

# PRIMO ROUND ROBIN TEST ITALIANO SULLA SIMULAZIONE DEL RUMORE NEGLI STABILIMENTI INDUSTRIALI

articolo  
article

THE FIRST ITALIAN ROUND ROBIN TEST ON THE SIMULATION  
OF NOISE IN INDUSTRIAL WORKROOMS

**MASSIMO GARAI - LUCA BARBARESI** Dipartimento di Ingegneria Energetica, Nucleare e del Controllo Ambientale (DIENCA)  
Università di Bologna • Viale Risorgimento, 2 • 40136 Bologna

**OMAR NICOLINI** Azienda USL Modena I, Via Marcello Finzi 211 • 41100 Modena

**ALESSANDRO PERETTI** Studio Peretti e Associati s.a.s., via Ivrea, 1/4 • 35142 Padova

Nel presente lavoro vengono riportati ed analizzati i risultati del primo round robin test italiano sulla simulazione acustica negli stabilimenti industriali. Lo scopo del test era di ottenere indicazioni quantitative sull'affidabilità delle simulazioni, confrontando diversi programmi ed operatori su di uno stesso caso reale. Nel territorio della provincia di Modena è stato individuato uno stabilimento industriale con caratteristiche rappresentative degli insediamenti realizzati in queste zone e sufficientemente semplice da poter essere facilmente modellato dal punto di vista acustico. Gli autori si sono fatti carico di rilevare le caratteristiche geometriche e acustiche dello stabilimento. Tutti i dati, esclusi ovviamente i valori dei livelli di pressione sonora esistenti, sono stati forniti ad utilizzatori esperti di programmi di previsione del rumore in ambienti industriali, con il compito di ricostruire la distribuzione dei livelli di pressione sonora "alla cieca", esclusivamente mediante i loro modelli di simulazione. L'analisi dei risultati secondo ISO 5725-2 ha dimostrato la consistenza statistica del round robin test, tuttavia l'affidabilità delle simulazioni eseguite non è risultata soddisfacente: la media delle deviazioni tra livelli di pressione sonora in scala di ponderazione A simulati e misurati è di 4.4 dB(A) con uno scarto tipo di riproducibilità di 4.5 dB(A). La situazione è analoga a quella che si è verificata in passato con i primi round robin test sui modelli di simulazione acustica degli ambienti chiusi e del traffico stradale che, partiti da risultati molto dispersi, hanno con il tempo e la ripetizione dei test mostrato un'affidabilità rapidamente crescente. Al fine di innescare un analogo circolo virtuoso, gli autori si propongono di ripetere il round robin test relativo agli stabilimenti industriali in un prossimo futuro. Al di là delle analisi statistiche, sono emersi alcuni punti chiave, quali per esempio una efficace definizione degli ingombri e delle loro caratteristiche di diffusione e assorbimento. Globalmente il round robin test ha messo in evidenza la necessità di un chiaro protocollo operativo che specifichi quali sono le operazioni importanti - e come vadano eseguite - nelle diverse fasi di costruzione del modello geometrico, della sua messa a punto e della sua iniziazione parametrica in un ambiente di simulazione acustica.

*In this work the results of the first Italian round robin test on the simulation of noise in industrial workrooms are presented and analysed. The aim of the work was to obtain quantitative indications of the reliability of the simulations, comparing different programmes and operators on the same real life case. In the territory around Modena, Italy, a factory has been selected representative of the industrial workrooms existing in this area and simple enough to be easily modelled from an acoustical point of view. The authors measured all the geometrical and acoustical characteristics of the workroom. All the data, excluding of course the existing sound pressure levels, have been given to expert users of programmes for the forecasting of noise in industrial workrooms. They had to estimate the distribution of sound pressure levels in a blind way using only their simulation models. The analysis of the results according to ISO 5725-2 demonstrated the statistical consistency of the round robin test, but the reliability of the simulations was rather unsatisfying: the mean of the deviations between simulated and measured A-weighted sound pressure levels is 4.4 dB(A) with a standard deviation of reproducibility of 4.5 dB(A). This situation is analogous to that occurred in the past with the first round robin tests on room acoustics and road traffic noise simulations: starting from very scattered results they increased in reliability with time and repetition of the tests. In order to start an analogous positive feedback, the authors would like to repeat the round robin test on industrial workrooms in the next future. Beyond the statistical analysis, some key points have been individuated, which are often underestimated in the common practice, e.g. an effective definition of the fittings and of their characteristics of sound diffusion and absorption. Overall, the round robin test put in evidence the need of a clear operational procedure specifying the most important operations - and how to perform them - in the different steps of the construction of the model, of its tuning and of its parametric initialization in an acoustic simulation environment.*

PACS: 43.50

Una sintesi di questo lavoro è stata presentata come relazione ad invito al convegno "dB(A) 2006", Modena, 13 Ottobre 2006

## I. Introduzione

Nella ristrutturazione degli stabilimenti industriali e artigianali o nella realizzazione di nuovi ambienti di lavoro di questo tipo va posta la massima attenzione alla previsione dei livelli di rumore che saranno presenti una volta avviata la produzione. Tuttavia, ciò non sempre avviene, anche quando l'attività che si realizza, si trasferisce o si amplia è notoriamente rumorosa. Questa situazione è in conflitto da un lato con l'esigenza, prevista dalla legge, di valutare il problema

in fase progettuale per realizzare ambienti che generino la minima rumorosità possibile e dall'altra con l'esigenza di risparmio economico, oggettivamente possibile intervenendo sul rischio rumore in fase progettuale piuttosto che con bonifiche successive.

Fino a pochi anni fa, questa situazione dipendeva in parte dalla difficoltà di realizzare la previsione in maniera tecnicamente accettabile. Infatti, la complessità dei casi reali non può essere affrontata con la semplicistica teoria del campo semidiffuso che spesso è la sola protagonista dei testi didattici di acustica. Sarebbero in-

vece applicabili le varie formule empiriche sviluppate per gli ambienti bassi e vasti, quali appunto molti ambienti industriali (si vedano ad esempio i riferimenti [1-4]), ma esse sono poco note nel nostro Paese, sia ai consulenti che ai controllori, e comunque richiedono una notevole dose di esperienza nello stimare i valori di parametri per i quali non sono disponibili valori di riferimento consolidati (coefficienti di assorbimento acustico dei materiali ad incidenza obliqua, densità ed altezza media degli ingombri, ecc.) [5] ed una notevole dose di pazienza per sviluppare i calcoli in maniera semi-manuale, con il solo ausilio di un foglio elettronico.

