

# RUMORE IN AMBIENTI INDUSTRIALI: PREVISIONE E CONTROLLO IN FASE DI PROPAGAZIONE

Massimo Garai

DIENCA, Università di Bologna, viale Risorgimento 2, 40136 Bologna  
massimo.garai@mail.ing.unibo.it

## 1. Introduzione

L'articolo presenta una panoramica dei modelli di calcolo correntemente utilizzati per la previsione del rumore in ambiente di lavoro, mettendo in luce le ipotesi fisiche alla base delle diverse approssimazioni del campo sonoro. La trattazione si sviluppa in ordine di complessità crescente dei modelli e quindi ne illustra l'applicazione alla collocazione dei trattamenti fonoassorbenti e degli schermi. Si è cercato di esporre i diversi metodi con una terminologia unificata, riferita alla letteratura scientifica ed alle norme tecniche di settore.

## 2. Scelta del descrittore acustico

In Italia la valutazione del rumore in ambiente di lavoro è attualmente regolata dal Decreto Legislativo 81/2008 [1]. Esso prescrive che la grandezze oggetto di confronto con i valori limite di legge siano il valore di pressione sonora di picco ponderata C,  $p_{C,peak}$ , ed il livello di esposizione giornaliera al rumore (in genere riferito alla giornata lavorativa),  $L_{EX,8h}$ :

$$(1) \quad L_{EX,8h} = L_{Aeq,T_e} + 10 \lg \frac{T_e}{T_0} \quad [\text{dB(A)}]$$

dove:  $L_{Aeq,T_e}$  è il livello continuo equivalente di pressione sonora ponderato A nel periodo  $T_e$  [dB(A)];

$T_e$  è la durata quotidiana dell'esposizione personale di un lavoratore al rumore, ivi compresa la quota giornaliera di lavoro straordinario [s];

$T_0$  vale 8 h = 28800 s.

Il decreto include ed aggiorna il recepimento in Italia della Direttiva europea 2003/10/CE [2].

Allo stato attuale delle conoscenze, i valori di picco non sono calcolabili con sufficiente accuratezza e bisogna procedere mediante misurazione; i valori di  $L_{EX,8h}$  sono in-

vece calcolabili a partire dai tempi di esposizione dichiarati e dai valori del livello equivalente. Pertanto, la previsione del rumore in ambiente di lavoro è ricondotta al calcolo dei valori di  $L_{Aeq,Te}$  in diverse posizioni nell'ambiente. Questo viene poi identificato con il semplice livello di pressione sonora,  $L_p$ , supponendo di considerare una situazione stazionaria. Nel caso che le lavorazioni si svolgano in più cicli operativi, caratterizzati da differenti emissioni di rumore, si ripete la valutazione per ogni ciclo e si compongono i livelli risultanti con una media logaritmica pesata sulla durata dei singoli cicli. Il calcolo viene in genere condotto per bande di ottava, non avendo senso una risoluzione superiore a fronte dell'incertezza complessiva dei modelli, ricostruendo alla fine il livello sonoro globale ponderato A.

### 3. Classificazione dei modelli di previsione

I più diffusi modelli di previsione in ambiente di lavoro possono essere ricondotti a tre categorie fondamentali, in ordine di complessità crescente, come da tabella 1. Con il termine arredi si intendono macchinari, prodotti in lavorazione, banchi e scaffali, ecc..

Tabella 1 - Categorie dei modelli di previsione del rumore in ambiente di lavoro.

CATEGORIA MODELLO	FORMA LOCALE	DISTRIBUZIONE ARREDI	ASSORBIMENTO ACUSTICO
Campo semidiffuso (cfr. punto 4)	regolare	uniforme	uniformemente distribuito e non elevato
Campo non diffuso (cfr. punto 5)	con simmetrie (locali bassi e vasti)	uniforme	prevalente a soffitto
Simulazione numerica (cfr. punto 6)	qualunque	qualunque	qualunque

Si noti che questa classificazione è differente da quella proposta nella UNI EN ISO 11690-3 [28], che non considera i modelli per campo non diffuso (qui trattati al seguente punto 5) e suddivide invece i modelli per simulazione numerica in tre sottocategorie che, a parere di chi scrive, trovano scarso riscontro nella pratica.

Per trattare in maniera unitaria i vari modelli, conviene scrivere l'espressione del livello di pressione sonora al ricevitore, dovuto ad una sorgente puntiforme, come:

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

dove:  $L_w$  è il livello di potenza sonora della sorgente [dB];

$Q$  è la direttività sonora della sorgente ( $Q = 1$  per una sorgente omnidirezionale sospesa nello spazio;  $Q = 2$  se questa viene posta su di un piano riflettente;  $Q = 4$  se questa viene posta all'intersezione di due piani riflettenti;  $Q = 8$  se questa viene posta all'intersezione di tre piani riflettenti);

$r$  è la distanza tra sorgente e ricevitore [m];  
 $K$  è il fattore di correzione ambientale [dB].

$K$  è indicato con  $K_2$  nelle norme della serie UNI EN ISO 3740 [28] e con  $DL_f$  nelle norme UNI EN ISO 14257 [35] e serie UNI EN ISO 11690 [26-28].

In campo libero  $K = 0$ .

Si sottintende, qui e nel seguito, la dipendenza dalla frequenza del suono.

Nel caso di più sorgenti puntiformi, si calcolano i rispettivi contributi uno per volta e si sommano energeticamente i risultati.

La (2) scompone il livello al ricevitore in tre contributi:

1. la potenza sonora della sorgente, invariante per propagazione;
2. la divergenza geometrica, crescente con la distanza;
3. il fattore di correzione ambientale  $K$ , funzione delle caratteristiche dell'ambiente (arredi, assorbimento acustico di superfici ed oggetti presenti, ecc.), della distanza tra sorgente e ricevitore e della frequenza.

I vari modelli trattati nel seguito si differenziano sostanzialmente per l'espressione di  $K$ ; in quelli di origine empirica può anche essere modificata l'intera l'espressione (2).

#### 4. Teoria del campo semidiffuso

Si dice che il campo sonoro è diffuso (o riverberante) quando all'interno dell'ambiente considerato le onde sonore provengono con uguale probabilità ed ampiezza da tutte le direzioni. La prima teoria degli ambienti chiusi dell'acustica moderna, proposta da Sabine circa un secolo fa per studiare sale per conferenze e concerti, ipotizza che il campo sonoro si possa considerare diffuso quando forma, disposizione ed assorbimento acustico delle superfici e degli arredi sono regolari ed uniformi; inoltre l'assorbimento acustico non deve essere troppo elevato. Ne consegue che il livello di pressione sonora risulta uniforme all'interno dell'ambiente [3].

Allentando appena queste drastiche ipotesi per considerare le onde sonore dirette che vanno dalla sorgente al ricevitore senza toccare le pareti, si ottiene l'approssimazione del campo semidiffuso (o semiriverberante), secondo la quale vale la (2) con:

$$(3) \quad K = 10 \lg \left( 1 + \frac{16\pi r^2}{QA} \right) \quad [\text{dB}]$$

dove:  $A = \bar{\alpha} S$  è area di assorbimento acustico equivalente dell'ambiente, in  $\text{m}^2$ ;

$\bar{\alpha}$  è il coefficiente di assorbimento acustico medio nell'ambiente;

$S$  è la superficie totale dell'ambiente, in  $\text{m}^2$ .

Si deve comunque rimanere sufficientemente lontano dalle pareti e dagli arredi per evitare effetti di campo vicino. In pratica il calcolo può essere condotto in forma tabulare (si veda l'esempio di tabella 2). A fronte di una grande semplicità, il metodo presenta però notevoli margini di incertezza. Ciò ne rende sconsigliabile l'utilizzo tranne che per indagini preliminari in ambienti che soddisfano le restrittive ipotesi citate.

Tabella 2 - Esempio di calcolo secondo la teoria del campo semidiffuso.

Ambiente parallelepipedo, 1 macchina a 10 m dal posto di lavoro							
Volume $V = L \times W \times H = 20 \times 10 \times 5 \text{ m} = 1000 \text{ m}^3$							
Superficie totale $S = 2 \times (L \times W + L \times H + W \times H) = 700 \text{ m}^2$							
		Bande d'ottava, Hz					
Grandezza	Unità	125	250	500	1000	2000	4000
$\alpha$		0,05	0,10	0,15	0,20	0,25	0,30
$A$	$\text{m}^2$	35	70	105	140	175	210
$K$	dB	19	16	14	13	12	11
$10 \lg(Q/4\pi r^2)$	dB	-28	-28	-28	-28	-28	-28
$L_W$	dB	90	100	95	95	110	80
$L_p$	dB	81	88	81	80	94	63

## 5. Teorie del campo non diffuso per ambienti bassi e vasti

Se la forma dell'ambiente è irregolare o non proporzionata, oppure l'assorbimento acustico è distribuito in modo non uniforme o è elevato, la teoria del campo semidiffuso perde di validità. In molti casi però la distribuzione di arredi ed assorbimento acustico è simile in diverse parti del locale (per esempio soffitto assorbente e pavimento riflettente); si può quindi cercare di caratterizzare l'ambiente con una curva di decadimento spaziale del livello di pressione sonora. Questa può essere misurata secondo UNI EN ISO 14257 [35] oppure calcolata con modelli specifici, come quelli presentati qui di seguito. Scelta la posizione del ricevitore, applicando la curva di decadimento spaziale del suono a partire da ogni singola sorgente presente si trova il contributo di quella sorgente al livello sonoro al ricevitore; sommando energeticamente i contributi delle varie sorgenti, si trova il livello di pressione sonora totale.

In particolare, sono importanti gli ambienti bassi e vasti, che costituiscono una delle tipologie più diffuse in ambito industriale. Un ambiente si considera "basso" quando una dimensione del locale è molto inferiore alle altre due (tipicamente l'altezza è minore di un terzo della lunghezza).

### 5.1 Teoria di Bianchi

All'inizio degli anni '70 Bianchi [4] sviluppò una teoria per gli ambienti bassi e vasti, basata sulla propagazione di onde cilindriche e sull'ipotesi che la dissipazione energetica sia dovuta unicamente alle superfici del soffitto e del pavimento. Rielaborando la teoria di Bianchi in una formulazione conforme alla (2), si ottiene:

$$(4) \quad K = 3 + 10 \lg \left( \frac{r}{H} \right) - 8,6 \alpha_m \frac{r}{H} \quad , \quad (r > H) \quad [\text{dB}]$$

dove:  $H$  è l'altezza libera del locale, in m;

$\alpha_m$  è il coefficiente di assorbimento acustico medio tra pavimento e soffitto.

Secondo Bianchi dunque, accanto alla divergenza geometrica delle onde sferiche compare un analogo termine per onde cilindriche; a questi si somma un contributo do-

vuto alla dissipazione energetica tra pavimento e soffitto, che permette di realizzare ad una certa distanza dalla sorgente abbattimenti molto superiori a quelli previsti dalla teoria del campo semidiffuso.

Rimane la difficoltà di stimare l'effettivo coefficiente di assorbimento acustico di pavimento e soffitto da impiegare nella (4), dal momento che, per le ipotesi della teoria, le onde sonore incidono su tali superfici prevalentemente in maniera obliqua, mentre i valori reperibili in letteratura sono misurati in camera riverberante (campo diffuso) o nel tubo ad impedenza (campo frontale) e dunque sono diversi.

### 5.2 Formula empirica di Farina e Fornari

Alla fine degli anni '90 Farina e Fornari [5], sulla base di rilievi sperimentali e simulazioni numeriche, hanno individuato nella determinazione del volume ridotto dagli arredi il fattore chiave per giungere ad una diversa espressione del fattore di correzione ambientale  $K$  che compare nella (2):

$$(5) \quad K = 10 \lg \left[ 1 + \frac{100\pi r^2 T}{Q(10H^3 Q + 2\pi r^2 H)} \right] \quad [\text{dB}]$$

dove  $T$  è il tempo di riverberazione dell'ambiente, in s. La formula si adatta abbastanza bene ai casi campione studiati dagli autori, anche se risente di una incongruenza teorica: infatti, in un ambiente dove il campo sonoro non è diffuso il tempo di riverberazione varia in funzione della posizione; non è quindi chiaro quale valore di  $T$  usare nella (5).

### 5.3 Formula empirica di Hodgson

Sin dalla fine degli anni '80 Hodgson ha sviluppato una serie di modelli empirici sulla base di rilievi sperimentali in locali industriali del Nord America. L'approccio del ricercatore canadese prevede l'uso della grandezza densità degli arredi, definita come:

$$(6) \quad q_f = \frac{S_f}{4V} \quad [\text{m}^{-1}]$$

dove:  $S_f$  è la superficie totale degli arredi [ $\text{m}^2$ ];  
 $V$  è il volume dell'ambiente [ $\text{m}^3$ ].

