un idoneo trattamento ambientale basato sul massiccio impiego di materiali fonoassorbenti.

Viene qui illustrato un esempio di calcolo, in cui si ipotizza di avere un ambiente basso e vasto con le seguenti caratteristiche:

Parametro	Valore	u. di misura
Volume Totale V	70.000	m ³
Altezza media h	7	m
Tempo di riverbero iniziale	3	s
Tempo di riverbero trattato	0.7	s

La riduzione di livello sonoro complessivo (diretto + riverberante) varia con la distanza dalla sorgente, come qui mostrato:



A distanze medie dalla sorgente (3-10 m) si hanno grandi differenze fra le due teorie, ed in pratica la nuova formula empirica rende conto delle rilevanti riduzioni di rumorosità che vengono effettivamente ottenute in ambienti bassi e vasti con trattamenti fonoassorbenti ambientali, mentre la teoria tradizionale indica riduzioni sostanzialmente risibili.

5. Conclusioni

Si conclude quindi che, sebbene le moderne metodiche di calcolo basate sull'acustica geometrica forniscano risultati validi anche in ambienti ove il campo sonoro è molto diverso dalle ipotesi di perfetta diffusione, per l'utilizzo pratico nella valutazione degli effetti causati dall'installazione di una nuova sorgente sonora, o per la stima dei benefici ottenibili da un trattamento ambientale, la semplicissima formulazione empirica qui proposta sia più che sufficiente ad evitare i grossolani errori di calcolo connessi con l'improprio impiego della formula del campo semi-riverberante.

Questa conclusione è in parziale contrasto con la citata norma ISO/TR 11690/3, che viceversa non propone alcuna formulazione semplificata alternativa a quella del campo semi-riverberante, e viceversa consiglia di passare sistematicamente all'impiego di modelli numerici basati sull'acustica geometrica non appena le condizioni di propagazione si allontanano dalle ipotesi di validità delle formule statistiche classiche.

6. Bibliografia

- [1] Sabine, W.C. – “Collected papers on acoustics” – Pergam. Pr., London 1929
- [2] Krokstadt A., Strom S., Sorsdal S. - "Calculating the acoustical room response by the use of a ray tracing technique" - J. Sound Vib. 8, pag. 118 (1968).
- [3] London A. - "The determination of Reverberant Sound Absorption Coefficients from Acoustic Impedance Measurements" - J.A.S.A., vol. 22, no. 2, pagg. 263-269, march 1950.
- [4] Vorlander M. - "Simulation of the transient and steady state sound propagation in rooms using a new combined ray-tracing/image-source algorithm" - J.A.S.A. 86 (1), pagg. 172-178, july 1989.
- [5] 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).
- [6] Naylor G.M. - "ODEON - Another Hybrid Room Acoustical Model" - Applied Acoustics Vol. 38 no.s 2-4, pag. 131 (1993).
- [7] Lewers T. - "A combined Beam Tracing and Radiant Exchange Computer Model of Room Acoustics" - Applied Acoustics Vol. 38 no.s 2-4, pag. 161 (1993).
- [8] 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.
- [10] Farina A., Fornari G. – “Studio della propagazione del rumore In ambienti industriali bassi e vasti” – atti del convegno nazionale dBA 198 “Dal rumore ai rischi fisici: valutazione, prevenzione e bonifica negli ambienti di lavoro” - Modena, 17, 18 e 19 settembre 1998.