Oggi però sono disponibili sul mercato numerosi software che implementano vari modelli acustici in approssimazione geometrica (sorgenti virtuali, *ray-tracing*, *beam tracing*, *pyramid tracing*, ecc.) in maniera sufficientemente flessibile e potente per effettuare la previsione del rumore in ambienti industriali anche complessi. Data la disponibilità dello strumento adatto, ora l'attenzione si sposta su altri due punti. Il primo è l'affidabilità dei programmi in oggetto, realizzati a partire da modelli matematici equivalenti ma non eguali [6], quando si tratti di predire con precisione i livelli di pressione sonora e non di stimare descrittori più o meno sofisticati della acustica delle sale. Il secondo è la competenza degli operatori che utilizzano tali programmi, poiché è chiaro che uno strumento complesso di questo tipo può dare risultati ingannevoli se affidato alle mani di utenti che non lo padroneggiano completamente. Quest'ultimo punto dovrebbe, a parere degli autori, essere affrontato in sede legislativa istituendo un adeguato sistema di qualificazione degli operatori, e quindi non verrà trattato ulteriormente in questa sede. Il presente lavoro tratta invece dell'affidabilità dei programmi di simulazione del rumore negli stabilimenti industriali.

## 2. Il progetto di ricerca

In generale, la ricerca di cui qui si riferisce tende a promuovere metodiche di progettazione degli ambienti industriali che sin dalle prime fasi siano acusticamente orientate per la realizzazione di ambienti di lavoro a minor rischio rumore ai costi più bassi possibili, come del resto raccomandato dalla UNI EN ISO 11690-3 [7]. Partendo dalla constatazione che sull'argomento esistono pochissimi studi, perlopiù realizzati all'estero (si veda ad esempio [8]), gli autori hanno pensato di organizzare il primo *Round Robin Test* (RRT) italiano per effettuare una verifica concreta dell'affidabilità dei codici di simulazione del rumore negli stabilimenti industriali attualmente in uso nel nostro Paese.

Nel territorio della provincia di Modena è stato individuato uno stabilimento industriale con caratteristiche adeguate per quanto riguarda la dimensione, la geometria degli involucri, i rivesti-

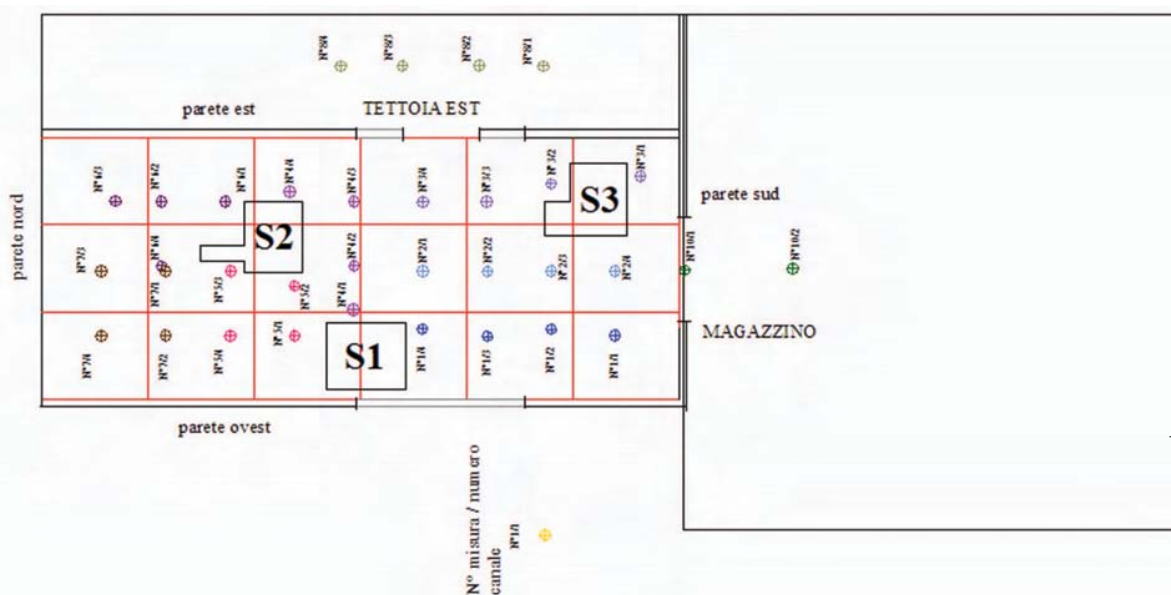


Fig. 1. Pianta dello stabilimento esaminato con la griglia dei punti di misurazione dei livelli di pressione sonora. S1, S2 e S3 indicano le tre presse utilizzate come uniche sorgenti sonore attive durante le misurazioni.



Fig. 2. Fotografia dello stabilimento esaminato. Di fronte il portale di comunicazione con il magazzino sulla parete Sud. Sulla sinistra la pressa S3. Sulla destra la pressa S1.

menti delle pareti, la forma del soffitto, le macchine installate, in modo tale da essere rappresentativo degli insediamenti realizzati in queste zone e sufficientemente semplice (per numero di sorgenti sonore e tipologia edilizia) da poter essere facilmente modellato dal punto di vista acustico.

Gli autori, con la collaborazione dell'azienda individuata, si sono fatti carico di rilevare le caratteristiche geometriche e acustiche dello stabilimento (dimensioni geometriche, tempi di riverberazione, decadimento del livello sonoro in funzione della distanza, tipologia dei materiali, ecc.), le caratteristiche acustiche delle macchine (livelli di potenza sonora), nonché la mappa dei livelli di pressione sonora realmente esistenti all'interno dell'ambiente di lavoro durante il funzionamento di un preciso insieme di macchine. E' stata utilizzata esclusivamente strumentazione di classe 1, con taratura in corso di validità, utilizzata in conformità alle norme tecniche correnti da esperti di acustica.

Tutti i dati disponibili, esclusi ovviamente i valori dei livelli di pressione sonora esistenti, sono stati forniti ad utilizzatori esperti di programmi di previsione del rumore in ambienti industriali, i quali hanno avuto il compito di ricostruire la distribuzione dei livelli di pressione sonora esclusivamente mediante i loro modelli di simulazione.