La grandezza  $q_f$  è piuttosto difficile da stimare, per cui Hodgson fornisce formule empiriche o tabelle per valutarla, seppur con una certa approssimazione. Non ostante questa difficoltà la grandezza è ripresa con enfasi nella UNI EN ISO 11690-3 [28], che la rinomina impropriamente "massa volumica degli arredi" ma non fornisce nessun metodo per valutarla.

A titolo d'esempio si riporta la struttura della più recente formula di Hodgson [6]:

$$(7) \quad L_p = L_w + i + s \lg(r) \quad [\text{dB}]$$

$$(8) \quad \begin{aligned} i = & C_{i0} + C_{i1}\alpha_{eff} + C_{i2}H + C_{i3}\lg(H) + C_{i4}q_f + \\ & + C_{i5}\frac{h_f}{H} + C_{i6}\frac{S}{V} + C_{i7}V + C_{i8}S + C_{i9}\alpha_{eff}LW \end{aligned} \quad [\text{dB}]$$

$$(9) \quad \begin{aligned} s = & C_{s0} + C_{s1}\alpha_{tot} + C_{s2}H + C_{s3}\lg(H) + C_{s4}\frac{1}{q_f} + \\ & + C_{s5}\frac{h_f}{H} + C_{s6}\frac{S}{V} \end{aligned} \quad [\text{dB}]$$

dove:  $\alpha_{eff}$  è il coefficiente di assorbimento acustico effettivo del pavimento comprensivo degli arredi;

$\alpha_{tot}$  è il coefficiente di assorbimento acustico totale nell'ambiente;

$h_f$  è l'altezza media degli arredi [m];

$L$  è la lunghezza dell'ambiente [m];

$W$  è la larghezza dell'ambiente [m].

I vari coefficienti  $C$  sono tabulati per bande di ottava da 125 Hz a 4 kHz, come pure dei valori di riferimento per calcolare le altre grandezze  $\alpha_{eff}$ ,  $\alpha_{tot}$ ,  $S_f$ , ecc. [6].

Secondo Hodgson [7] la sua formulazione darebbe uno scostamento medio di 2 B dalle previsioni di un programma di *ray tracing* per locali bassi e vasti.

#### 5.4 Confronto tra formule per campo non diffuso

La figura 1 mette a confronto su un esempio specifico i risultati previsti dalla teoria del campo semidiffuso, dalla teoria di Bianchi, dalla formula di Farina-Fornari e dalla formula di Hodgson in un ambiente basso e vasto con soffitto assorbente. Si osservi che:

- secondo la teoria del campo semidiffuso il livello di pressione sonora tende ad un valore asintotico a partire da distanze dell'ordine di 15-20 m dalla sorgente, indipendentemente dalle particolarità dell'ambiente;
- secondo la teoria di Bianchi si possono ottenere decadimenti molto forti e progressivi a partire da distanze dell'ordine di 15-20 m dalla sorgente, con trattamenti a soffitto molto assorbenti e di bassa altezza libera;
- secondo la formulazione di Farina e Fornari a distanze medie (5-20 m dalla sorgente) il campo sonoro è più energetico di quanto previsto dalla teoria del campo semiriverberante, mentre a distanze superiori ai 30-35 m è meno energetico; ciò consente di ottenere forti abbattimenti a media distanza concentrando qui il materiale fonoassorbente per dissipare l'energia "in eccesso", in sostanziale accordo con la teoria di Bianchi;
- secondo la formulazione di Hodgson non si ottengono previsioni valide a breve distanza (0-2 m dalla sorgente); a distanze medie (5-30 m dalla sorgente) la previsione è intermedia tra quella di Bianchi e quella di Farina-Fornari, purché l'operatore sia così esperto da centrare i valori di tutti i parametri necessari; a distanze superiori a 50 m circa dalla sorgente il livello sonoro previsto tende a diventare sovrastimato, perché la formulazione non ammette cambi di pendenza della curva di regressione, ma qui si è ormai vicini al limite superiore di validità delle formule utilizzate.

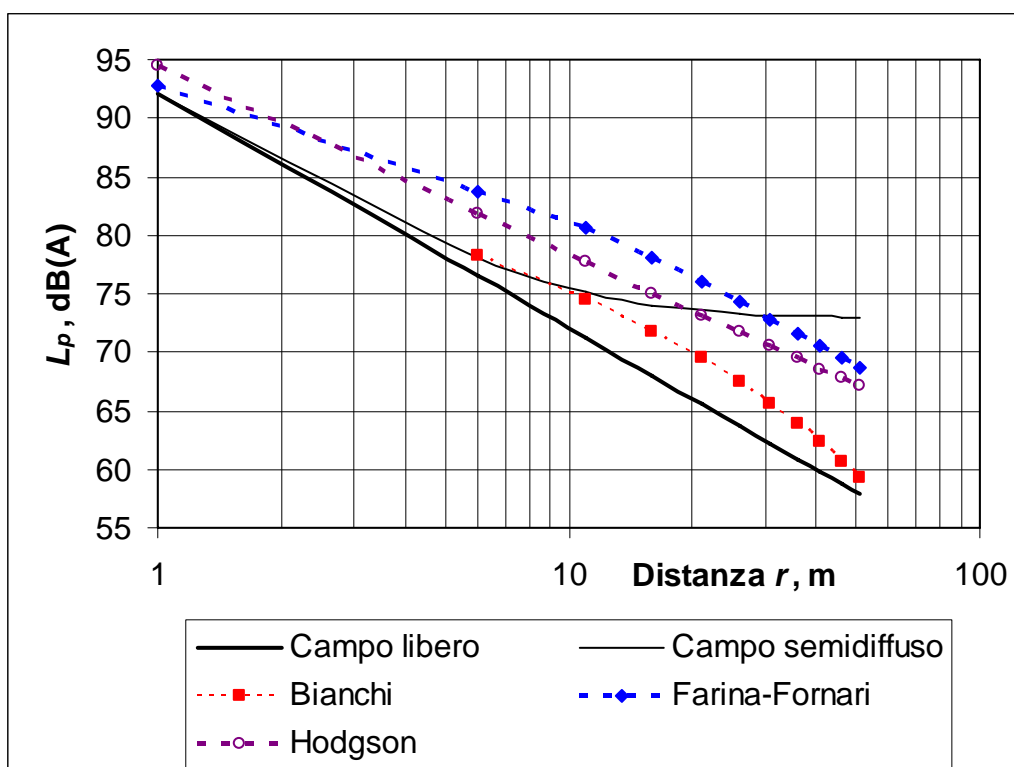


Figura 1 - Curve di decadimento spaziale del livello di pressione sonora in funzione della distanza dalla sorgente per un ambiente con volume di  $30'000 \text{ m}^3$ , altezza libera 6 m, pavimento riflettente e soffitto assorbente, densità degli arredi  $0,03 \text{ m}^{-1}$ .

## 6. Simulazione numerica al computer

Se la forma dell'ambiente, la distribuzione degli arredi e dell'assorbimento acustico sono diversi da una parte all'altra dell'ambiente, diviene preferibile ricorrere alla simulazione numerica al computer. I modelli implementati dai programmi per computer oggi utilizzati fanno tutti riferimento all'approssimazione dell'acustica geometrica. Infatti, molti fenomeni legati alla natura ondulatoria del suono, quali l'interferenza o la diffrazione, sovente non condizionano in maniera determinante il risultato, ed è così possibile studiare il campo acustico secondo semplici leggi geometriche. L'approssimazione è valida nel caso limite in cui la lunghezza d'onda del suono ha dimensioni trascurabili rispetto agli elementi costituenti l'ambiente circostante, ovvero nel limite delle alte frequenze. Si presenta qui di seguito un breve excursus sui principali metodi di simulazione geometrica al computer, in buona parte ripreso dal riferimento [8].

### 6.1 Metodo delle sorgenti virtuali

Come noto, nell'ambito dell'ottica geometrica la riflessione della luce su di uno specchio viene trattata immaginando che il raggio riflesso provenga da una sorgente fittizia posta dietro lo specchio, detta *immagine virtuale* della sorgente reale. Questo artificio si può estendere all'acustica degli ambienti chiusi nel caso che valgano le leggi dell'approssimazione geometrica, con le superfici di contorno dell'ambiente grandi e li-

sce rispetto alle lunghezze d'onda in gioco. Allora una qualsiasi onda sonora riflessa da una superficie si può pensare come proveniente dall'immagine virtuale, posta "dietro la superficie", della sorgente reale e quindi in definitiva essere considerata a sua volta come un'onda diretta, originata da una sorgente fittizia [8]. Tale meccanismo si può estendere senza difficoltà alle riflessioni successive alla prima: è sufficiente considerare come nuova sorgente reale la sorgente virtuale della riflessione precedente (figura 2).

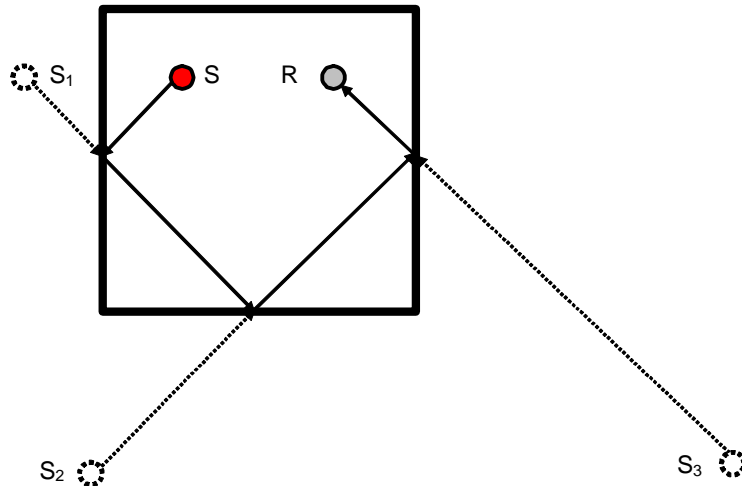


Figura 2 - Esempio di ricostruzione di una sorgente virtuale del terzo ordine. S: sorgente; R: ricevitore; S<sub>i</sub>: sorgente virtuale dell'i-esimo ordine.

Su questa interpretazione del fenomeno della riflessione delle onde, o meglio dei raggi sonori, si basa la tecnica detta delle sorgenti virtuali, le cui ipotesi di base sono:

1. valgono le approssimazioni dell'acustica geometrica;
2. sulle superfici di contorno, il suono si riflette specularmente;
3. ad ogni riflessione speculare è associata una sorgente virtuale che si comporta in emissione come la sorgente reale dalla quale è originata;
4. ogni sorgente, reale o virtuale, emette fronti d'onda sferici;
5. la propagazione dei fronti d'onda sferici è descrivibile mediante raggi sonori che vanno dalla sorgente, reale o virtuale, al ricevitore;
6. la potenza sonora che giunge ad un ricevitore è pari a quella emessa dalla sorgente, reale o virtuale, diminuita per effetto: a) della divergenza geometrica (vedi ipotesi 4); b) dell'assorbimento delle superfici di confine attraversate dal raggio associato; c) dell'attenuazione del suono nell'aria.

In pratica, per la ricerca delle sorgenti virtuali (ipotesi 1, 2 e 3) le superfici di contorno dell'ambiente vengono schematizzate attraverso un numero finito di superfici piane, dette genericamente "pareti". Per calcolare il modulo dell'intensità sonora ricevuta in un punto si parte dalla nota legge (ipotesi 4 e 6.a):

$$(10) \quad I = \frac{WQ}{4\pi r^2} \quad [\text{Wm}^{-2}]$$

dove:  $W$  è la potenza sonora della sorgente reale [ $\text{W}/\text{m}^2$ ];

$Q$  è la direttività della sorgente sonora;

$r$  la distanza fra la sorgente, reale o virtuale, e il ricevitore, ovvero la lunghezza del percorso dell'associato raggio sonoro (ipotesi 5) [m].

