



**AUDIO ENGINEERING SOCIETY**  
Italian Section

**ANNUAL MEETING 2007**

**Paper: 07001**

**Parma, 23-25 November**  
**“Casa della Musica”**

## CARATTERIZZAZIONE DELL'UNIFORMITÀ DI DIFFUSIONE DI PANNELLI FONO-DIFFONDENTI

LORENZO RIZZI<sup>1</sup>, ANGELO FARINA<sup>2</sup>, PAOLO GALAVERNA<sup>3</sup>, ANDREA ROSATI<sup>3</sup>  
PAOLO MARTIGNON<sup>1</sup>, LORENZO CONTI<sup>1</sup>

<sup>1</sup> *Laboratorio di Acustica ed Elettroacustica, Parma, Italy*

[rizzi@laegroup.org](mailto:rizzi@laegroup.org)

<sup>2</sup> *Università degli Studi di Parma, Parma, Italy*

[farina@unipr.it](mailto:farina@unipr.it)

<sup>3</sup> *Genesis Acoustic Workshop, Parma, Italy*

[p.galaverna@genesis-aw.com](mailto:p.galaverna@genesis-aw.com); [a.rosati@genesis-aw.com](mailto:a.rosati@genesis-aw.com)

Un team del LAE studia dal 2005 il fenomeno della riflessione diffusa data da pannelli specifici presi singolarmente e a coppie. Partendo dai lavori pregressi dell'università di Parma, dalla letteratura scientifica e dagli standard di misura esistenti è stata selezionata la catena necessaria e la si è posta in un ambiente sufficientemente grande da poter studiare solo la prima riflessione restituita dai pannelli. L'articolo mostra i risultati principali della ricerca sottolineando le innovazioni proposte e discutendo alcune ulteriori potenzialità del sistema di misura. Esso permette infatti di visualizzare l'effetto di bordo, la diffrazione e infine il particolare pattern di riflessione dato dai pannelli forati.

### INTRODUZIONE

Nel bilancio energetico dell'onda incidente su una discontinuità di impedenza la componente riflessa può essere scomposta: una parte viene definita speculare, ovvero come in uno specchio sarà riflessa nella direzione simmetrica rispetto alla normale alla superficie (vedi legge di Snell) a quella di arrivo, e parte viene definita diffusa, perché re-indirizzata in tutte le direzioni, un'ultima parte può essere detta più generalmente assorbita nel mezzo. Le percentuali in cui si distribuisce l'energia nei tre fenomeni dipende dalla natura del materiale investito dall'onda sonora. La figura 1 esemplifica quanto appena spiegato.

Quanto detto può essere riassunto nell'equazione del bilancio energetico :

$$E_{tot} = E_i = E_a + E_r = E_a + E_{spec} + E_{diff} \quad (1)$$

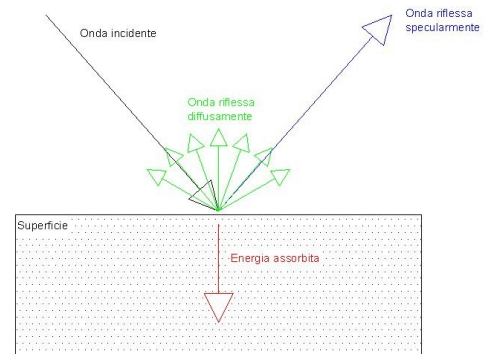


Figura 1.

Dividendo i termini per l'energia totale si possono definire i vari coefficienti coinvolti:

$$1 = \alpha + \rho_{spec} + \rho_{diff} \quad (2)$$

Guardando la parte a destra dell'ultima equazione, il primo è il coefficiente di assorbimento apparente, il

secondo è il coefficiente di riflessione speculare; il terzo è il coefficiente energetico di diffusione, detto comunemente di scattering.

L'argomento è di grande interesse per il mondo dell'acustica architettonica. Un campo sonoro diffuso è desiderato nelle stanze dedicate all'ascolto e all'esecuzione della musica.

Il campo sonoro è detto infatti diffuso quando c'è equiprobabilità di arrivo su tutte le direzioni (non esistono direzioni d'arrivo preferenziali) come riscontrato in tutti i migliori teatri del mondo ed è considerato piacevole, avvolgente, sia dagli ascoltatori sia dai musicisti.