I rapporti finali degli utilizzatori esperti sono stati valutati imparzialmente su base statistica e ne sono state tratte numerose conclusioni utili ad un miglior impiego dei programmi di simulazione acustica negli stabilimenti industriali.

### 3. L'ambiente di prova

L'ambiente di prova consiste in una porzione di capannone industriale a pianta rettangolare, di dimensioni 25x10 m in pianta, con copertura a due falde (Fig. 1). Struttura portante e tamponamenti sono in cemento armato. Su due diverse pareti si aprono due portali, che rimangono sempre aperti, verso un magazzino di più vaste proporzioni (parete Sud in Fig. 1) e verso una zona ribassata con alcune lavorazioni meno rumorose (parete Est in Fig. 1). Un'ampia documentazione fotografica è stata fornita ai partecipanti per poter stimare di persona l'entità degli ingombri, la tipologia di materiali presenti, ecc.; un esempio è riportato in Fig. 2.

L'ambiente di prova è stato caratterizzato acusticamente. La Tab. 1 riporta i valori medi dei tempi di riverberazione  $T_{30}$  rilevati nelle tre zone denominate: zona presse (zona di studio), tettoia Est, magazzino. I valori sono stati misurati con la tecnica di Schroeder utilizzando un segnale MLS. L'altezza della sorgente sonora e dei microfoni era di 1.55 m.

Il decadimento spaziale del livello sonoro è stato misurato secondo UNI EN ISO 14257 [9], con la sorgente elettroacustica di prova posta ad 1 m circa dalla parete Nord. Direzione di misura: Nord-Sud (dalla sorgente verso il magazzino). La Fig. 3 riporta i valori del livello di pressione sonora misurati in scala lineare ed A al variare della distanza, già corretti in funzione del rumore di fondo. Naturalmente ai partecipanti al RRT sono stati forniti i dati per ogni singola banda di ottava da 63 Hz a 8 kHz.

### 4. Le sorgenti sonore

Sono stati misurati i livelli di potenza sonora  $L_W$  delle tre presse presenti nella porzione di stabilimento in esame (denominate S1, S2 e S3) conformemente alla norma UNI EN ISO 3744 [10], utilizzando superfici di misura a forma di parallelepipedo adattate alla forma delle cabine insonorizzanti delle presse.

**TABELLA 1**

Tempi di riverberazione  $T_{30}$  misurati con la tecnica di Schroeder utilizzando un segnale MLS.

Frequenza, Hz	ZONA PRESSE	TETTOIA EST	MAGAZZINO
	$T_{30}, s$	$T_{30}, s$	$T_{30}, s$
63	2.17	1.32	2.03
125	1.98	1.16	1.63
250	1.98	1.10	1.59
500	1.92	1.00	1.51
1000	1.80	0.91	1.51
2000	1.66	0.87	1.42
4000	1.37	0.75	1.21
8000	0.87	0.54	0.81

**TABELLA 2**

Livelli di potenza sonora  $L_W$  misurati per le tre presse S1, S2 e S3 e scarto tipo di riproducibilità  $s_R$  atteso per misurazioni secondo UNI EN ISO 3744 e UNI EN ISO 3746.

FREQUENZA	PRESSA 1	PRESSA 2	PRESSA 3	$O_R$
Hz	dB	dB	dB	(ISO3744/3746)
63	90.3	96.2	95.7	5
125	92.5	97.1	91.9	3
250	89.2	91.2	86.6	2
500	95.0	92.3	83.9	1.5
1000	93.8	92.2	87.0	1.5
2000	92.2	89.5	83.6	1.5
4000	93.2	91.9	85.0	1.5
8000	95.0	93.7	91.2	2.5
Lin	101.9	102.9	99.5	-
A	100.1	98.4	93.4	1.5/3.5



Fig. 3. Livelli di pressione sonora globali in scala lineare ed A misurati in funzione della distanza da una sorgente sonora elettroacustica alimentata con rumore bianco. Per confronto è riportata anche l'ipotetica curva di decadimento in campo libero in scala lineare.

Durante le misurazioni dei livelli di potenza sonora le presse sono state azionate una alla volta mentre tutte le altre macchine erano ferme. La correzione  $K_1$  [10] per il rumore di fondo è risultata trascurabile.

La correzione ambientale  $K_2$  [10] è risultata superiore a 2 dB, utilizzando nel calcolo il volume della sola zona presse ed il valore medio del tempo di riverberazione misurato in tale volume. Di conseguenza, a rigore si dovrebbe dichiarare il solo livello di potenza sonora globale in scala di ponde-

**TABELLA 3**

Nominativi dei partecipanti al RRT e rispettivi programmi di simulazione acustica utilizzati.

PARTECIPANTE	ENTE O AZIENDA	PROGRAMMA
Ing. Gianfranco Carnevali	Assopiastrelle, Sassuolo (MO)	Prince, sviluppato da ENEA (BO)
Prof. Angelo Farina, Ing. Paolo Galaverna	LAE Laboratorio di Acustica ed Electroacustica (PR)	Ramsete 3.0., sviluppato da LAE (PR)
Ing. Franco Bertellino	Microbel s.r.l. (TO)	Rayplus 5.0, sviluppato da INRS (FR)
Dott. Andrea Tombolato e Dott. Stefano Cordeddu	Studio di Acustica (PD) e Villafranca Padovana (PD)	Ramsete 2.1, sviluppato da LAE (PR)
Ing. Paolo Caporello	Studio Tecnico (PD)	Raynoise, sviluppato da LMS (BE)
Ing. Stefano Venturi	Studio Tecnico (PS)	Odeon, sviluppato da Brüel & Kjær (DK)

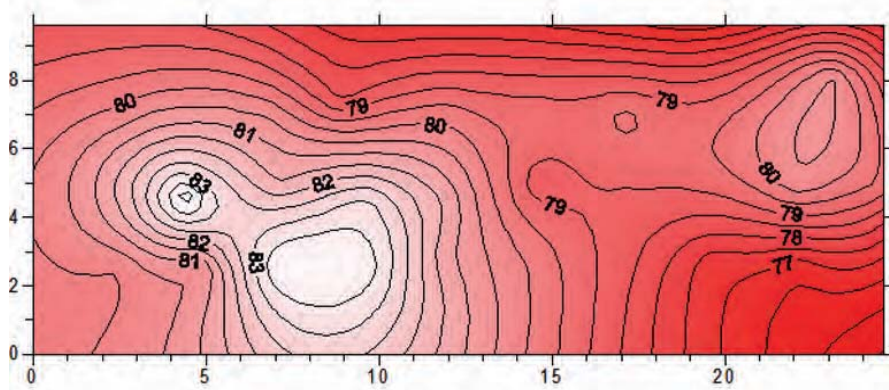


Fig. 4. Mappa di rumore ricostruita a partire dai livelli di pressione sonora globali in scala di ponderazione A misurati nella zona presse con le tre presse S1, S2 e S3 in funzione. Tutte le altre macchine erano ferme.