Occorre poi diminuire la potenza inizialmente emessa dalla sorgente reale della quota che ad ogni riflessione va persa per assorbimento da parte della parete (ipotesi 6.b): se la  $k$ -esima parete ha coefficiente di assorbimento acustico apparente  $\alpha_k$ , essa riflette una quota energetica pari a  $(1-\alpha_k)$ . Inoltre, è importante, soprattutto nei grandi ambienti, tenere conto anche dell'energia persa per assorbimento nell'aria (ipotesi 6.c), introducendo un fattore esponenziale funzione dell'attenuazione dell'aria  $m_a$  e della distanza  $r$ . Dunque:

$$(11) \quad I = e^{-m_a r} \frac{WQ}{4\pi r^2} (1 - \alpha_k) \quad [\text{Wm}^{-2}]$$

Per i raggi che colpiscono più di una parete prima di raggiungere il ricevitore, che sono la maggior parte, si aggiungono alla (11) tanti fattori  $(1-\alpha_k)$  quante sono le pareti colpite. Per ogni punto di ricezione vanno poi sommate le quote energetiche (11) provenienti da tutte le sorgenti virtuali, e la somma va ripetuta per tutte le  $N_0$  sorgenti reali presenti. La somma sulle sorgenti virtuali va estesa fino al massimo ordine di riflessioni considerato,  $L_0$ , che teoricamente tende all'infinito; in realtà i termini della somma divengono sempre più piccoli all'aumentare dell'ordine delle riflessioni e quindi la sommatoria converge ad un valore finito. In pratica, la ricerca delle sorgenti virtuali continua finché non risulta soddisfatto uno dei criteri di estinzione seguenti:

1. l'ordine di riflessione della sorgente virtuale ha raggiunto un valore massimo prefissato,  $L_0$ ;
2. il modulo dell'intensità sonora residua nel più vicino punto di ricezione ha raggiunto un valore minimo prefissato,  $I_\epsilon$ .

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

- la densità di energia sonora complessiva in regime stazionario;
- il livello sonoro in funzione della posizione e del tempo;
- l'intensità sonora proveniente da una data direzione in funzione della posizione e del tempo;
- i tempi di ritardo e le direzioni di arrivo delle singole riflessioni.

Le informazioni specificate nei primi due punti permettono di ottenere tutti i risultati forniti dalla teoria del campo semidiffuso. Le informazioni specificate negli altri due punti permettono di ricostruire con un buon grado di dettaglio gli ecogrammi, dai quali ricavare tutti principali i descrittori acustici.

Il fenomeno della riflessione diffusa può essere approssimato nell'ambito del metodo delle sorgenti virtuali imponendo che ogni raggio incidente sia riflesso ad un angolo determinato secondo una assegnata legge di probabilità. In pratica, si considerano spesso i due casi limite della riflessione speculare (probabilità unitaria per un angolo di riflessione pari a quello d'incidenza e zero altrove), per le prime riflessioni, e della diffu-

sione uniforme (distribuzione di probabilità uniforme per ogni angolo), per le riflessioni di ordine superiore.

L'algoritmo di calcolo deve eseguire, per ogni sorgente, ogni ricevitore, ogni superficie ed ogni ordine di riflessione due *test* di visibilità per controllare che il punto di riflessione appartenga alla superficie di riflessione e che il raggio non sia interrotto da una superficie non coinvolta nella riflessione.

## 6.2 Metodo del *ray tracing*

Questo metodo deve il suo nome alla schematizzazione adottata nei riguardi della propagazione dell'energia sonora: anziché disperdersi su fronti d'onda sferici, come nel caso delle sorgenti virtuali, si ammette che l'energia sonora si propaghi nello spazio frazionata lungo traiettorie rettilinee o raggi sonori [9,10]. Le ipotesi di base sono:

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

Ogni sorgente viene caratterizzata dalla potenza sonora emessa e dal fattore di direttività; nel caso del *ray tracing* ciò si traduce nella scelta del numero di raggi e della potenza e della direzione associate a ciascuno di essi. La generazione dei raggi può avvenire secondo due diverse modalità [10], rappresentate in figura 3:

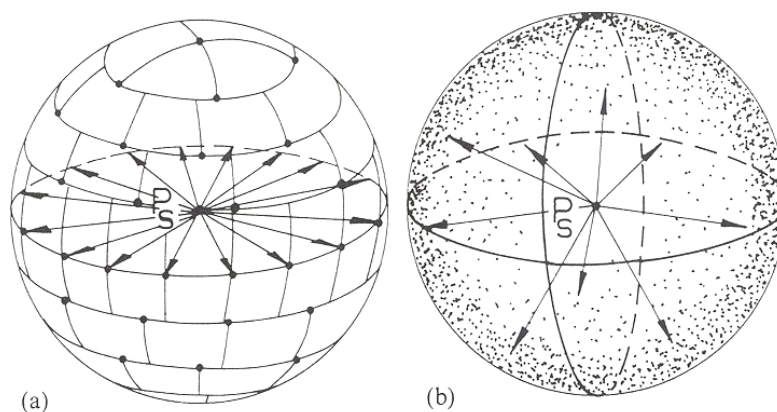


Figura 3 - Metodi di generazione dei raggi sonori; (a) deterministico; (b) statistico; la sorgente è posizionata in  $P_S$  [10].

- deterministica: centrata nella posizione della sorgente una sfera unitaria, le direzioni di emissione sono individuate dai vettori posizione di punti appartenenti alla superficie sferica; i vettori sono scelti secondo una regola geometrica di partizione;
- statistica: i vettori direzionali sono orientati in base ad una coppia di numeri casuali in modo da assicurare l'uniforme copertura, in senso statistico, della superficie della sfera unitaria.

La potenza sonora assegnata in origine a ciascun raggio sonoro è uguale al prodotto della potenza  $W$  e del fattore di direttività  $Q$  della sorgente, divisi per il numero totale di raggi  $J_0$ .

I ricevitori non possono più essere puntiformi, poiché altrimenti la probabilità di intercettazione di un raggio da parte di un punto sarebbe nulla, e vengono quindi rappresentati da volumi finiti corrispondenti alla zona di sensibilità dei ricevitori stessi. In genere vengono scelte sfere di opportuno diametro, perché l'area efficace del ricevitore, vista da una qualunque direzione di incidenza, è la stessa [11]. Ogni qual volta un raggio interseca una sfera ricevente le comunica una certa quota di potenza sonora, proporzionale alla lunghezza del segmento di raggio intersecato. Altre volte si assume semplicemente che tutta l'energia posseduta dal raggio si trasmetta al ricevitore. Il diametro delle sfere va quindi scelto con oculatazza.

La potenza sonora che raggiunge l' $m$ -esimo ricevitore viene determinata in successivi intervalli di tempo come somma di un gran numero di piccole quantità di potenza trasportate dai raggi che intercettano la relativa sfera di sensibilità. Per esemplificare: il  $j$ -esimo raggio ha potenza iniziale  $WQ/J_0$ ; questa viene diminuita di una quota energetica  $(1-\alpha_k)$  ad ogni riflessione su di una parete e di una quota dovuta all'assorbimento dell'aria, funzione esponenziale della distanza percorsa  $r_j$  (cfr. formula (11)), fino ad attraversare una sfera ricevente di diametro  $D_m$  per un tratto  $d_{jm}$ ; allora:

$$(12) \quad W_{jm} = \frac{d_{jm}}{D_m} \left( \frac{WQ}{J_0} \right) e^{-m_a r_j} (1-\alpha_0)(1-\alpha_1) \cdots (1-\alpha_{L_j}) \quad [\text{Wm}^{-2}]$$

dove  $L_j$  è l'ordine massimo di riflessione per il  $j$ -esimo raggio.

Per ciascun ricevitore, dividendo l'energia complessiva captata per il volume della sfera, si calcola la densità di energia sonora e da essa il livello di pressione sonora [8,9].

Affinché i risultati siano statisticamente stabili, è necessario lanciare moltissimi raggi, in modo che mediamente essi abbiano nell'ambiente una densità sufficientemente elevata e coprano tutte le possibili direzioni; ciò si verifica quando, pur aumentando ulteriormente il numero dei raggi emessi dalla sorgente, non si manifestano apprezzabili variazioni dei risultati. Pertanto la precisione del metodo cresce con il numero di raggi lanciati, così come il tempo di calcolo. In pratica, la storia di ogni raggio continua finché non risulta soddisfatto uno dei criteri di estinzione seguenti:

1. la potenza sonora residua del raggio ha raggiunto un valore minimo prefissato,  $W_e$ ;
2. l'ordine di riflessione del raggio ha raggiunto un valore massimo prefissato,  $L_0$ ;
3. la lunghezza del percorso del raggio ha raggiunto un valore massimo prefissato,  $R_0$ ;
4. il tempo di volo del raggio ha raggiunto un valore massimo prefissato,  $T_0$ .

Le informazioni ottenibili sono le stesse fornite dal modello delle sorgenti virtuali; l'obiettivo fondamentale rimane sempre quello di ricostruire in un determinato numero di punti le risposte dell'ambiente, dalle quali poi calcolare i valori dei vari descrittori

acustici. L'applicazione diretta della legge della diffusione uniforme al *ray tracing* comporterebbe di rimandare contemporaneamente dal punto di riflessione una nuvola di raggi, ciascuno con un proprio contributo energetico, e risulterebbe quindi impraticabile in quanto ad aumento del tempo di calcolo. Pertanto, l'approssimazione più comune consiste nel rimandare un solo raggio, scelto - in termini energetici e di direzione - secondo criteri di tipo statistico; in questo modo si rischia tuttavia di non riuscire a ricreare un campo uniformemente diffuso se il numero di raggi lanciati non è sufficientemente elevato.

Anche il tipico algoritmo di *ray tracing* deve eseguire, per ogni raggio, ogni superficie ed ogni ordine di riflessione dei *test* di visibilità.

Alcune implementazioni del *ray tracing* particolarmente orientate all'ambiente di lavoro permettono poi di introdurre una distribuzione statistica di "punti di diffusione del suono" che simula l'effetto degli arredi [12].

### 6.3 Confronto tra sorgenti virtuali e *ray tracing*

Nel metodo delle sorgenti virtuali, date le posizioni della sorgente e del ricevitore, e definite le superfici di contorno dell'ambiente, non è detto che tutte le sorgenti virtuali costruite siano in grado di superare i *test* di visibilità. Il problema è tanto maggiore quanto più la forma dell'ambiente è irregolare; per esempio, è molto facile che un raggio sonoro colpisca il piano di una superficie al di fuori del contorno della stessa. Pertanto, dopo aver generato un elevatissimo numero di sorgenti virtuali, bisogna provvedere alla verifica di quelle effettivamente "viste" dal ricevitore ed a questo vaglio sopravvive un numero molto esiguo di sorgenti. In termini di tempo di calcolo è proprio la procedura di controllo all'indietro delle sorgenti costruite quella che maggiormente impegna l'elaboratore. Dunque, il metodo delle sorgenti virtuali è caratterizzato da un'inefficienza di fondo, in quanto dapprima costruisce tutte le potenziali sorgenti, per ordini di riflessione successivi, secondo un procedimento che percorre dalla radice alle foglie tutti i rami dell' "albero logico" delle sorgenti virtuali, poi, a causa dei *test* di visibilità, ripercorre l'albero in senso opposto, riprendendo da capo il processo ogni qual volta incorre in un ramo morto (sorgente scartata), finché rimangono selezionati tutti e soli i percorsi effettivi ricevitore-sorgente virtuale. Questo spiega perché in pratica non si arrivi mai a previsioni che tengano conto di più di cinque-sei ordini di riflessione. Se lo scopo è quello di valutare semplicemente il livello sonoro, è probabile che essi siano sufficienti; se invece si mira alla ricostruzione in dettaglio dell'intera coda sonora, ad esempio per stimare da essa il tempo di riverberazione, è evidente che occorre seguire i raggi sonori per un tempo anche di alcuni secondi dopo l'onda diretta, arrivando a tempi di calcolo improponibili. Per questo motivo il tradizionale algoritmo delle sorgenti virtuali puro si mostra utile solo nei casi seguenti:

- ecogrammi molto brevi e ad elevata risoluzione temporale;
- numero minimo di pareti;
- ambienti a forma parallelepipedica, per i quali si possono omettere i test di visibilità, grazie a semplici leggi per la costruzione delle sorgenti stesse.