Diventa quindi fondamentale caratterizzare e modellare correttamente il comportamento dei materiali e dei pannelli esistenti per eseguire una progettazione adeguata.

## 1 METODI DI MISURA DELLA RIFLESSIONE DIFFUSA, STUDI PASSATI.

Il coefficiente energetico s appena introdotto è stato studiato a lungo dal prof. Voerlander [1] e altri negli anni '90 e il loro lavoro è sfociato nella redazione della norma ISO 17497-1 [2] che specifica il metodo per misurarlo.

Un team anglo-americano, guidato da Cox e D'Antonio [3, 4], ha studiato nello stesso periodo storico il fenomeno per definire un coefficiente che lo descrivesse da un punto di vista più qualitativo. Ciò è stato fatto guardando la distribuzione spaziale delle onde riflesse in maniera diffusa, si è così definito un coefficiente di uniforme diffusione e l'analisi è stata normata nello standard AES-4id-2001 [5], in via di traduzione nella seconda parte della ISO 17497.

Alla fine degli anni '90 si svolsero a Parma alcuni studi pionieristici sull'argomento [6, 7] si utilizzò un array microfonic sintetico (in Figura 2 la sorgente nel pavimento, il pannello appeso e la linea percorsa dal microfono trascinato in posizioni a distanza costante) e una tecnica di visualizzazione chiamata Wave Field Analysis [11] che mostrava chiaramente i fronti d'onda coinvolti nelle analisi.

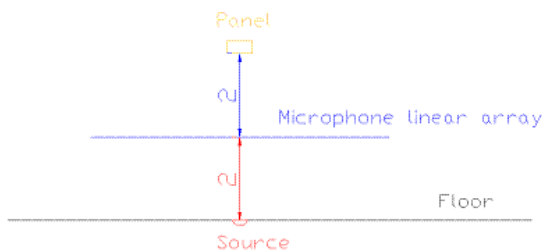


Figura 2.

Nella figura seguente si osserva l'applicazione di tale tecnica ai dati raccolti: in alto il fronte d'onda diretto e sotto quello riflesso, esso cambia a seconda della natura del pannello in esame (rispettivamente: un pannello piatto, uno diffondente e uno semicilindrico).

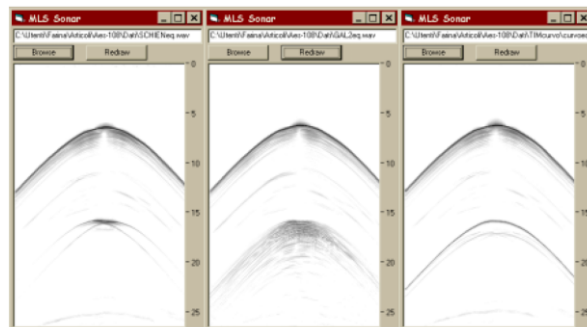


Figura 3.

## 2 STUDI RECENTI: L'UNIFORMITÀ DI DIFFUSIONE

Nel 2005 si è ripreso il filo scientifico lasciato nel 2000: un team del Laboratorio di Acustica ed Electroacustica (LAE) e dell'Università ha eseguito delle nuove campagne di misura, volte ad applicare lo standard AES e a indagare nei dettagli il fenomeno. La ricerca ha prodotto 3 articoli scientifici [9, 12, 13]

Come suggerito dal documento sopraccitato sono state eseguite le misure in un ambiente molto grande, in modo che le prime riflessioni ambientali fossero ben ritardate rispetto alla prima riflessione da parte dei pannelli oggetto di studio e quindi finestrabili nel tempo.

I microfoni, i pannelli sotto esame e la sorgente sono stati posti su una superficie molto riflettente e disposti su un semicerchio centrato sul pannello per studiare così la riflessione sonora nello spazio semicilindrico davanti al pannello stesso.

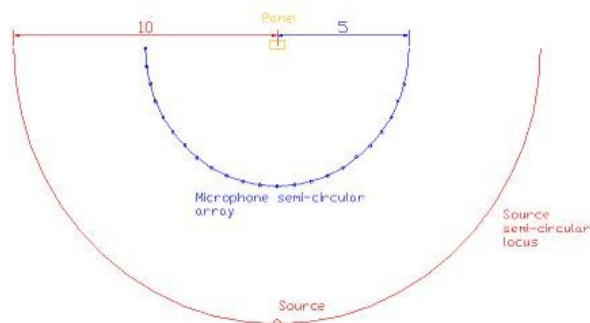


Figura 4.