razione A, come se fosse stata applicata direttamente la UNI EN ISO 3746 [11]. Si è invece scelto di presentare comunque agli esperti partecipanti al RRT i valori di livello di potenza sonora in bande di ottava, corretti con i valori di  $K_2$  effettivamente misurati. Questa scelta fornisce una indicazione sullo spettro delle sorgenti sonore, anche se ci si può attendere un'incertezza superiore a quella prevista per una applicazione rigorosa

della ISO 3744 a causa dei valori elevati di  $K_2$ . La scelta è anche in linea con la pratica corrente da parte di professionisti che, pur esperti di acustica, non si trovano nelle condizioni di escogitare metodi alternativi per supplire ai limiti delle norme attuali. La Tab. 2 riporta i valori dei livelli di potenza sonora  $L_w$  delle tre presse S1, S2 e S3 unitamente allo scarto tipo di riproducibilità atteso per misurazioni secondo UNI EN ISO 3744 e UNI EN ISO 3746.

### 5. Risultati attesi dai partecipanti

Sulla base delle informazioni fornite, che erano uguali o superiori a quelle che in media un professionista riesce a reperire nel corso di una normale consulenza, i partecipanti dovevano creare il modello geometrico dell'ambiente con i vari ingombri presenti, assegnare i coefficienti di assorbimento acustico dei vari materiali, creare le sorgenti sonore corrispondenti alle tre presse, ecc., cercando di ricostruire il più fedelmente possibile la zona presse dal punto di vista acustico, come avrebbe fatto un consulente tecnico dell'azienda.

Quindi i partecipanti al RRT dovevano produrre, in forma tabulare (indispensabile) ed eventualmente grafica (facoltativa) la mappa dei livelli di pressione sonora in ambiente dovuti al funzionamento contemporaneo delle tre presse S1, S2 e S3, in assenza di altre lavorazioni. Per facilitare i confronti successivi, la Fig. 4 riporta la mappa dei livelli di pressione sonora globali in scala di ponderazione A ricavata dalle mi-

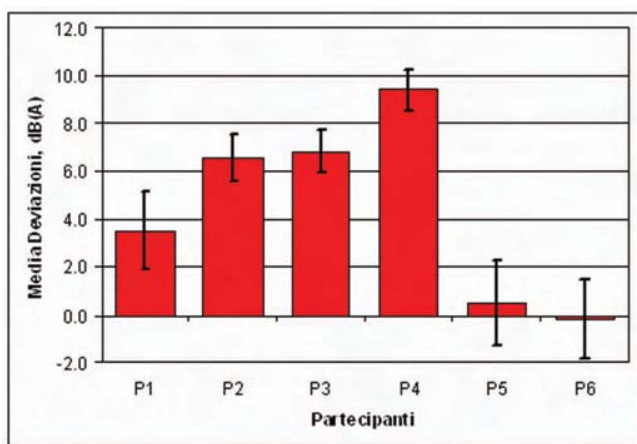


Fig. 5. Valor medio delle deviazioni tra valori simulati e valori misurati dei livelli di pressione sonora globali in scala di ponderazione A. Le barre sottili sovrapposte a ciascuna colonna dell'istogramma rappresentano un intervallo pari ad uno scarto tipo.

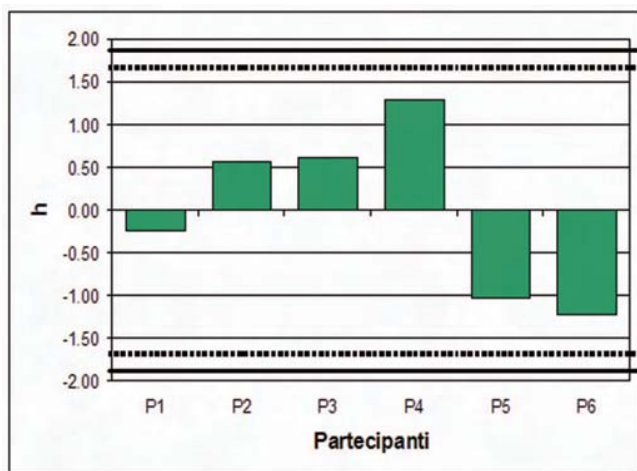


Fig. 6. Test *h* di Mandel inter-laboratorio. La linea tratteggiata spessa indica il valore critico al 5%, pari a  $\pm 1.66$ ; la linea continua spessa indica il valore critico al 1%, pari a  $\pm 1.87$ .

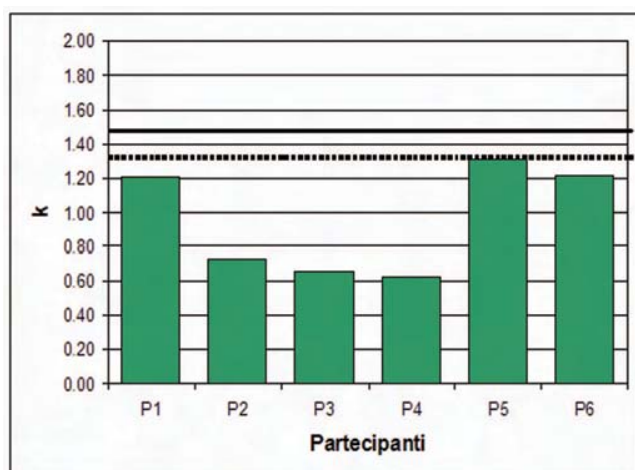


Fig. 7. Test *k* di Mandel intra-laboratorio. La linea tratteggiata spessa indica il valore critico al 5%, pari a 1.33; la linea continua spessa indica il valore critico al 1%, pari a 1.47.

surazioni eseguite, mappa che era l'obiettivo da ottenere mediante le simulazioni "alla cieca".