Nel metodo del *ray tracing*, invece, ogni raggio percorre una sola volta l'albero logico, dalla radice alle foglie e secondo l'esatta sequenza di riflessioni, eliminando quindi a priori la possibilità di incorrere nei rami morti. Secondo Stephenson [11] per il *ray tracing* classico il tempo di calcolo globale è sostanzialmente proporzionale al prodotto  $J_0L_0$  del numero di raggi emessi per l'ordine massimo di riflessione; dunque il tempo impiegato per terminare l'algoritmo non diviene mai così alto come per le sorgenti virtuali, relativamente allo stesso ambiente ed a parità di precisione nel calcolo. Emerge

dunque una caratteristica chiave del metodo del *ray tracing*, e cioè il rapporto costante fra la lunghezza temporale delle risposte desiderate (ecogrammi) ed i tempi di calcolo, per cui questi ultimi risultano effettivamente gestibili con i mezzi attualmente a disposizione. Chiaramente poi risposte molto lunghe (alcuni secondi) verranno studiate con minore precisione, mentre risposte più corte (per esempio 400 ms) verranno valutate con grande dettaglio; il criterio di decisione dipende dallo scopo della simulazione, che può essere lo studio dettagliato della caratteristica temporale del campo acustico o la semplice valutazione del livello sonoro complessivo. D'altro canto, il metodo del *ray tracing* mostra i propri limiti nella mancanza di una regola precisa per la determinazione sia del numero di raggi da tracciare, che delle dimensioni dei ricevitori; in un ambiente fortemente irregolare può accadere che variando tali parametri si giunga a risultati anche molto diversi tra loro. La determinazione delle dimensioni dei ricevitori è critica perché:

- dimensioni elevate comportano la captazione di una alta percentuale di raggi, ma anche una scarsa rappresentatività della situazione reale, nonché il rischio di coprire alcuni dei ricevitori distanti dalla sorgente, che vengono a trovarsi nel cono d'ombra generato da altri più vicini alla sorgente;
- dimensioni troppo ridotte dei ricevitori, comportano la captazione di un numero di raggi troppo ridotto per convergere ad un risultato affidabile, oltre al rischio di perdere delle informazioni perché qualche ricevitore viene a trovarsi fra due raggi senza captarli.

La risoluzione di uno dei due problemi comporta un aggravio dell'altro, per cui si rende necessaria la scelta di valori di compromesso determinati caso per caso. Comunque, indipendentemente dalla loro forma, ricevitori di dimensioni finite sono generalmente causa, in approssimazione geometrica, di errori sistematici dovuti a [13]:

- captazione multipla (figura 4): il numero di raggi captati è fondamentalmente legato alla posizione reciproca di sorgente e ricevitore e alla lunghezza del cammino percorso dai raggi;
- captazione variabile (figura 5): a causa delle dimensioni finite del ricevitore, con la stessa densità di raggi e lo stesso ricevitore, un leggero spostamento di quest'ultimo può provocare una notevole variazione dell'energia captata;
- captazione geometricamente non valida (figura 6).

Si possono minimizzare questi errori adottando ricevitori sferici con raggio di Lehnert [13]  $r_m$  dato da:

$$(13) \quad r_m = R_0 \sqrt{\frac{2\pi}{J_0}} \quad [\text{m}]$$

che, per una densità costante di raggi sull'angolo solido di emissione, garantisce una percentuale di captazione che supera il 99%, rispetto al caso ideale in cui il raggio del ricevitore tende all'infinito, a parità di cammino massimo per l'estinzione  $R_0$  e numero di raggi  $J_0$ . Un'alternativa potrebbe essere quella di utilizzare dei ricevitori sferici a raggio variabile, le cui dimensioni vengono direttamente modificate, all'interno del programma di *ray tracing*, in relazione all'aumentare della lunghezza del cammino percorso dai raggi sonori.

In sintesi, se si assumono come parametri significativi il tempo di calcolo globale e la precisione raggiungibile nei risultati, il metodo delle sorgenti virtuali si mostra più

veloce solo quando il numero di riflessioni è minimo ed è accettabile una precisione di  $\pm 2$  dB. Per un elevato numero di pareti e/o di riflessioni e per valori di assorbimento acustico non troppo elevati, sicuramente è più conveniente utilizzare il *ray tracing*, che permette di associare dei tempi di calcolo ragionevoli a dei buoni livelli di precisione.

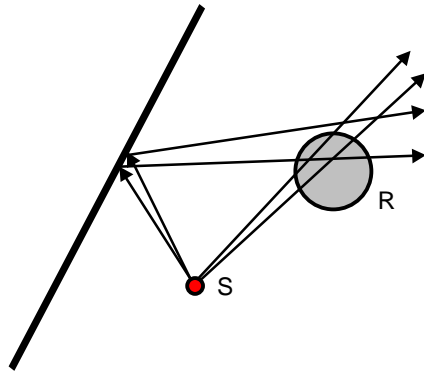


Figura 4 - Esempio di captazione multipla dei raggi diretti ma non di quelli riflessi.

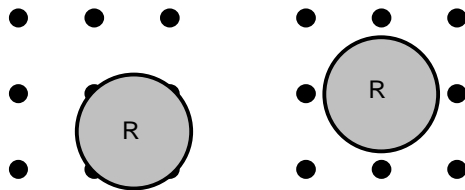


Figura 5 - Esempio di captazione variabile: dato un fascio uniformemente distribuito di raggi sonori (schematizzati in sezione come punti), il ricevitore R ne intercetta un numero variabile in funzione di un leggero spostamento.

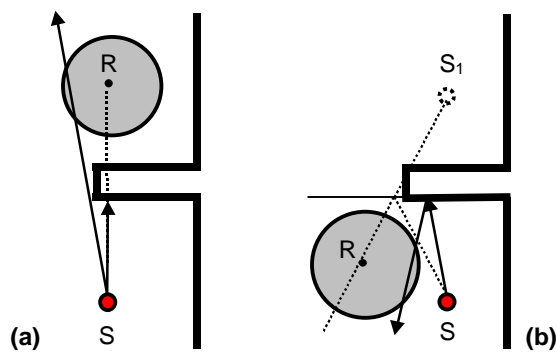


Figura 6 - Esempio di captazione geometricamente non valida; S, sorgente; R, ricevitore; (a) la sorgente è schermata; (b) il vero punto di riflessione non giace entro i bordi della superficie.

## 6.4 Modelli ibridi

Alla luce di quanto detto sopra, la tendenza prevalente nella letteratura scientifica è stata quella di fondere i modelli classici a sorgenti virtuali e *ray tracing*. Per primo Vorländer [14] ha proposto, invece dei soliti onerosi *test* di visibilità, un'indagine sulla reale sequenza di riflessioni di ogni raggio mediante l'ausilio del *ray tracing*: semplicemente si tratta di prendere nota dell'ordine con cui le superfici di riflessione sono state investite dal raggio, per cui risulta immediata la ricostruzione dell'esatta sequenza delle sorgenti virtuali interessate. In seguito, il *ray tracing* viene abbandonato e per la valutazione della risposta dell'ambiente si considera separatamente il contributo delle varie sorgenti immagine. Per i ricevitori, Vorländer [14] utilizza delle sfere, come nel *ray tracing*, che chiaramente sono in grado di intercettare un maggior numero di raggi, dei quali però solo una minima parte passa effettivamente per il centro del ricevitore. Per raggiungere allora una elevata precisione è necessaria una procedura di controllo all'indietro, simile ai *test* di visibilità del modello a sorgenti virtuali classico, che permette di verificare quali raggi effettivamente colpiscono il centro della sfera. Non si tratta comunque di una procedura onerosa come quella relativa al modello classico, che prende in considerazione tutte le sorgenti virtuali potenziali, in quanto è necessario esaminare solo le sorgenti virtuali visibili.

Un passo decisivo è stato compiuto da Van Maercke e Martin [15], che hanno elaborato una procedura ibrida che media i caratteri deterministici del modello a sorgenti virtuali con quelli più tipicamente statistici del *ray tracing*. La principale peculiarità di questo metodo, che poi è quella che porta alla denominazione di *cone tracing*, consiste nel sostituire ai raggi sonori uniformemente distribuiti attorno alla sorgente, tipici del *ray tracing* classico, dei coni, o meglio dei fasci divergenti i cui assi coincidono con i raggi originari. Dopo ogni riflessione, il vertice del cono coincide con una sorgente virtuale associata alla relativa superficie, che fa parte della sequenza di quelle colpite dal raggio. Se un punto di ricezione cade all'interno di un cono tra due riflessioni successive, la corrispondente sorgente virtuale è potenzialmente visibile e deve essere presa in considerazione. Il metodo dei coni porta ad un netto miglioramento delle prestazioni, permettendo di eliminare le incertezze dovute al carattere statistico dei raggi, specialmente per le riflessioni di ordine elevato. Tuttavia, è noto che non è possibile riprodurre correttamente il modello di sorgente panoramica utilizzando coni circolari adiacenti. Il problema può essere risolto in tre maniere differenti, corrispondenti al tracciamento di coni (*cones*), di fasci (*beams*), o di piramidi (*pyramids*), come di seguito illustrato.

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

Il metodo dei fasci (*beams*) risolve il problema della sovrapposizione degli stessi mediante un'opportuna funzione di distribuzione (funzione peso) dell'energia associata al fronte del cono (figura 7).

In pratica, ogni raggio diviene l'asse di una sorgente elementare altamente direttiva. Van Maercke e Martin hanno utilizzato una funzione peso parametrica in modo tale che la sovrapposizione delle direttività di fasci adiacenti ricostruisca un fronte d'onda omnidirezionale con un fissato grado di *overlap*. Un raggio tradizionale è un caso limite di fascio con sezione tendente a zero. In questo modo non occorre memoria addizionale

perché le sorgenti virtuali visibili possono essere prese in considerazione non appena il corrispondente fascio intercetta un ricevitore: le individuazioni multiple sono compensate dalla funzione peso applicata ad ogni fascio. Anche la tecnica dei coni soffre degli errori di captazione già visti a proposito dei modelli a sorgenti virtuali e *ray tracing*, ma secondo Van Maercke e Martin essi sono da attribuire alla brusca transizione tra zone di visibilità e zone d'ombra. Il metodo dei fasci, con le sue funzioni peso, fornisce una transizione in qualche modo più graduale.

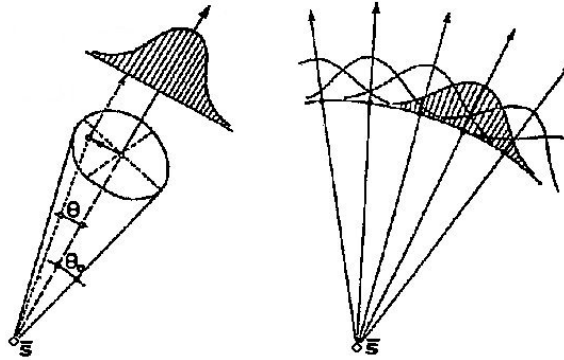


Figura 7 - Fasci con distribuzione gaussiana dell'energia e loro sovrapposizione [15].

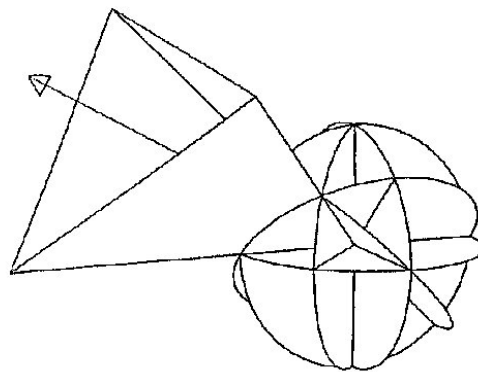


Figura 8 - Emissione di fasci piramidali divergenti da una sorgente omnidirezionale utilizzando l'algoritmo di Tenenbaum et al. [da 16].

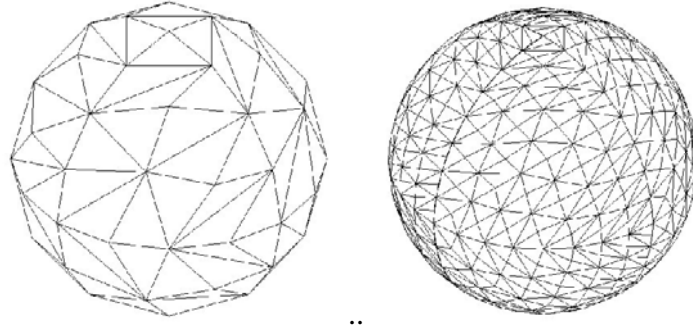


Figura 9 - Approssimazioni successive di una superficie sferica mediante triangoli.

Il metodo delle piramidi si basa sulla possibilità di suddividere esattamente una superficie sferica in triangoli curvilinei. Esistono più possibilità: per esempio Tenenbaum et al. [16] hanno suggerito di partire dagli ottanti della sfera e di procedere poi per bisezioni successive, come illustrato nella figura 8. Ciò rende possibile la generazione in maniera deterministica e senza sovrapposizione di coni che, avendo una base triangolare, sono più propriamente chiamati piramidi. Lewers [17] ha invece suggerito un diverso metodo basato su approssimazioni successive della superficie sferica mediante triangoli (figura 9). Poiché non si utilizzano funzioni peso e la traiettoria del fascio piramidale viene assimilata a quella dell'asse centrale dello stesso, anche per il *pyramid tracing* si ripresenta il problema delle sorgenti duplicate.