L'hardware selezionato per la catena di misura è stato:

- 24 microfoni Bruel&Kjaer 4188 con pre-amplificatori 2671;
- 3 convertitori a 8 canali Behringer AD-DA 8000;
- 1 scheda sonora RME Hammerfall DIGI9652;
- 1 altoparlante Turbosound TQ440.



Figura 5.

Nella figura 5 si può osservare un pannello semicilindrico mentre viene irradiato da una sorgente posta davanti al pannello stesso: si notino i microfoni posti a semicerchio e le grandi dimensioni dello spazio (un capannone fieristico).

Presi i livelli sonori  $L_i$  in terze d'ottava per ogni microfono, si studia la loro distribuzione sul semicerchio di misura per ogni direzione d'arrivo  $\varphi$ .

$$d_\varphi = \frac{\left( \sum_{i=1}^N 10^{L_i/10} \right)^2 - \sum_{i=1}^N \left( 10^{L_i/10} \right)^2}{(N-1) \sum_{i=1}^N \left( 10^{L_i/10} \right)^2} \quad (3)$$

Questo coefficiente indicherà per ogni banda di terzo d'ottava di frequenza quanto la distribuzione spaziale della riflessione sia uniforme (vicina all'omnidirezionalità nel semispazio offerta da un pannello semicilindrico e quindi diffusa) o concentrata su una direzione sola, ovvero speculare. Esso assegna un valore pari a 1 nel primo caso, e nullo nel secondo. Mediando il risultato ottenuto su più direzioni d'incidenza si otterrà il coefficiente per incidenza casuale  $d$ , caratterizzante l'uniformità di diffusione del pannello e definito anche coefficiente direzionale di diffusione.

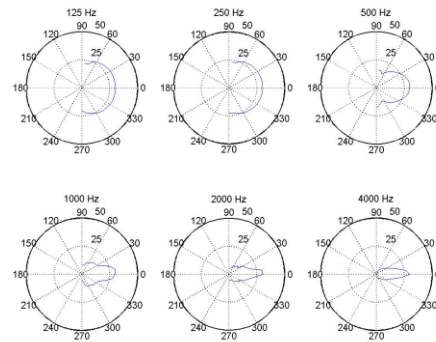


Figura 6.

In figura 6 si vedono i diagrammi polari della distribuzione spaziale della riflessione sonora di un pannello piatto quando il suono incide alla sua normale ( $0^\circ$ ). Tali diagrammi sono utili allo studio e alla caratterizzazione dei pannelli e si ottengono facilmente durante le elaborazioni necessarie a estrapolare i valori del coefficiente  $d$  di cui si sta discutendo.

In questo caso si nota chiaramente che mentre a bassa e a media frequenza la risposta è omnidirezionale, ad alta frequenza essa è fortemente direzionale, come atteso da un pannello largo 70 cm circa e quindi diffrangente a bassa e media frequenza.

### 3 PERFEZIONAMENTO DEL SISTEMA DI MISURA E DI ANALISI.

Nei due anni di studio sono state inserite numerose innovazioni al sistema di misura proposto dal documento AES e nuovi strumenti di elaborazione e di analisi dei dati: si riportano di seguito i principali e si rimanda alla bibliografia per l'approfondimento di tali argomenti.

#### 3.1 Scelta del segnale.

Durante la visita preliminare è stato misurato il tempo di riverbero dello spazio (Figura 7), fondamentale per decidere la lunghezza del segnale MLS pseudocasuale richiesto nel documento AES: esso deve essere infatti più lungo del riverbero per evitare aliasing temporale.

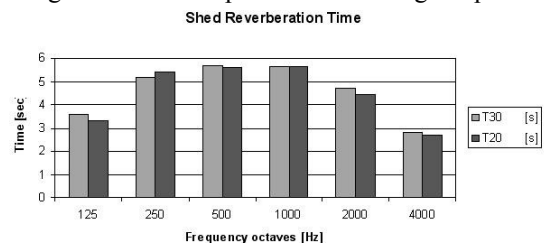


Figura 7.

Lavorando con una frequenza di campionamento pari a 48 KHz è necessario, per un ambiente così riverberante, un ordine pari a 19, ovvero di 11 secondi di durata. Dato che il metodo necessita una mediatura su almeno 5 ripetizioni, si calcolano 55 secondi di misura per ogni posizione.