I livelli di pressione sonora dovevano essere presentati nelle bande di ottava da 63 Hz a 8 kHz e come livelli globali in scala di ponderazione A. I valori simulati dovevano essere calcolati nei medesimi punti utilizzati per la misurazione.

## 6. Partecipanti al round robin test

I nominativi dei partecipanti al RRT ed i rispettivi programmi di simulazione utilizzati sono riportati in Tab. 3. Nel seguito i partecipanti saranno indicati in forma anonima come P1, P2, ... P6; l'assegnazione della sigla a ciascuno di essi è stata effettuata in maniera casuale in modo da non rivelare l'associazione tra i nominativi dei partecipanti ed i risultati ottenuti.

Benché il numero dei partecipanti al RRT possa sembrare esiguo, si sottolinea che non è stato facile reperirli, a conferma del fatto che le capacità operative di condurre simulazioni di questo tipo sono ancora poco diffuse nel nostro Paese. Del resto anche nella pubblicazione internazionale [8] si fa riferimento a sei casi.

**TABELLA 4**

Valori del livello di pressione sonora globale in scala di ponderazione A ottenuti dalle misurazioni e dalle simulazioni.

Punto N.	Misurazioni	P1	P2	P3	P4	P5	P6
1	76.6	80.4	84.3	86.0	92.5	78.0	80.0
2	77.3	82.8	86.1	86.4	93.4	79.0	80.3
3	78.7	84.4	87.0	86.7	93.8	80.0	81.2
4	79.8	87.8	88.2	87.9	93.6	87.0	88.8
5	78.7	86.3	87.5	87.1	94.7	83.0	81.5
6	79.0	83.7	86.7	86.7	94.3	80.0	80.7
7	79.2	82.4	86.4	86.7	93.8	80.0	80.6
8	80.4	83.4	85.6	86.6	93.0	80.0	81.2
9	80.6	83.1	86.0	86.9	90.6	80.0	-
10	78.8	83.0	87.1	86.9	92.5	79.0	83.1
11	79.6	83.7	86.6	86.6	93.8	79.0	80.6
12	79.3	84.9	86.7	86.9	94.0	80.0	80.5
13	81.2	89.9	89.9	90.2	95.0	86.0	79.4
14	81.4	88.4	88.4	87.9	94.8	87.0	80.0
15	79.8	88.1	88.1	87.0	94.0	82.0	79.7
16	78.4	87.8	88.7	88.2	93.0	86.0	80.0
17	83.8	84.7	88.0	88.4	95.0	83.0	81.3
18	83.2	87.5	90.2	89.2	95.0	86.0	-
19	81.5	82.5	87.4	88.7	94.7	84.0	79.3
20	84.0	83.4	87.4	87.4	95.0	80.0	80.1
21	80.4	83.3	87.1	87.8	93.9	83.0	78.2
22	80.7	82.3	86.0	86.8	94.2	79.0	78.2
23	80.1	81.1	85.6	86.6	93.9	77.0	78.0
24	84.4	81.4	86.3	86.9	95.0	78.0	78.1
25	83.0	81.8	86.4	86.8	95.0	78.0	78.3
26	80.5	81.6	86.4	87.0	94.9	79.0	78.8
27	81.6	80.8	85.8	86.6	94.5	77.0	77.8
28	80.0	80.6	85.7	86.3	94.2	76.0	78.2

**TABELLA 5**

Valori delle statistiche di Grubbs e di Cochran confrontati con i valori critici da non superare estratti da [12].

Statistica	Valore	Valore critico al 5%	Valore critico al 1%
Grubbs $G_{max}$	1.303	1.887	1.973
Grubbs $G_{min}$	1.212	1.887	1.973
Cochran C	0.288	0.445	0.520

## 7. Analisi statistica dei risultati

### 7.1 Test di consistenza statistica

La Tab. 4 riporta i valori del livello di pressione sonora globale in scala di ponderazione A ottenuti dalle misurazioni nei 28 punti definiti nella zona presse e dalle sei simulazioni negli stessi punti e nelle stesse condizioni nominali. Si notano subito forti scostamenti tra i valori simulati e quelli misurati (Fig. 5). Ciò ha posto il problema di decidere in maniera oggettiva se il RRT fosse ben impostato e significativo dal punto di vista statistico, prima ancora che da quello acustico. Per rispondere a questa esigenza si è deciso di condurre un'analisi statistica dei risultati secondo ISO 5725-2 [12], che è il riferimento fondamentale per l'analisi dei test inter-laboratorio. Allo scopo il presente RRT è stato assimilato ad un "esperimento bilanciato a livelli uniformi" con sei "laboratori" corrispondenti ai partecipanti ( $p = 6$ ), un "livello" corrispondente al caso in esame ( $q = 1$ ) e ventotto "test" corrispon-

denti ai valori nei punti di misura della zona presse ( $n = 28$ ). La variabile statistica, conformemente alla ISO 5725-2, è allora la deviazione  $y$  tra i valori simulati e quelli misurati del livello di pressione sonora globale in scala di ponderazione A:

$$y = L_{pA}(\text{simulato}) - L_{pA}(\text{misurato}) \text{ dB(A)} \quad (1)$$

Con questa impostazione è possibile costruire due descrittori, le variabili  $h$  e  $k$  di Mandel, che indicano rispettivamente come si posiziona la media dei singoli laboratori rispetto alla media globale e l'entità delle fluttuazioni di ogni singolo laboratorio;  $h$  non deve eccedere né in positivo né in negativo,  $k$  non deve avere valori eccessivi. L'espressione delle due statistiche di Mandel, adattata al caso in esame è [12]:

$$h_i = \frac{\bar{y}_i - \bar{\bar{y}}}{s} \quad (i = 1, \dots, p) \quad (2)$$

$$k_i = \frac{s_i \sqrt{p}}{\sqrt{\sum_{k=1}^p s_k^2}} \quad (i = 1, \dots, p), \quad (3)$$

dove:

$$\bar{y}_i = \frac{1}{n_i} \sum_{k=1}^{n_i} y_{ik} \quad (i = 1, \dots, p) \text{ dB(A)} \quad (4)$$

$$\bar{\bar{y}} = \frac{\sum_{i=1}^p n_i \bar{y}_i}{\sum_{i=1}^p n_i} \text{ dB(A)} \quad (5)$$

$$s_i = \sqrt{\frac{1}{n_i - 1} \sum_{k=1}^{n_i} (y_{ik} - \bar{y}_i)^2} \quad (i = 1, \dots, p) \text{ dB(A)} \quad (6)$$

$$s = \sqrt{\frac{1}{p - 1} \sum_{i=1}^p (\bar{y}_i - \bar{\bar{y}})^2} \text{ dB(A)}. \quad (7)$$

La ISO 5725-2 fornisce anche i valori di riferimento per  $h$  e  $k$  da non superare al 5% ed all' 1% di livello di rigetto [12]. Le Figg. 6 e 7 riportano il risultato del test di Mandel per  $h$  e  $k$ , rispettivamente. Come si vede il test di Mandel è superato con esito positivo.