La tecnica dei fasci divergenti necessita sempre di una compensazione per le cosiddette immagini mancanti. Infatti, secondo la teoria delle sorgenti virtuali [19], il numero medio di captazioni per unità di tempo da parte di un generico ricevitore è:

$$(14) \quad n(t) = \frac{4\pi c^3 t^2}{V} \quad [\text{s}^{-1}]$$

essendo  $t$  il tempo trascorso dall'inizio della simulazione e  $V$  il volume dell'ambiente. Nel *ray tracing* classico, la progressiva divergenza tra i raggi porta a sottostimare questo valore, ma essa è mediamente compensata dalla mancata divergenza dell'energia trasportata da ogni raggio, e dalla conseguente sovrastima del contributo di ogni captazione. Con i fasci divergenti, invece, un numero progressivamente crescente di sorgenti virtuali non viene considerato, perché il loro riconoscimento si basa sempre e soltanto sulla storia dell'asse centrale del fascio, cosicché il numero medio di captazioni per unità di tempo segue approssimativamente la legge di Van Maercke e Martin [15]:

$$(15) \quad n(t) = \frac{4\pi c^3 t^2}{V} \left[ 1 - \exp\left(-\frac{t_c^2}{t^2}\right) \right] \quad [\text{s}^{-1}]$$

dove  $t_c$  è il tempo critico, definito dall'intersezione della (14) con la retta rappresentante il valore limite effettivo di  $n(t)$  secondo la (15) per  $t \rightarrow +\infty$  (si veda la figura 10).

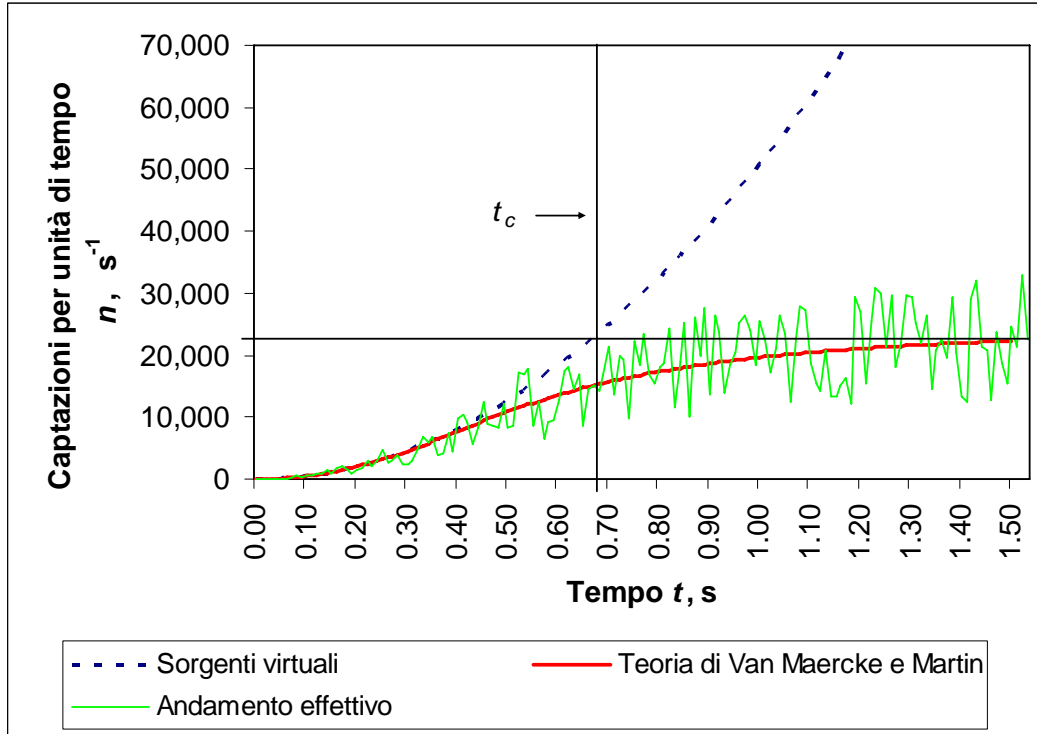


Figura 10 - Andamento del numero di captazioni per unità di tempo.

Per compensare questa deviazione sistematica, si ricorre in genere ad una correzione di tipo moltiplicativo: l'energia sonora calcolata mediante il tracciamento dei fasci viene divisa per il fattore in parentesi della (15). La stima del corretto valore di  $t_c$  viene effettuata punto per punto.

All'utilizzo dei fasci divergenti sono associate strategie particolari per il trattamento della coda della risposta all'impulso. La strategia più elementare consiste nel lasciare che i fasci divergano progressivamente, fino a divenire ampi come l'ambiente che li contiene [18]. In queste condizioni ogni ricevitore sperimenta continui arrivi di energia sonora e diviene quindi possibile un calcolo dell'energia riverberante con un numero molto ridotto di fasci; tuttavia, l'assunzione di fasci così ampi appare forzata. Per questo, alcuni codici di calcolo combinano due differenti tecniche per un'adeguata predizione della risposta all'impulso [15]. Per le prime riflessioni, quando è importante una ricostruzione dettagliata dell'ecogramma, viene attivato il *beam tracing*; per le riflessioni di ordine superiore viene sfruttata una statistica sui fasci lanciati durante la prima fase. La coda riverberante viene cioè valutata con un modello statistico, tralasciando lo studio degli effetti legati ai singoli contributi (fasci) non più facilmente distinguibili, a questo punto, l'uno dall'altro. Per evitare una discontinuità tra la parte geometrica e la parte riverberante, la transizione è determinata dall'ordine di riflessione, e non da un valore temporale fissato. La differenziazione delle fasi di lavoro comporta una aumento di velocità dell'algoritmo. Si noti che questo tipo di statistica opera sul campione delle

immagini virtuali trovate per stimare i parametri della popolazione, e non è quindi equivalente alla semplice adozione dell'acustica statistica di Sabine.

La riflessione diffusa del suono rimane un punto critico anche per i vari modelli di *beam tracing*, in quanto, per trattare coerentemente il fenomeno, bisognerebbe permettere che ogni singolo fascio desse origine al momento della riflessione ad un gruppo di nuovi fasci, distribuiti secondo la desiderata legge di diffusione. A loro volta, tutti i fasci secondari dovrebbero dare origine, al momento di una riflessione diffusa, ad altri fasci secondari, e così via. Il meccanismo ricorsivo di questa suddivisione (*split up*) dei fasci porterebbe ad una crescita esponenziale del tempo di calcolo. Benché il problema non sia ancora risolto, alcune linee di tendenza cominciano già ad emergere. Tra queste, particolarmente interessante la proposta di Stephenson [20], che ha suggerito di quantizzare non solo le pareti, suddividendole in porzioni piane, ma anche le direzioni di propagazione dei fasci, introducendo opportuni vettori direzionali a valori discreti. I fasci a base piramidale, detti *pyr*, sono generati secondo l'algoritmo di Lewers [17]. Molto spesso, una *pyr* intercetta contemporaneamente porzioni di due o più superfici: da ogni porzione si diparte allora una nuova *pyr*. Come tutti i meccanismi di *split up*, anche questo è potenzialmente esplosivo, ma viene controllato, da un certo ordine di riflessione in poi, assimilando le *pyr* alla più vicina direzione quantizzata; l'energia associata a tutte le *pyr* aventi la stessa direzione quantizzata viene fusa, provocando così una "riunificazione" delle *pyr* che contrasta la crescita esponenziale. L'energia delle *pyr* di ordine elevato può a sua volta essere suddivisa in nuove *pyr*, che comunque ricadranno in direzioni quantizzate e verranno riunificate. L'effetto netto sarà perciò una redistribuzione dell'energia tra le direzioni quantizzate. L'algoritmo di Stephenson, che sembra particolarmente adatto a calcolatori con alto grado di parallelismo, fornisce quindi ad ogni ricevitore alcune riflessioni speculari a forte energia, seguite da e mischiate con molte deboli riflessioni diffuse.

## 6.5 Costruzione ed uso del modello di simulazione

Condizione necessaria per ottenere un risultato affidabile dalla simulazione numerica è la padronanza del programma utilizzato, che implica esperienza e conoscenza delle basi teoriche della materia; ma questa non è ancora condizione sufficiente: nel primo *test* europeo dei più diffusi programmi, solo tre di essi su quattordici hanno fornito risultati affidabili [21]. È perciò necessaria l'applicazione di regole procedurali come le seguenti:

- affidare il programma ad un operatore competente;
- seguire un chiaro protocollo operativo;
- seguire le necessarie regole di modellazione CAD;
- eseguire sempre quando possibile una calibrazione del modello numerico costruito;
- scegliere la presentazione dei risultati più adatta al caso;
- considerare i risultati non come assoluti, ma come relativi (tecnica del confronto "prima-dopo").

L'operatore competente ha una preparazione specifica e dimostrata nella simulazione acustica e rispetta scrupolosamente il protocollo operativo. Quest'ultimo è una procedura normalizzata per eseguire tutte le fasi di *input* dati, elaborazione, restituzione dell'*output*, interpretazione dei risultati. Il protocollo operativo comprende almeno i punti di seguito illustrati.

### 6.5.1. Costruzione del modello geometrico della sala (modello CAD)

La costruzione del modello è la fase più lunga dell'intero processo. Il modello deve contenere solo entità tridimensionali; per esempio, una superficie rettangolare deve essere descritta da un'entità CAD nello spazio a tre dimensioni, non da quattro segmenti ai bordi, che definirebbero un "telaio" di area nulla e non un rettangolo. Il modello deve essere quanto più semplificato possibile, evitando dettagli non acusticamente rilevanti che appesantiscono l'elaborazione. Sono da evitarsi superfici troppo piccole, che in buona parte dell'intervallo di frequenze utili non rispettano le condizioni di validità dell'acustica geometrica; ciò è particolarmente importante per le superfici che contribuiscono alle prime forti riflessioni. Keränen et al. [22] raccomandano di non introdurre nel modello tanti singoli piccoli oggetti (come scaffali, tavoli, piccole macchine, ecc.) con dimensioni caratteristiche inferiori a 1,5 m, ma di trattarli collettivamente aumentando i coefficienti di assorbimento e diffusione delle superfici dove essi giacciono.

Molti programmi richiedono che le superfici curve siano approssimate con superfici piane (figura 11); nel far questo non bisogna però alterare la tipologia di riflessione: per esempio una superficie convessa che per forma disperde l'energia sonora non può essere rimpiazzata da una semplice superficie piana, che riflette specularmente (figura 12); occorre dunque approssimare con "sfaccettature" la superficie convessa. Analogamente per le superfici concave.

Un altro errore comune è quello di creare superfici sovrapposte, per esempio definendo una porta senza eliminare la corrispondente porzione di parete sulla quale essa è ricavata. Non è allora chiaro quale coefficiente di assorbimento acustico assegnare alla porzione in sovrapposizione, né come impedire al programma di cadere in ambiguità sulla costruzione di una possibile riflessione tra le due superfici sovrapposte. È poi fondamentale assicurarsi che il modello sia "a tenuta stagna", per evitare la fuoriuscita di raggi sonori che comprometterebbe l'affidabilità del risultato.

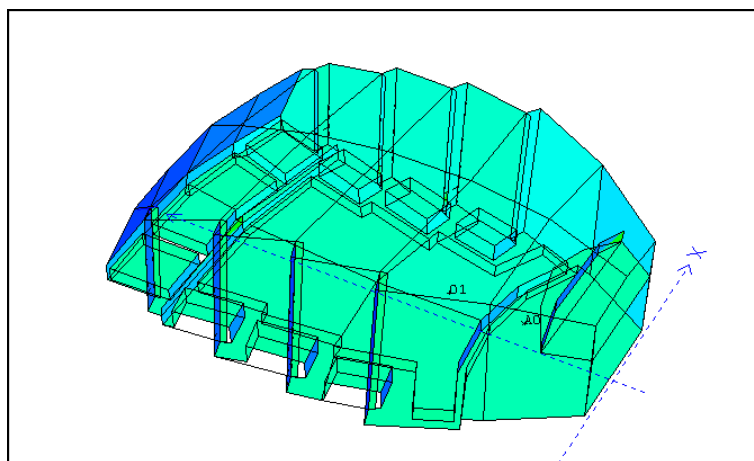


Figura 11 - Modello acustico di un ambiente con pareti curvilinee; il disegno architettonico è stato considerevolmente semplificato per la simulazione acustica; le superfici curve sono state approssimate con superfici piane.