Ciò ha suggerito di sperimentare l'uso del metodo di misura della risposta all'impulso tramite sine sweep [10], in questo caso è necessaria una sola sweepata di 10 secondi, per una durata della singola misura di circa 15 secondi. Il sistema è stato implementato rapidamente con l'utilizzo di Aurora ([www.aurora-plugins.com](http://www.aurora-plugins.com)).

I risultati come si vedrà sono stati notevoli, in primis si è risparmiato circa il 60% del tempo nelle operazioni di misura, si è poi reiettato il notevole rumore di fondo presente nel capannone (Leq = 45 dB(A) causati dall'autostrada A1 passante in sua prossimità).

Il suo utilizzo è stato raccomandato alle commissioni preposte (si legga per esempio in rete [8]).

### 3.2 Studio dell'arrivo dell'onda

L'utilizzo della tecnica WFA [11] ha permesso di sottolineare l'importanza dell'effetto di bordo come 'delimitatore' dell'onda riflessa in pannelli dagli angoli laterali ben definiti, quali i pannelli a forma di parallelepipedo.

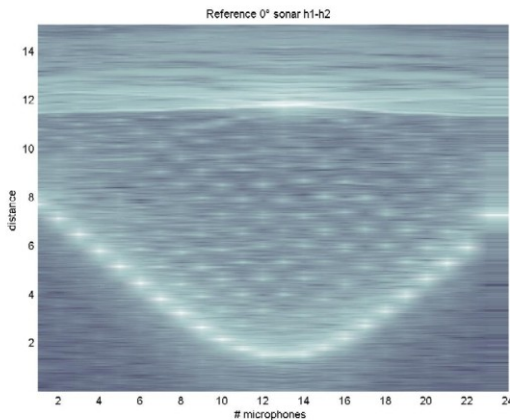


Figura 8.

Rispetto agli studi del 1999-2000 (Figura 2) si è ribaltato il verso di osservazione del fenomeno, in Figura 8 si nota il fronte diretto in basso e quello riflesso in alto: è interessante notare come esso non sia perfettamente orizzontale come prevedibile da un pannello semicircolare, ma si formi una forma 'a caramella' tipica dell'effetto di bordo.

Ponendo delle sorgenti omnidirezionali ideali sugli angoli del pannello si può prevedere il fronte d'arrivo

dell'onda riflessa (equazione 4) all'array microfonico semicircolare:

$$r_{reflected} = \min[ \sqrt{(2r \cos \varphi)^2 + (2 \sin \varphi \mp x)^2} + \sqrt{(r \cos \theta)^2 + (r \sin \theta \pm c)^2} ] \quad (4)$$

dove:

- r raggio dell'array semicircolare
- x metà del la larghezza del pannello
- θ angolo di osservazione
- φ angolo di incidenza del suono sul pannello.

In Figura 9 si nota la perfetta coincidenza tra il fronte d'onda misurato e quello predetto col modello geometrico appena descritto: questa coincidenza è stata utilizzata per realizzare delle migliori finestre temporali e ottimizzare l'acquisizione di onde energeticamente comparabili, e conferma l'intuizione già avuta da Angelo Farina nella modellizzazione fisica pubblicata nel 1999 per il programma Ramsete [6, 14].

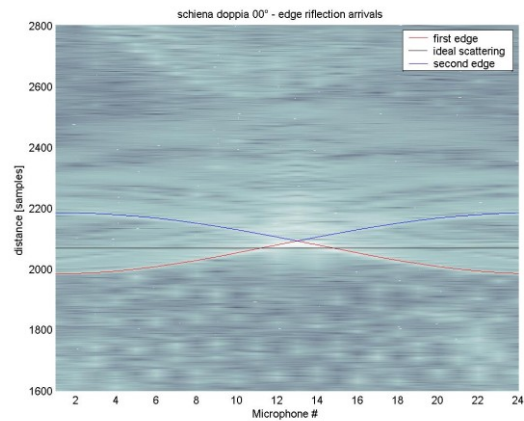


Figura 9.

Il metodo di visualizzazione si è dimostrato essere un utilissimo strumento di verifica e controllo delle misure grezze ed è stato proposto in quanto tale [8].