Oltre ai test di consistenza grafica di Mandel, la ISO 5725-2 suggerisce due test numerici per verificare l'esistenza di eventuali laboratori "anomali": sono le statistiche di Grubbs,  $G$ , e di Cochran,  $C$ . L'espressione delle statistiche citate, adattata al caso in esame è [12]:

$$G_{\max} = \frac{\bar{y}_{\max} - \bar{\bar{y}}}{s} \quad (8)$$

$$G_{\min} = \frac{\bar{\bar{y}} - \bar{y}_{\min}}{s} \quad (9)$$

$$C = \frac{s_{\max}^2}{\sum_{i=1}^p s_i^2}, \quad (10)$$

dove  $\bar{y}_{\max}$  e  $\bar{y}_{\min}$  sono i valori massimo e minimo delle medie intra-laboratorio, rispettivamente.

La statistica di Grubbs verifica che i due valori massimo e minimo delle medie dei singoli laboratori non siano eccessivamente distanti dalla media generale, ovvero che non ci siano eventuali laboratori "devianti"; il confronto va effettuato con i valori critici tabulati in [12]. La statistica di Cochran verifica che nessun laboratorio abbia una varianza interna eccessiva rispetto all'andamento generale, ovvero che non ci siano eventuali laboratori più "scarsi" degli altri; il confronto va effettuato con i valori critici tabulati in [12].

La Tab. 5 riporta i valori delle statistiche di Grubbs e di Cochran confrontati con i valori critici da non superare estratti da [12]. Come si vede entrambi i test sono superati con esito positivo.

### 7.2 Calcolo degli indicatori globali di affidabilità

Appurata la consistenza statistica dei risultati, si è proceduto al calcolo dei valori globali indicativi di accuratezza, ripetibilità e riproducibilità, sintetizzati in Tab. 6. La media generale delle deviazioni  $m$  coincide con l'espressione (5). Lo scarto tipo di ripetibilità  $s_r$  è dato da:

$$s_r = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^p (n_i - 1) s_i^2}{\sum_{i=1}^p (n_i - 1)}} \text{ dB(A)}. \quad (11)$$

Lo scarto tipo inter-laboratorio  $s_L$  è dato da:

$$s_L = \sqrt{\frac{s_d^2 - s_r^2}{\bar{n}}} \text{ dB(A)}, \quad (12)$$

dove:

$$s_d = \sqrt{\frac{1}{p - 1} \sum_{i=1}^p n_i (\bar{y}_i - \bar{\bar{y}})^2} \text{ dB(A)} \quad (13)$$

$$\bar{n} = \frac{1}{p - 1} \left[ \sum_{i=1}^p n_i - \frac{\sum_{i=1}^p n_i^2}{\sum_{i=1}^p n_i} \right]. \quad (14)$$

Lo scarto tipo di riproducibilità  $s_R$  è dato da:

$$s_R = \sqrt{s_r^2 + s_L^2} \text{ dB(A)}. \quad (15)$$

I valori ottenuti indicano che la media delle deviazioni tra valori simulati e valori misurati è più alta di quella riportata da Keränen et al. [8]: 4.4 dB(A) contro 3 dB(A). Questo può essere dovuto al fatto che nel lavoro [8] si operava in condizioni di ripetibilità, mentre nel presente lavoro valgono le più gravose condizioni di riproducibilità. Vale la pena di ricordare che si opera in condizioni di ripetibilità quando si lavora con la stessa strumentazione (leggasi: lo stesso programma), lo stesso operatore, a parità di condizioni al contorno (leggasi: tipo di computer ed ambiente software); viceversa si opera in condizioni di riproducibilità quando si lavora con la differenti strumentazioni (leggasi: differenti programmi), differenti operatori, con condizioni al contorno non necessariamente identiche.

Infatti, lo scarto tipo di ripetibilità qui ottenuto è pari a 2.7 dB(A) e dunque non troppo superiore allo scarto tipo di circa 2 dB(A) dichiarato da Keränen et al. [8]. Più preoccupante è invece lo scarto tipo inter-laboratorio di 3.6 dB(A), che contribuisce a formare un valore globale di riproducibilità di ben 4.5 dB(A). In parole povere, ciò significa che attualmente, rivolgendosi ad un professionista per una simulazione acustica in ambiente industriale con un programma di sua scelta, si otterrebbe mediamente un risultato discosto dal vero di circa 4.4 dB(A) con uno scarto tipo di 4.5 dB(A). Si può quindi affermare che il RRT, pur condotto secondo tutti i crismi del rigore statistico, evidenzia una preoccupante mancanza di affidabilità delle simulazioni come comunemente eseguite.

## 8. Ulteriori considerazioni

Per trovare una spiegazione ai risultati ottenuti non basta l'analisi statistica, ma bisogna formulare delle ipotesi di spiegazione e verificarle con tutte le informazioni disponibili. Queste ultime provengono dall'analisi dettagliata degli output forniti dai partecipanti e dalle risposte ad un questionario che era stato somministrato ai partecipanti subito dopo la fine del RRT. Ciò ha permesso di arrivare alle conclusioni seguenti.

Un'altra difficoltà evidenziata dal confronto tra i modelli acustici prodotti è stata quella di una corretta modellazione degli ingombri (scaffalature, cassoni, ecc.) presenti in ambiente: a seconda dei partecipanti si va infatti da modelli spogli, senza ingombri, a modelli contenenti i dettagli degli oggetti mostrati nelle fotografie. Qualcuno dei partecipanti ha suggerito che si poteva compensare la mancanza degli ingombri nel modello variando l'assorbimento acustico delle pareti, ma è chiaro che l'effetto di un ostacolo tridimensionale e diffondente non è equivalente a quello di un diverso assorbimento superficiale. Alla stessa conclusione sono giunti Keränen et al. [8].