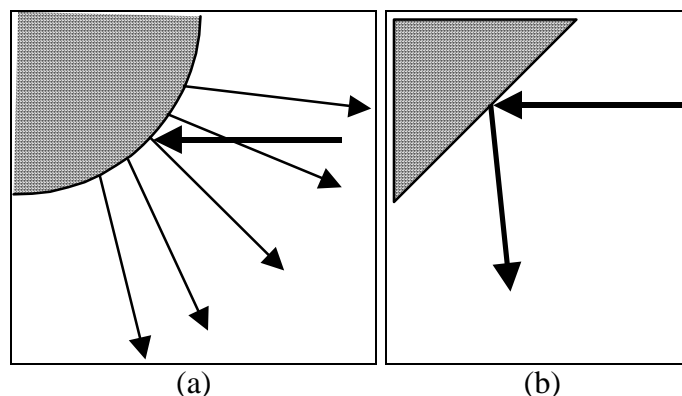


Figura 12 - Errata modellazione di una superficie convessa: a) superficie curva con riflessione diffusa; b) superficie piana con riflessione speculare.

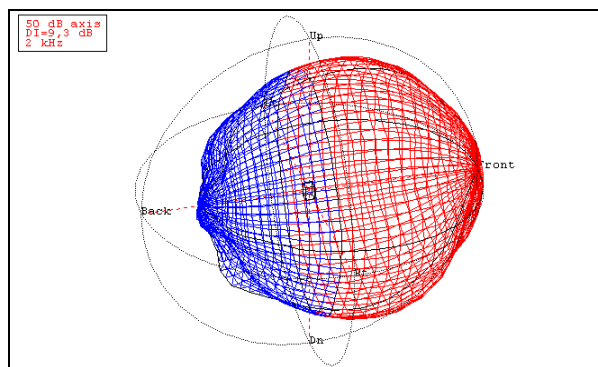


Figura 13 - Esempio di solido di direttività a 2 kHz di una sorgente sonora.

### 6.5.2. Modellazione fisica

Bisogna attribuire alle sorgenti sonore il corretto spettro di emissione e la corretta funzione di direttività (figura 13), che per molte sorgenti non sono facilmente reperibili nella letteratura tecnica e vanno quindi misurati. In tal caso l'applicazione delle norme UNI EN ISO 3740 [29] o UNI EN ISO 9614 [31-33] richiede tempo e personale esperto. Bisogna attribuire ai materiali presenti nell'ambiente dei coefficienti di assorbimento acustico e di diffusione realistici, in funzione della frequenza. È indispensabile che il programma disponga di un vasto archivio in cui scegliere e che permetta comunque di immettere altri dati (per esempio rilevati sperimentalmente). A questo proposito bisogna notare che non esistono ancora una definizione universalmente accettata del coefficiente di diffusione né delle raccolte di dati di riferimento; piuttosto, gli autori di ogni programma forniscono un proprio modello di diffusione e, a volte, un archivio di valori limitati alla loro esperienza.

### 6.5.3. Calibrazione del modello costruito

La fase di calibrazione è cruciale per garantire l'affidabilità dei risultati. Essa è preferibilmente basata su misurazioni all'interno dell'ambiente oggetto di studio nello stato di fatto [24] e parte innanzi tutto da un'oculata impostazione dei parametri di inizializzazione del programma usato; "truccare" tali parametri per accorciare i tempi di calcolo può essere molto rischioso [25]. Per fare convergere i valori simulati su quelli misurati

può essere necessario ritoccare la struttura del modello CAD, come pure la potenza e la direttività delle sorgenti sonore e l'assorbimento acustico dei materiali. La calibrazione andrebbe effettuata sui valori dei descrittori acustici più significativi per il caso in esame – nel caso degli ambienti di lavoro il livello di pressione sonora – ed affetti da minor incertezza di calcolo, definendo comunque un intervallo di accettabilità in funzione dello scarto tipo tra i valori simulati e quelli misurati.

#### 6.5.4. Calcolo effettivo

Questa fase deve essere compiuta sul modello ottimizzato. Tipicamente si ripete il calcolo prima e dopo l'introduzione nel modello di provvedimenti per la riduzione del rumore, in modo da poterne valutare l'efficacia in relativo, eliminando eventuali scostamenti sistematici residui del modello dalla realtà.

#### 6.5.5. Presentazione dei risultati

Per studiare specifici effetti in singole posizioni possono essere utili gli ecogrammi locali o i percorsi di singoli raggi, mentre i risultati globali vengono in genere presentati mediante mappe a falsi colori dei valori dei descrittori acustici, in primis del livello sonoro. A volte può essere utile produrre visualizzazioni tridimensionali dell'ambiente dopo la correzione acustica o addirittura auralizzazioni. In questa fase l'esperienza dell'operatore aiuta a scegliere la presentazione più significativa, evitando effetti visuali o sonori del tutto gratuiti che hanno il solo scopo di fare sfoggio delle possibilità offerte dalla tecnologia.

#### 6.5.6. Accuratezza attesa

Non sono molti i dati disponibili relativamente all'accuratezza che ci si può attendere dai programmi di simulazione in ambiente di lavoro. A questo proposito, sono di grande interesse le linee guida elaborate dai ricercatori del *Finish Institute of Occupational Health* [22]. Per validarle, essi hanno dettagliatamente esaminato sei ambienti industriali di dimensioni medie e grandi, misurando i livelli di pressione sonora presenti prima e dopo l'introduzione di trattamenti fonoassorbenti e schermi. Gli ambienti sono stati modellati con un programma *ray-tracing* in modo da potere confrontare le previsioni con i dati reali. Sono stati ottenuti i risultati sintetizzati nella tabella 3. Si noti che gli autori hanno stimato anche l'accuratezza delle previsioni dell'*insertion loss*, cioè dell'efficacia dei provvedimenti di riduzione del rumore, valutata mediante confronto dei livelli sonori prima e dopo l'introduzione dei provvedimenti stessi.

Tabella 3 - Accuratezza media del *ray-tracing* secondo Keränen et al. per modelli al computer conformi alle linee guida [22]. Grandezze calcolate per bande di ottava tra 125 Hz e 4 kHz.

GRANDEZZA CALCOLATA	UNITÀ	ACCURATEZZA MEDIA	SCARTO TIPO
Livello di pressione sonora	dB	3	2
<i>Insertion loss</i> del trattamento	dB	2	1
Tempo di riverberazione	s	0,7 (125 Hz – 250 Hz) 0,4 (500 Hz – 4 kHz)	0,8 (125 Hz – 250 Hz) 0,3 (500 Hz – 4 kHz)

L'unico studio italiano in materia è un recente test "inter-laboratorio" in cui diversi professionisti hanno confrontato le previsioni dei loro codici di calcolo con le misurazioni compiute in uno stesso ambiente industriale reale [23]. I risultati hanno evidenziato un'accuratezza inferiore a quella di tabella 3.

## 7. Scelta del modello di previsione

La scelta del modello di previsione dovrebbe individuare il punto di equilibrio ottimale tra diverse esigenze contrastanti. Infatti, all'esigenza di accuratezza si contrappone quella di rapidità; all'esigenza di semplicità del modello di calcolo si contrappone quella di rispondenza alla realtà. Un altro punto critico è quello relativo alla completezza dei dati di ingresso: è inutile adottare un modello che necessita di una descrizione dettagliata dell'ambiente se poi non si hanno a disposizione tutti i dati necessari.

In linea di massima si può dire che il modello di campo semidiffuso (cfr. punto 4) è proponibile solo in ambienti regolari, con superfici acusticamente riflettenti e arredi uniformemente distribuiti; ne risultano comunque valori approssimativi. Le formule per locali bassi e vasti (cfr. punto 5) hanno invece dimostrato di schematizzare efficacemente la situazione, finché lo scopo è quello di calcolare il livello sonoro, richiedendo un livello di dettaglio solo di poco superiore alla teoria del campo semidiffuso. La vera difficoltà si nasconde nella stima di alcune grandezze caratteristiche, come i coefficienti di assorbimento acustico "effettivi" o la densità degli arredi. Inoltre, un tecnico non particolarmente esperto potrebbe trovarsi in difficoltà nel giudicare quando una formulazione di questo tipo sia applicabile o meno.

I programmi di simulazione in approssimazione geometrica permettono di affrontare anche i casi più complessi con ragionevole sicurezza. Tuttavia richiedono molte ore-uomo di tecnici esperti per raccogliere e valutare tutti i dati di ingresso necessari (compresa la potenza sonora delle sorgenti), costruire il modello tridimensionale dell'ambiente con sorgenti sonore ed arredi, e infine calibrarlo. Il costo può divenire talmente rilevante da rendere antieconomico lo studio acustico, tranne che per ambienti con impianti di alta tecnologia e molti operatori esposti ad elevati livelli di rumore. In altre parole, il fattore limitante l'applicazione dei programmi di simulazione acustica agli ambienti di lavoro non è la potenza dei computer, ma il costo degli specialisti necessari per farli funzionare correttamente. A titolo d'esempio, la figura 14 riporta l'andamento indicativo dei costi di un intervento di riduzione del rumore: a fronte dell'aumento delle ore-uomo dedicate allo studio (comprensivo di valutazione della potenza sonora delle sorgenti, costruzione ed ottimizzazione del modello CAD, ecc.) il costo dell'intervento si riduce, poiché si procede alla sua ottimizzazione, tendendo ad un valore limite asintotico; d'altra parte aumenta linearmente il costo dello studio stesso; dunque il costo totale ha un punto di minimo ottimale che, nell'esempio, è raggiunto dopo sole 20 ore-uomo. Ciò induce a preferire uno studio rapido, che non lascia il tempo di procedere alle misurazioni di potenza sonora e mettere a punto correttamente un modello di simulazione acustica, ma piuttosto potrebbe essere basato su formule empiriche per campo non diffuso (cfr. punto 5 precedente). Naturalmente si potrebbe aggiungere che tra i "costi" di un intervento di riduzione del rumore vanno considerate anche le conseguenze di una insufficiente protezione di alcuni lavoratori che, sebbene monetizzabili, chiamano in causa considerazioni di ordine, legale, etico, ecc..

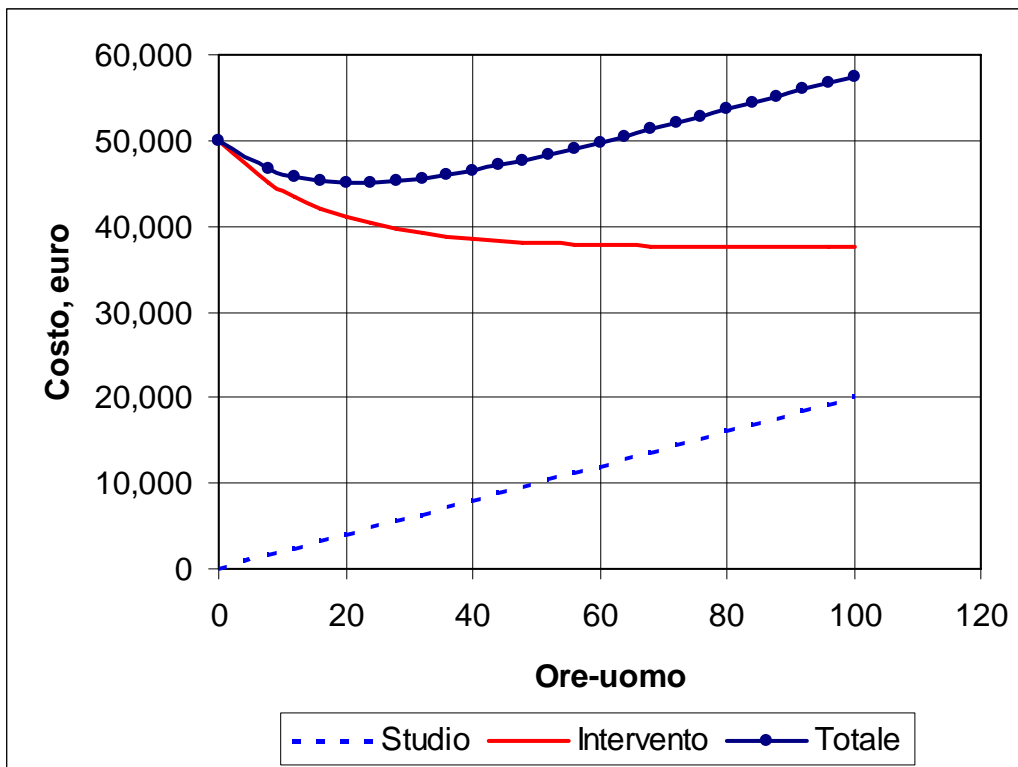


Figura 14 – Esempio indicativo dell’andamento dei costi di un intervento di riduzione del rumore in funzione delle ore-uomo dedicate allo studio acustico.