## 4 RISULTATI DELLE ANALISI.

Il sistema di misura ha permesso di verificare i risultati degli studi precedenti [9], studiare il comportamento di pannelli specifici, ma anche di approfondire alcuni fenomeni fisici non esplicitamente previsti o sottolineati dalla letteratura finora.

#### 4.1 Diffusione da parte di pannelli singoli.

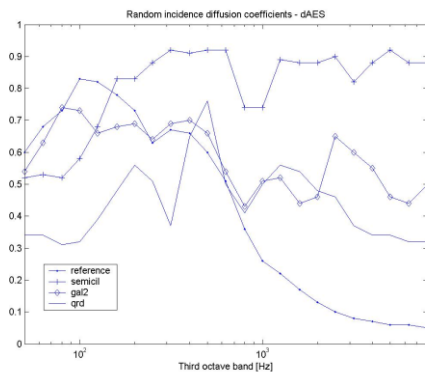


Figura 10.

In Figura 10 si caratterizzano tramite il coefficiente di uniforme diffusione quattro tipi di pannello:

- il pannello piatto di riferimento (reference) mostra una uniformità di diffusione bassa ad alta frequenza, come atteso anche guardando i grafici polari in Figura 4;
- il pannello semicilindrico, mostra il risultato migliore, come prevedibile;
- il pannello galav2 progettato a Parma, ha un buon risultato su tutto lo spettro in esame;
- il classico pannello diffondente QRD a numero 7, ha un forte picco nella sua frequenza di progetto.

Il paragone con i dati del vecchio metodo che utilizzava un array microfonico rettilineo ha dato risultati soddisfacenti [10].

#### 4.2 Diffusione delle coppie di pannelli.

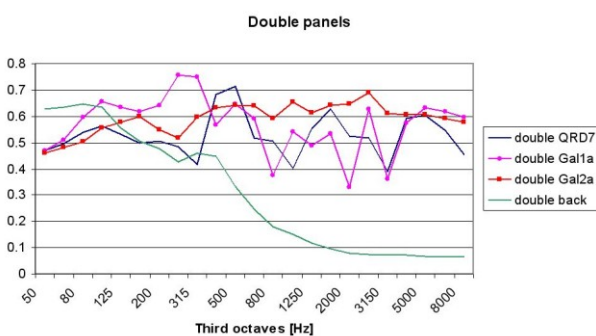


Figura 11.

Il paragone su coppie di pannelli identici (Figura 11) è stato l'oggetto della seconda parte dello studio [12, 13] e necessario in quanto più realistico nelle applicazioni nelle stanze acusticamente piccole.

I risultati sono simili a quelli visti nel caso di pannelli singoli: spiccano i due pannelli Galav progettati a Parma, il tipo 1 perché ben uniforme su una larga banda di frequenza, il tipo 2 perché avente un picco a bassa frequenza unico per pannelli di dimensione così limitata (circa 70 x 70 x 30 cm).

#### 4.3 Studio della diffrazione.

Il risultato ottenuto dal pannello di tipo 1 acquista un maggior senso analizzando il fenomeno della diffrazione già esposto all'inizio del presente articolo.

Si è osservato il comportamento diffondente della singola e della doppia schiena liscia dei pannelli galav (i pannelli di riferimento del presente studio).

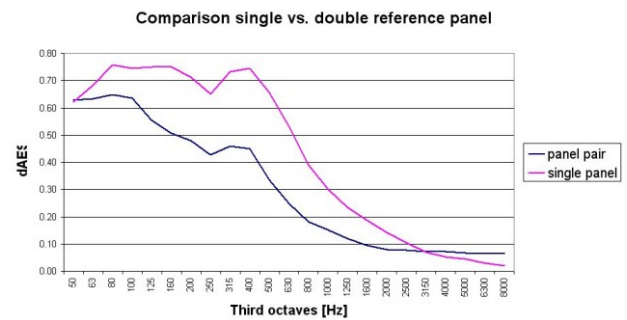


Figura 12.

Come per altri pannelli a forma 'a parallelepipedo' si è notata la forte correlazione fra i massimi del coefficiente di uniforme diffusione e le dimensioni geometriche dei pannelli. Nel caso del pannello parmense il massimo di diffusione si colloca al di sotto del limite fisico legato alla diffrazione dimostrando il successo del target progettuale originario.