Le risposte a questionario hanno poi evidenziato un utilizzo estremamente soggettivo dei dati di riverberazione e decadimento spaziale per la taratura del modello: ben tre su sei partecipanti non hanno preso in considerazione la curva di decadimento del suono con la distanza che era stata fornita (Fig. 3); uno di essi ha invece utilizzato solo la curva di decadimento spaziale ma non i tempi di riverberazione misurati (vedi Tab.1). E' chiaro che un modello non adeguatamente tarato è meno affidabile di uno scrupolosamente adattato con tutte le informazioni disponibili. Analoghe considerazioni valgono per quei due partecipanti che hanno assegnato ai materiali presenti i coefficienti di assorbimento acustico che hanno trovato nell'archivio del programma senza ulteriori verifiche. Sembra che esista una certa riluttanza a cambiare i valori di default dei programmi, senza considerare che essi vengono da fonti disparate e non egualmente affidabili e che in genere sono stati misurati in camera riverberante, con tutti i noti limiti del metodo.

Non si può poi omettere il fatto che la stima dei livelli di potenza sonora delle tre presse ha incontrato difficoltà oggettive che ne hanno di-

Fig. 8. Mappa delle deviazioni in dB(A) per il partecipante P1. Mappa ottenuta da dati numerici con lo stesso programma di grafica e gli stessi parametri utilizzati per la Fig. 4.

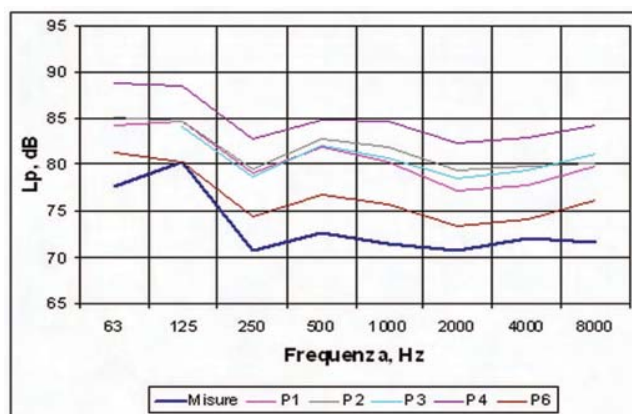
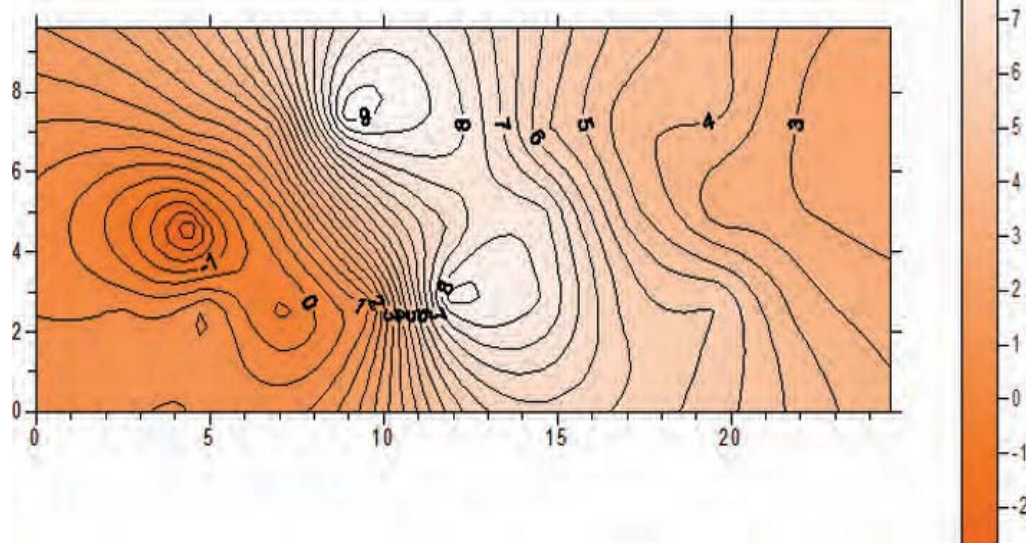


Fig. 9. Confronto tra lo spettro misurato nel punto 2/1 dello stabilimento (linea spessa) e gli spettri simulati dai partecipanti P1, P2, P3, P4, P6.

TABELLA 6

Valori degli indicatori globali di affidabilità ottenuti con il RRT.

GRANDEZZA	VALORE, dB(A)
Media generale m	4.4
Scarto tipo di ripetibilità $s_r$	2.7
Scarto tipo inter-laboratorio $s_l$	3.6
Scarto tipo di riproducibilità $s_R$	4.5

minuito la precisione: ostacoli e pareti che hanno impedito l'utilizzo di alcune postazioni microfoniche come prescritto dalla UNI ENISO 3744, ambiente eccessivamente riverberante, ecc. In realtà gli spettri di potenza rilevati sono risultati sufficientemente realistici, come mostra anche il confronto tra lo spettro misurato in un punto dello stabilimento e gli spettri simulati (Fig. 9). L'andamento in frequenza è analogo per le misure e le simulazioni, solo i livelli di pressione sonora sono più alti nelle simulazioni. Ciò può dipendere dalla mancanza delle informazioni sulla direttività delle sorgenti, dovuta a sua volta all'incompletezza delle posizioni di misura dei livelli di potenza sonora, ma questo risulterebbe compensato dal fatto che le presse sono racchiuse da cabine insonorizzanti in lamiera che rendono l'emissione uniforme in quasi tutte le direzioni e dalle caratteristiche riverberanti dell'ambiente di studio. La so-

vastima dei livelli simulati può dipendere anche da un difetto dei programmi di simulazione in approssimazione geometrica, che in un ambiente in buona parte vuoto come quello in esame mantengono in vita troppo a lungo i raggi (o fasci o piramidi) tracciati. Inoltre, uno dei partecipanti ha dichiarato che ogni pressa è stata modellata come un insieme di piccole sorgenti poste sulla superficie esterna della cabina, attribuendo ad ognuna di esse la potenza sonora dell'intera macchina; da qui una sovrastima dei livelli di pressione sonora in ambiente.