## 8. Provvedimenti per la riduzione del rumore

I provvedimenti per la riduzione del rumore possono essere classificati come segue:

### 1. riduzione del rumore alla sorgente:

- selezione di processi di lavorazione a basso livello di rumore;
- selezione di macchine a basso livello di rumore;

### 2. riduzione del rumore sul percorso di propagazione:

- disposizione adeguata delle sorgenti;
- cappottatura delle sorgenti;
- applicazione di silenziatori;
- trattamenti fonoassorbenti;
- schermi acustici;
- divisori;
- antivibranti e pavimenti galleggianti;
- controllo attivo del rumore;

### 3. riduzione del rumore al ricevitore:

- cabine fonoisolanti per operatori;
- intervalli in ambiente silenzioso;
- dispositivi di protezione individuali.

I provvedimenti attuati alla sorgente sono i più efficaci ed andrebbero considerati prioritariamente; tuttavia la sostituzione di determinati macchinari o processi può essere molto costosa e richiedere cambiamenti nel modo di lavorare. I provvedimenti attuati sul percorso di propagazione offrono molte opzioni facilmente graduabili; tuttavia non

sono sempre praticabili senza ostacolare almeno in parte i movimenti o l'illuminazione. Il controllo attivo è un provvedimento concretamente attuabile solo in casi specifici e richiede tecnologie ben più sofisticate dei provvedimenti passivi tradizionali. I provvedimenti attuati al ricevitore dovrebbero essere considerati solo come eventuale integrazione finale dei precedenti. In particolare i dispositivi di protezione individuali non modificano il campo sonoro esistente, ma rendono solo meno esposto il sistema uditivo di chi li indossa; dovrebbero essere considerati come ultima opzione. Delle linee guida generali sui vari provvedimenti di riduzione del rumore si possono trovare nella UNI EN ISO 11690-2 [27].

Nel seguito sono discussi con maggior dettaglio i principali provvedimenti "ambientali": i trattamenti fonoassorbenti e gli schermi acustici.

## 9. Trattamenti fonoassorbenti

I trattamenti fonoassorbenti modificano le caratteristiche acustiche dell'ambiente e quindi influenzano la propagazione del suono all'interno dello stesso. Indicativamente si possono classificare come segue:

### 1. per area di applicazione:

- rivestimento del soffitto esistente;
- pannelli sospesi dall'alto (baffles);
- introduzione di un nuovo controsoffitto;
- rivestimento di pareti esistenti;
- rivestimento di nuove pareti;

### 2. per materiali utilizzati:

- materiali fibrosi (lana di roccia, di vetro, fibre di poliestere, ecc.);
- materiali porosi espansi (poliuretani, melammine, ecc.);
- intonaci porosi spruzzati;
- pannelli metallici scatolati e forati contenenti materiali fibrosi o porosi;
- pannelli vibranti, in genere montati su intercapedine;
- pannelli forati o schiere di risonatori, in genere montati su intercapedine.

Le combinazioni di materiali e tipo di applicazione sono molteplici e crescono continuamente con il progresso della tecnica. Rimangono però fermi alcuni punti:

- i trattamenti fonoassorbenti sono più efficaci se collocati in prossimità della sorgente, tuttavia la riduzione del rumore globale è relativamente modesta in campo vicino, a causa del suono diretto proveniente dalla sorgente, e maggiore a distanze medie e grandi;
- i trattamenti fonoassorbenti sono più efficaci in locali con superfici riflettenti;
- i trattamenti fonoassorbenti devono coprire un'area sufficientemente ampia;
- la scelta del materiale, il cui coefficiente di assorbimento è funzione della frequenza, dipende dallo spettro del rumore da attenuare;
- la combinazione di trattamento fonoassorbente e schermi acustici è in genere molto efficace e porta ad una riduzione del rumore sostanzialmente maggiore di quella ottenuta applicando uno solo dei due provvedimenti.

L'effetto di un trattamento fonoassorbente sulla propagazione sonora può essere illustrato con un esempio. La figura 15 mostra le curve di decadimento spaziale del livello di pressione sonora ponderato A misurate prima e dopo il trattamento fonoassorbente in un ambiente industriale di forma rettangolare con dimensioni 60x15 m, altezza libera 4,5 m prima dell'intervento e 3,5 m dopo. ). Il trattamento, consistente nella sospensione di baffles metallici scatolari contenenti lana minerale, risulta efficace e progressivo con la distanza dalla sorgente.

I valori misurati prima del trattamento si accordano bene con la teoria di Bianchi, anche per distanze minori di  $H$  (cfr. punto 5.1). Tuttavia, la figura 15 mostra che dopo il trattamento l'accordo di tale teoria con la realtà non è più così buono, pur in presenza di un intervento riuscito. Infatti, a distanze dalla sorgente minori di 8 m il risultato è superiore alle previsioni, mentre dopo i 12 m circa la teoria prevede abbattimenti troppo elevati. Si è già detto che a breve distanza il campo sonoro è più energetico di quanto previsto dalla teoria e quindi qui il trattamento fonoassorbente dissipa molta energia acustica; a distanze maggiori l'incidenza delle onde sonore sul materiale diviene sempre più obliqua e risulta difficile stimare i valori del coefficiente di assorbimento acustico da introdurre nella formula. Inoltre, le misure a maggior distanza risentono delle riflessioni sulle pareti laterali e di fondo, non previste dalla teoria di Bianchi. Per tenere conto di questi effetti, come pure della presenza di arredi o di un locale uffici ricavato all'interno dello stabilimento, si può ricorrere alla simulazione acustica. Sempre in figura 15 si vede come con un codice *pyramid tracing* sia possibile ottenere un accordo decisamente migliore per la curva di decadimento spaziale dopo il trattamento. Ciò ha richiesto la costruzione di un modello CAD e la sua calibrazione, con un impegno di ore-uomo notevolmente maggiore di quello richiesto per l'applicazione della teoria di Bianchi. D'altra parte dalla simulazione acustica si possono ottenere molte altre informazioni, come per esempio la mappa del livello di pressione sonora con il massimo fattore di carico delle macchine (figura 16).

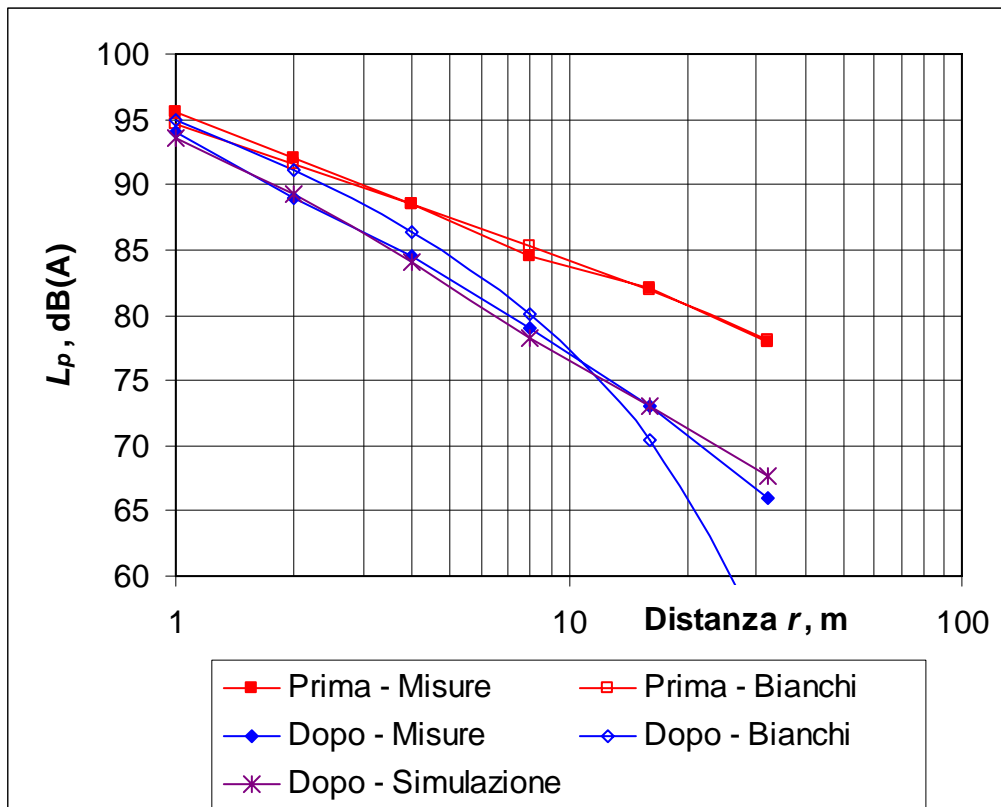


Figura 15 – Curve di decadimento spaziale del livello di pressione sonora ponderato A in funzione della distanza dalla sorgente prima e dopo il trattamento a baffles in un ambiente industriale.

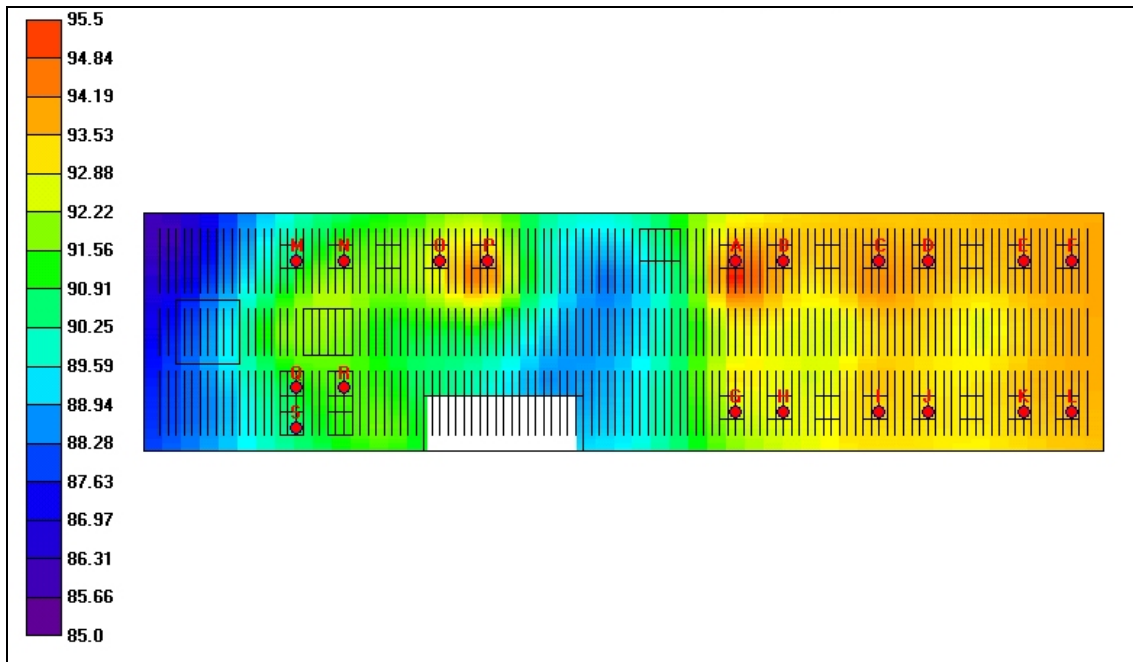


Figura 16 – Mappa del livello di pressione sonora ponderato A in un ambiente industriale dopo il trattamento fonoassorbente e con il massimo numero di macchine contemporaneamente in funzione.

## 10. Schermi

Gli schermi acustici per ambienti di lavoro sono caratterizzati dalla loro attenuazione sonora,  $D_p$ , cioè dalla differenza tra i livelli di pressione sonora in una specifica posizione con e senza lo schermo installato quando una o più prefissate sorgenti sonore sono in funzione [36]. La grandezza può essere espressa per bande d'ottava o in scala di ponderazione A. La norma UNI EN ISO 17624 [36] suggerisce una formula semplificata per calcolare l'attenuazione sonora *ridotta*,  $D_{z,r}$ , che tiene conto approssimativamente della riflessione su di una parete vicina alla sorgente e del bordo di diffrazione meno efficace:

$$(16) \quad D_{z,r} = 10 \lg \left( 1 + 20 \frac{z}{\lambda} \right) \quad , \quad (r < r_r) \quad [\text{dB}]$$

dove:  $z$  è la differenza tra il minimo percorso del suono tangente al bordo di diffrazione meno efficace ed il percorso diretto in assenza dello schermo [m];

$\lambda$  è la lunghezza d'onda del suono [m];

$r_r$  è il raggio di riverberazione, determinato come segue [m].