Panel name	Width [mm]	f1 [Hz]	Depth [mm]	f2 [Hz]	F max1	F max2
Single reference	720	119.4	260	330.8	80-160	315-400
Double reference	1440	59.7	260	330.8	50-100	315-400

Tabella 1.

#### 4.4 Riflessione da parte del pannello forato.

Lo studio dei pannelli forati è partito dall'osservazione dei primi risultati, che mostrano una vibrazione ben marcata, posta fra i picchi dati dai due bordi dei pannelli (Figura 13a).



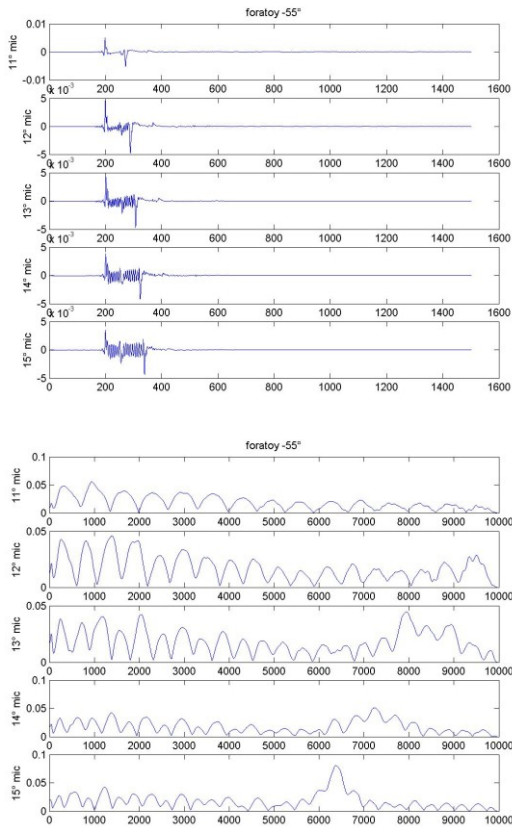


Figura 13 a - b.

Osservando il fenomeno in frequenza si è notato che la vibrazione è localizzata in una banda stretta e che si muove in frequenza a seconda dell'angolo di osservazione (o di ricezione). In Figura 13b si nota la trasposizione dal tempo alla frequenza, le prime 5 righe corrispondono a quanto osservato nella doppia figura precedente.

L'analisi spaziale del fenomeno con una discontinuità prossima all'angolo a 45° ha fatto intuire un comportamento simile agli array di sorgenti

FORATOY – 55°		
Mic #	Fmax	Theta
11	--	---
12	9.50E+03	-7.5
<b>13</b>	<b>7.95E+03</b>	<b>0</b>
14	7.23E+03	7.5
15	6.38E+03	15
16	5.77E+03	22.5
17	5.25E+03	30
18	4.83E+03	37.5
19	4.57E+03	45
20	8.65E+03	52.5
21	8.27E+03	60
22	7.97E+03	67.5
23	7.78E+03	75
24	7.70E+03	82.5

Tabella 2.

Si è quindi scritto un modello matematico-fisico di un array di sorgenti sferiche omnidirezionali uguale in dimensione alla disposizione dei fori sulla superficie del pannello:

$$p = \frac{\rho_v k c (4\pi i^2 \hat{u})}{4\pi \cdot r} \sum_i \sum_j e^{-jkx_{i,j}} e^{-jky_{i,j}} \quad (5)$$

Dove:

- a raggio della sorgente (raggio del foro)
- u velocità superficiale (modulo = 0.1 m/sec)
- r distanza dall'array di ricezione = 5 m
- i colonna della matrice
- j riga della matrice
- $x_{i,j}$  distanza tra sorgente e ciascun foro (ritardo di emissione)
- $y_{i,j}$  distanza tra i fori e il semicerchio di ricezione (1000 punti di osservazione)

I risultati del modello sono mostrati in Figura 14: danno valori pressoché identici a quelli osservati e riportati nella tabella precedente, si nota il diminuire della posizione angolare del lobo di emissione principale al crescere della frequenza e la formazione di un lobo secondario ad alta frequenza che giustifica la discontinuità osservata.

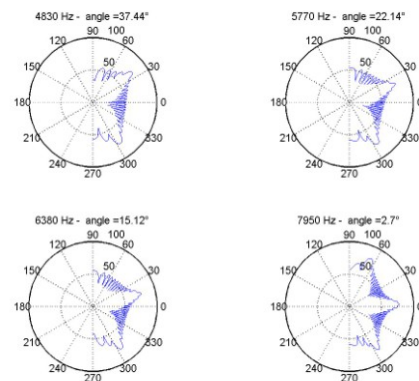


Figura 14.