Non si può infine trascurare il fatto che i diversi programmi hanno diversi parametri di inizializzazione che ne condizionano fortemente le modalità di funzionamento (numero di raggi generati, durata complessiva dell'ecogramma, ordine massimo di riflessione considerato, introduzione delle riflessioni diffuse, ecc.). La scelta tra le diverse opzioni avviene in maniera diversa per ogni programma e la scelta finale dei valori numerici è lasciata completamente all'operatore, il quale può solo basarsi sulle scarse e spesso ambigue informazioni fornite dal manuale. Valga per tutti l'esempio delle riflessioni diffuse, che sono trattate in maniera concettualmente differente, ma comunque sempre molto approssimativa, da tutti i programmi, in funzione dei valori numerici di qualche parametro ad hoc per il quale non esistono valori di riferimento consolidati.

Un dato interessante è stato fornito dal partecipante P4, il quale ha rifatto la simulazione dopo aver preso conoscenza della forte sovrastima del suo primo tentativo "alla cieca" (cfr. Fig. 5). Utilizzando lo stesso modello geometrico e gli stessi dati di input, ma cambiando la modellazione delle sorgenti sonore ed i coefficienti di assorbimento acustico, è riuscito ad abbassare la media delle deviazioni da 9.4 dB(A) a 2.7 dB(A), con uno scarto tipo di 2.1 dB(A). Ciò conferma che il problema dell'accuratezza non si risolve con la ricerca esasperata del dettaglio dei dati di input (che nella pratica non sono quasi mai reperibili tutti a stretto rigore di norma), ma piuttosto con un utilizzo consapevole dei dati disponibili.

## 9. Conclusioni

È stato condotto il primo RRT italiano sulla simulazione acustica negli ambienti industriali. L'operazione si è rivelata di estrema utilità in quanto ha permesso di avere indicazioni precise sull'affidabilità delle simulazioni come comunemente eseguite, confrontando diversi programmi ed operatori su di uno stesso caso reale.

L'analisi dei risultati secondo ISO 5725-2 ha dimostrato la consistenza statistica del RRT, tuttavia l'affidabilità delle simulazioni eseguite non è risultata soddisfacente: la media delle deviazioni tra livelli di pressione sonora in scala di ponderazione A simulati e misurati è di 4.4 dB(A) con uno scarto tipo di riproducibilità di 4.5 dB(A). Il fatto non deve indurre a considerazioni puramente negative, ma al contrario deve essere da stimolo al miglioramento delle simulazioni di questo tipo. La situazione è analoga a quella che si è verificata in passato con i primi RRT sui modelli di simulazione acustica degli ambienti chiusi [13] e del traffico stradale [14] che, partiti da risultati molto dispersi, hanno con il tempo e la ripetizione dei test mostrato un'affidabilità rapidamente crescente. L'esperienza maturata in questi settori affini dimostra come i RRT spingano i produttori di software a migliorare i loro prodotti e gli utilizzatori ad impiegarli in modo più consapevole. Al fine di innescare questo il circolo virtuoso, gli autori si propongono di ripetere il RRT in un prossimo futuro.

Al di là delle analisi statistiche, sono emersi alcuni punti chiave nella messa a punto del modello che la pratica comune tende a sottovalutare, quale per esempio una efficace definizione degli ingombri e delle loro caratteristiche di diffusione e assorbimento. Globalmente il RRT ha messo in evidenza la necessità di un chiaro protocollo operativo che specifichi quali sono le operazioni im-

portanti – e come vadano eseguite - nelle diverse fasi di costruzione del modello geometrico, della sua messa a punto e della sua inizializzazione parametrica in un ambiente di simulazione acustica.

## Ringraziamenti

Gli autori desiderano ringraziare la Camera di Commercio, Industria, Artigianato e Agricoltura di Modena, ed in particolare il Dott. Maurizio Campagnano, per il supporto economico ed organizzativo fornito alla presente ricerca.

Un sentito ringraziamento va poi ai partecipanti al RRT, che hanno messo il loro tempo e la loro esperienza al servizio di un progetto di ricerca che si spera possa essere utile a tutti gli acustici italiani.

## Bibliografia

- [1] Bianchi F. (1974), Nuovi criteri per la progettazione dei trattamenti di insonorizzazione dei grandi ambienti industriali, *Atti 2° Convegno A.I.A.*, Torino.
- [2] Farina A., Fornari G. (1998), Studio della propagazione del rumore in ambienti industriali bassi e vasti, *Atti Convegno dBA98*, Modena, 249-257.
- [3] Heerema N., Hodgson M. (1999), Empirical models for predicting noise levels, reverberation times and fitting densities in industrial workrooms, *Applied Acoustics*, **59**, 51-60.
- [4] Hodgson M. (2003), Ray-tracing evaluation of empirical models for predicting noise in industrial workshops, *Applied Acoustics*, **64**, 1033-1048.
- [5] Garai M. (2005), Modelli di previsione, schermature e trattamenti fonoassorbenti (relazione ad invito), Atti del Seminario: *Riduzione del rumore negli stabilimenti industriali: previsione, propagazione, disposizione delle macchine, schermature e trattamenti fonoassorbenti* tenuto nell'ambito del 32o Convegno A.I.A., Ancona, 3-33.
- [6] Garai M. (2001), Acustica geometrica e modelli di simulazione, in: *Manuale di acustica applicata* (a cura di Spagnolo R.), UTET Libreria, Torino.
- [7] 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*.
- [8] 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.
- [9] UNI EN ISO 14257:2001, *Acustica – Misurazione e descrizione parametrica delle curve di distribuzione spaziale del suono negli ambienti di lavoro per la valutazione della loro prestazione acustica*.
- [10] UNI EN ISO 3744:1994, *Acustica – Determinazione dei livelli di potenza sonora delle sorgenti di rumore mediante pressione sonora – Metodo tecnico-progettuale in un campo essenzialmente libero su un piano riflettente*.
- [11] UNI EN ISO 3746:1995, *Acustica – Determinazione dei livelli di potenza sonora delle sorgenti di rumore mediante pressione sonora – Metodo di controllo con una superficie avvolgente su un piano riflettente*.
- [12] ISO 5725-2:1994, *Accuracy (trueness and precision) of measurement methods and results – Part 2: Basic method for the determination repeatability and reproducibility of standard measurement method*.
- [13] Vorländer M. (1995), International round robin on room acoustical computer simulation, *Proc. 15<sup>th</sup> I.C.A.*, Trondheim, 689-692.
- [14] Pompili R. (a cura di) (1989), Atti del Seminario: *Metodi numerici di previsione del rumore da traffico* tenuto nell'ambito del 17° Convegno A.I.A., Parma.