In condizioni di campo diffuso:

$$(17) \quad r_r = \sqrt{\frac{A}{16\pi}} \quad [\text{m}]$$

Per ambienti con molti oggetti diffondenti:

$$(18) \quad r_r = \frac{4V}{3S_f} \quad [\text{m}]$$

Per ambienti bassi con pochi oggetti diffondenti e soffitto poco assorbente:

$$(19) \quad r_r = \frac{3H}{2} \quad [\text{m}]$$

La formula (16) risulta spesso troppo ottimistica; più realistici sono invece, i valori tipici dell'attenuazione sonora globale riportati in tabella 4. Da questi si vede che il potere fonoisolante dello schermo non è influente purché abbia un indice di valutazione maggiore di 10 dB rispetto al valore atteso di  $D_p$ , cioè maggiore di 20 dB al massimo.

Si costruiscono schermi di tutte le forme e dimensioni, utilizzando i più svariati tipi di materiale. Anche in questo caso, però, rimangono fermi alcuni punti:

- gli schermi vanno posizionati in prossimità delle sorgenti o dei ricevitori;
- gli schermi dovrebbero essere fonoassorbenti sul lato rivolto alla sorgente;
- in ambienti molto riverberanti, schermi fortemente fonoassorbenti possono contribuire a migliorare l'assorbimento acustico totale;
- generalmente gli schermi acustici in ambienti chiusi hanno un *insertion loss* molto inferiore a quello ottenibile in campo libero, a meno che non siano associati ad un trattamento fonoassorbente delle superfici circostanti (figura 17).

Tabella 4 - Valori tipici dell'attenuazione sonora globale di schermi acustici in ambienti bassi [36].  $h$ : altezza dello schermo;  $r$ : distanza tra sorgente e ricevitore.

$h/H$	$r/H$		
	< 0,3	da 0,3 a 1	da 1 a 3
< 0,3	7 dB	4 dB	-
da 0,3 a 0,5	10 dB	7 dB	4 dB
> 0,5	-	9 dB	6 dB

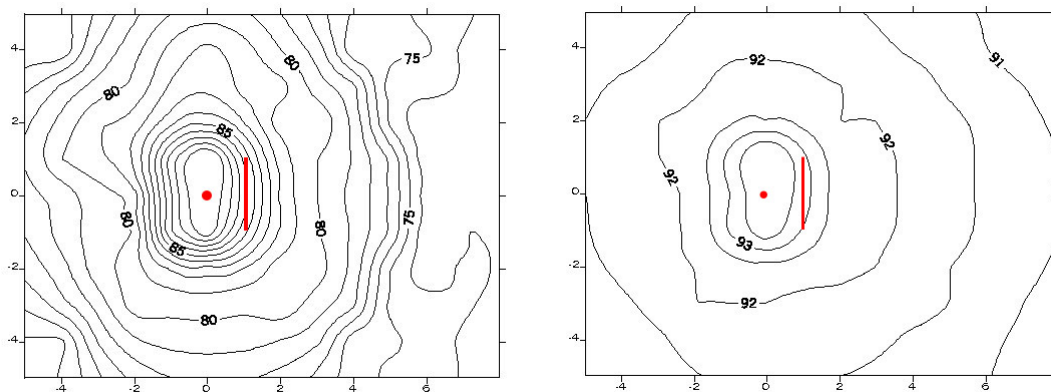


Figura 17 – Simulazione con un programma *pyramid tracing* delle curve isolivello generate da una sorgente sonora (rappresentata dal cerchio) in presenza di uno schermo 2x2 m; (a): in campo libero; (b): in un ambiente chiuso riverberante.

La figura 18 mostra un settore di un ambiente basso con schermi acustici abbinati ad un trattamento fonoassorbente, entrambi realizzati in pannelli metallici scatolari contenenti fibre minerali. Gli schermi attenuano il rumore che si propaga direttamente da una postazione di lavoro a quelle vicine. Il trattamento fonoassorbente sulle pareti è essenziale per attenuare le riflessioni sonore che altrimenti potrebbero degradare le prestazioni degli schermi. Per la stessa ragione a soffitto sono stati appesi dei baffles di poco più elevati del bordo superiore degli schermi. E' stata ottenuta un'attenuazione sonora di 8-10 dB(A) da una postazione di lavoro a quella adiacente.



Figura 18 – Porzione di un ambiente basso con schermi acustici abbinati ad un trattamento fonoassorbente.

## 11. Conclusioni

La rassegna dei modelli di calcolo per la previsione del rumore in ambiente di lavoro qui presentata ha messo in luce la diversa natura delle sottostanti approssimazioni del campo sonoro. Ne risulta fortemente ridimensionata l'importanza delle teorie del campo semidiffuso, che già in linea di principio non sono applicabili in presenza di materiale fonoassorbente concentrato su di una superficie. Emergono invece come importanti strumenti di lavoro le formule per campo non diffuso, rapide ed abbastanza efficaci per dimensionare un trattamento fonoassorbente; se è necessario aggiungere degli schermi, si può integrare il calcolo con metodi altrettanto semplici. I programmi di simulazione geometrica sono certamente gli strumenti più potenti tra quelli praticamente disponibili; essi permettono di ottimizzare contemporaneamente la distribuzione del trattamento fonoassorbente e degli schermi, ma richiedono operatori esperti ed una paziente messa a punto per ogni singolo caso.

## 12. Bibliografia

### 12.1 Disposizioni legislative

- [1] D. Lgs. 9 aprile 2008, n. 81, "Attuazione dell'articolo 1 della legge 3 agosto 2007, n. 123, in materia di tutela della salute e della sicurezza nei luoghi di lavoro", Suppl. Ord. G.U.R.I. 30 aprile 2008, n. 108.
- [2] Direttiva 2003/10/CE del Parlamento europeo e del Consiglio del 6 febbraio 2003 sulle prescrizioni minime di sicurezza e di salute relative all'esposizione dei lavoratori ai rischi derivanti dagli agenti fisici (rumore) (diciassettesima direttiva particolare ai sensi dell'articolo 16, paragrafo 1, della direttiva 89/391/CEE), G.U. U.E. n. L 42 del 15/02/2003.

### 12.2 Lavori scientifici

- [3] Ianniello C. (2008) "Il suono negli ambienti chiusi" in *Manuale di acustica applicata* (a cura di Spagnolo R.). Città Studi Edizioni, De Agostini Scuola, Novara.
- [4] Bianchi F. (1974) "Nuovi criteri per la progettazione dei trattamenti di insonorizzazione dei grandi ambienti industriali", Atti 2° Convegno A.I.A., Torino.
- [5] Farina A., Fornari G. (1998) "Studio della propagazione del rumore in ambienti industriali bassi e vasti", Atti Convegno dBA98, Modena, 249-257.
- [6] Heerema N., Hodgson M. (1999) "Empirical models for predicting noise levels, reverberation times and fitting densities in industrial workrooms", *Appl. Acoust.* **59**;51-60.
- [7] Hodgson M. (2003) "Ray-tracing evaluation of empirical models for predicting noise in industrial workshops", *Appl. Acoust.* **64**;1033-1048.
- [8] Garai M. (2008) "Acustica geometrica e modelli di simulazione" in *Manuale di acustica applicata* (a cura di Spagnolo R.). Città Studi Edizioni, De Agostini Scuola, Novara.
- [9] Schroeder M.R. (1970) "Digital simulation of sound transmission in reverberant spaces". *J. Acoust. Soc. Am.* **47**(2);424-431.
- [10] Kulowski A. (1985) "Algorithmic representation of the ray-tracing technique", *Appl. Acoust.* **18**;449-469.
- [11] Stephenson U. (1990) "Comparison of the mirror image source method and the sound particle simulation method", *Appl. Acoust.* **29**;35-72.

- [12] Ondet A.M., Barbry J.L. (1988) “Sound propagation in fitted rooms – Comparison of different models”, *J. Sound. Vib.* **125**(1);137-149.
- [13] Lehnert H. (1993) “Systematic errors of the ray-tracing algorithm”, *Appl. Acoust.* **38**;207-221.
- [14] Vorländer M. (1989) “Simulation of the transient and steady-state sound propagation in room using a new combined ray-tracing/image-source algorithm”, *J. Acoust. Soc. Am.* **86**(1);172-178.
- [15] Van Maercke D., Martin J. (1993) “The prediction of echograms and impulse responses within the Epidaure software”, *Appl. Acoust.* **38**;93-114.
- [16] Tenenbaum R.A., Slama J.G., Ballestreros M.L. (1992) “Numerical simulation of room acoustics: a new approach for source modelling”, *Proc. 14th I.C.A., Beijing*, paper F6-11.
- [17] Lewers T. (1993) “A combined beam tracing and radiant exchange computer model of room acoustics”, *Appl. Acoust.* **38**;161-178.
- [18] Farina A. (1995) “RAMSETE – A new pyramid tracer for medium and large scale acoustic problems”, *Proc. Euronoise '95, Lyon*, 55-60.
- [19] Kuttruff H. (1991) “Room acoustics”, 3<sup>rd</sup> ed., Elsevier Applied Science, New York.
- [20] Stephenson U. (1996) “Quantized pyramidal beam tracing – a new algorithm for room acoustics and noise immission prognosis”, *Acustica-Acta Acustica* **82**;517-525.
- [21] Vorländer M. (1995) “International round robin on room acoustical computer simulations”, *Proc. 15th I.C.A., Trondheim*, 689-692.
- [22] Keränen J., Airo E., Olkinuora P., Hongisto V. (2003) “Validity of ray-tracing method for the application of noise control in workplaces”, *Acustica-Acta Acustica* **89**;863-874.
- [23] Garai M., Nicolini O., Peretti A., Barbaresi L. (2007) “Primo round robin test italiano sulla simulazione del rumore negli stabilimenti industriali”, *Rivista Italiana di Acustica*, **31**(1);17-24.
- [24] Berntson A. (1995) “Comparison between ray-tracing and reality”, *Proc. 15<sup>th</sup> I.C.A., Trondheim*, 381-384.
- [25] Garai M., Tavernelli C. (1997) “Riduzione dei tempi di calcolo mediante taratura nella simulazione beam tracing degli ambienti chiusi”, *Atti XXV Convegno A.I.A., Perugia I*;437-442.

### **12.3 Norme tecniche**

- [26] UNI EN ISO 11690-1:1998, “Acustica – Raccomandazioni pratiche per la progettazione di ambienti di lavoro a basso livello di rumore contenenti macchinario – Parte 1: Strategie per il controllo del rumore”.
- [27] UNI EN ISO 11690-2:1999, “Acustica – Raccomandazioni pratiche per la progettazione di ambienti di lavoro a basso livello di rumore contenenti macchinario – Parte 2: Provvedimenti per il controllo del rumore”.
- [28] UNI EN ISO 11690-3:2000, “Acustica – Raccomandazioni pratiche per la progettazione di ambienti di lavoro a basso livello di rumore contenenti macchinario - Parte 3: Propagazione del suono e previsione del rumore in ambienti di lavoro”.
- [29] UNI EN ISO 3740:2002, “Acustica – Determinazione dei livelli di potenza sonora delle sorgenti di rumore – Linee guida per l’uso di norme base”.
- [30] UNI EN ISO 4871:1998, “Acustica – Dichiarazione e verifica dei valori di emis-

sione sonora di macchine ed apparecchiature”.

- [31] UNI EN ISO 9614-1:1997, “Acustica – Determinazione dei livelli di potenza sonora delle sorgenti di rumore mediante il metodo intensimetrico – Misurazione per punti discreti”.
- [32] UNI EN ISO 9614-2:1998, “Acustica – Determinazione dei livelli di potenza sonora delle sorgenti di rumore mediante il metodo intensimetrico – Misurazione per scansione”.
- [33] EN ISO 9614-3:2004, “Acustica – Determinazione dei livelli di potenza sonora delle sorgenti di rumore mediante il metodo intensimetrico – Metodo di precisione per la misurazione per scansione”.
- [34] UNI EN ISO 11200:1997, “Acustica – Rumore emesso dalle macchine e dalle apparecchiature – Linee guida per l’uso di norme base per la determinazione dei livelli di pressione sonora al posto di lavoro ed in altre specifiche posizioni”.
- [35] UNI EN ISO 14257:2004, “Misurazione e descrizione parametrica delle curve di decadimento del suono nello spazio degli ambienti di lavoro per la valutazione delle loro prestazioni acustiche”.
- [36] UNI EN ISO 17624:2005, “Acustica - Linee guida per il controllo del rumore negli uffici e nei luoghi di lavoro mediante l'utilizzo di schermi acustici”.