## 5 CONCLUSIONI.

Le campagne di misure e gli studi conseguenti effettuati nei due anni passati hanno permesso di approfondire numerosi aspetti del metodo di misura e della definizione stessa dell'uniformità di diffusione. I risultati sono validi e incoraggianti, tanto da decidere di proporre delle migliorie agli standard internazionali nascenti e in corso di definizione o ridiscussione.

Lo scopo di studi successivi sarà la continuazione dell'osservazione e la definizione dei fenomeni fisici correlati alla diffusione, la misura e lo studio di nuove forme, sia di realizzazione interna che per conto terzi.

Si ringrazia l'ing. Alfieri delle Fiere di Parma per aver messo a disposizione degli spazi utili a eseguire le misure.

## 6 BIBLIOGRAFIA

- [1] Michael Vörlander, Eckard Mommertz, Definition and measurement of random incidence scattering coefficients, *Applied Acoustics* 60 (2000) 187-199
- [2] ISO 17497 – 1:2004 - Acoustics -- Sound-scattering properties of surfaces -- Part 1: Measurement of the random-incidence scattering coefficient in a reverberation room
- [3] Peter D'Antonio, Trevor Cox, Two decades of sound diffusor design and development. Part 1 and 2, *JAES Volume 46 Number 11-12 pp 955-976; 1075-1091 November-December 1998*
- [4] Peter D'Antonio, The Directional Scattering Coefficient: Experimental Determination, *JAES Volume 40 Number 12 pp. 997-1017, December 1992.*
- [5] AES-4id-2001, AES information document for room acoustics and sound reinforcement systems - Characterization and measurement of surface scattering uniformity.
- [6] Angelo Farina, Michele Zanolin, Elisa Crema, Measurement of sound scattering properties of diffusive panels through the Wave Field Synthesis approach, 108th AES Convention, Paris 18-22 February 2000.
- [7] Angelo Farina, Measurement of the surface scattering coefficient: comparison of the Mommertz/Vorländer approach with the new Wave Field Synthesis method, *International Symposium on Surface Diffusion in Room Acoustics - Liverpool (GB) 16 April 2000.*
- [8] Angelo Farina, Lorenzo Rizzi, Comments on reaffirmation AES-4id-2001 [http://www.aes.org/standards/b\\_comments/comments-reaffirm-aes-4id.cfm](http://www.aes.org/standards/b_comments/comments-reaffirm-aes-4id.cfm)
- [9] Lorenzo Rizzi, Angelo Farina, Paolo Galaverna et al., Surface scattering uniformity measurement in reflection free environments, 121st AES Convention, San Francisco, 5-8 October 2006, Convention Paper 6922
- [10] Angelo Farina, Simultaneous Measurement of Impulse response and distortion with swept sine technique, 108th AES Convention, JAES (Abstracts) volume 48 p 350, April 2000, preprint 5093
- [11] D. de Vries et al., Array Technology for measurement and analysis of sound fields in enclosures – Pre-prints of the 101th AES convention #4266, May 1996
- [12] Lorenzo Rizzi, Angelo Farina, Paolo Galaverna et al., Study of scattering panel pairs in virtually anechoic environments . 19th International Congress of Acoustics, Madrid, September 2007
- [13] Lorenzo Rizzi, Angelo Farina, Paolo Galaverna et al., Scattering uniformity measurements and first reflection analysis in a large non-anechoic environment, 123st AES Convention, New York, 5-8 October 2007, Convention Paper 7241
- [14] RAMSETE: Room Acoustic Modelling on PC [www.ramsete.com](http://www.ramsete.com)



Lorenzo Rizzi si è laureato in Ingegneria delle Telecomunicazioni al Politecnico di Milano nel 2000 e ha conseguito un Master of Science in Audio Acoustics presso l'università di Salford (UK) nel 2002; da allora si occupa di consulenza acustica in genere, di divulgazione tecnico-scientifica (fonda il sito suonoevita.it) e di progettazione di studi e stanze per la musica. Collabora con il gruppo LAE di Parma dal 2005 occupandosi di acustica architettonica. E' chitarrista rock per diletto.