

Caratterizzazione dell'uniformità di diffusione di pannelli fono-diffondenti.

Lorenzo Rizzi¹, Angelo Farina², Paolo Galaverna³, Andrea Rosati³,
Paolo Martignon¹, Lorenzo Conti¹

¹ LAE - Laboratorio di Acustica ed Elettroacustica, Parma, Italy (rizzi@laegroup.org);

² Dipartimento di Ingegneria Industriale, Università di Parma, Italy

farina@pcfarina.eng.unipr.it

³ Genesis Acoustic Workshop, Parma, Italy (p.galaverna@genesis-aw.com ;

a.rosati@genesis-aw.com)

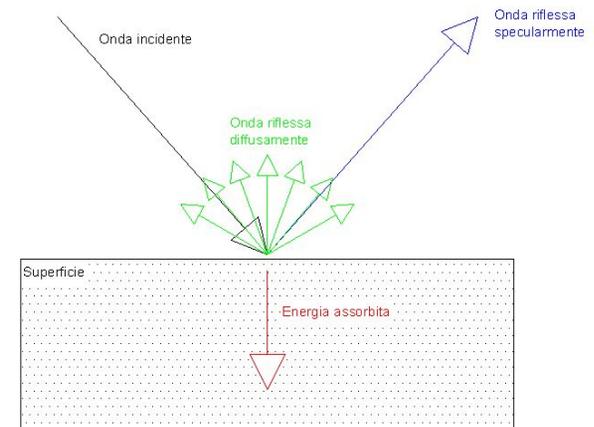
Bilancio energetico di un' onda sonora incidente su una superficie.

L'energia sonora incidente su qualsiasi superficie può essere suddivisa in prima approssimazione in tre componenti:

Una parte sarà apparentemente **assorbita** dal materiale (convertita in calore e trasmessa al di là del materiale);

Una parte sarà **riflessa in direzione speculare** (come descritto da Snell nella legge dell' ottica);

Una parte sarà **riflessa in modo diffuso** (ovvero in tutte le direzioni).



$$E_{tot} = E_i = E_a + E_r = E_a + E_{spec} + E_{diff}$$

Coefficienti energetici.

Con questo modello semplificato si definiscono tre coefficienti energetici adimensionali.

$$1 = a + r_{spec} + s$$

L'ultimo è oggi di nostro interesse ed è definito ***coefficiente di scatter***.

Nell'acustica architettonica è fondamentale caratterizzare il modo in cui si distribuisce l'energia riflessa: **un campo sonoro diffuso è desiderato e cercato in molti ambienti dedicati alla musica** (teatri, sale ripresa, sale prove...) perché percepito come piacevole da musicisti e ascoltatori.

Metodi di misura del fenomeno di scatter.

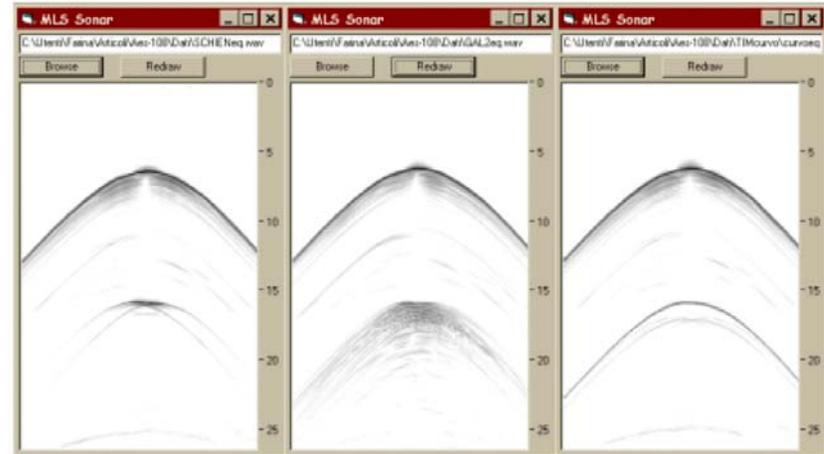
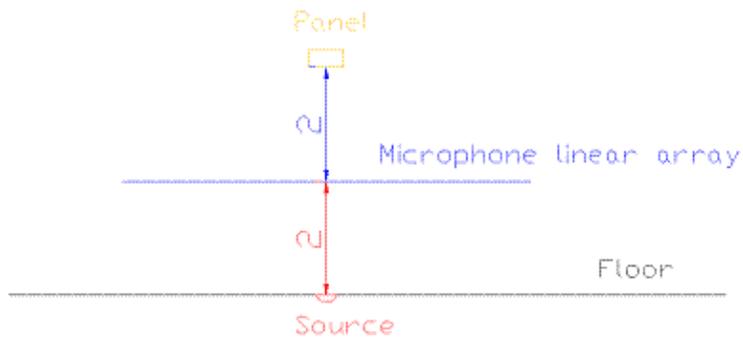
Negli anni '90 ci fu il maggior impegno di approfondimento e sintesi per la caratterizzazione del fenomeno di scatter:

- Il modello appena descritto è stato approfondito da Voerlander ed è sfociato nel metodo descritto dalla ISO 17497-1;
- Un secondo metodo di studiare il fenomeno analizza la distribuzione spaziale dell'onda riflessa (Cox e D'Antonio) ed è stato codificato nel documento AES 4id-2001 (in via di traduzione nella ISO 17497-2);
- Un team dell'università di Parma ha studiato i fenomeni con tecniche innovative e originali per l'epoca tra il '99 e il 2000.

Studi pregressi a Parma.

Il sistema di osservazione prevedeva in primis l'utilizzo di un array microfonico **sintetico** (un singolo microfono trascinato su una linea retta a intervalli costanti), con il pannello appeso per aria in un ambiente di grande volume.

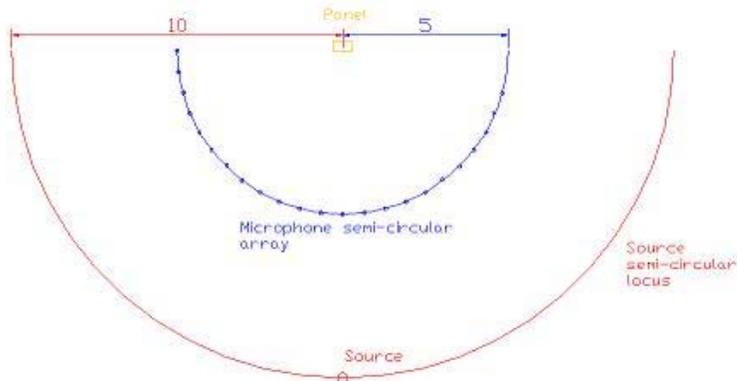
Il sistema di analisi applicava la tecnica denominata **Wave Field Analysis** (De Vries et al.) : ciò ha permesso di vedere in dettaglio la natura delle onde riflesse.



Applicazione dell'AES-4id-2001

Nel 2005 si è ripreso il filo degli studi precedenti e si è deciso di applicare e studiare la raccomandazione tecnica AES:

- Microfoni posti su una superficie riflettente in uno spazio di grandi dimensioni per poter **finestrare** temporalmente la prima riflessione;
- Microfoni posti a semicerchio intorno ai pannelli per studiare la **geometria** della riflessione.



Il coefficiente direzionale di diffusione (d).

Il coefficiente di diffusione è un valore qualitativo: dice quanto è uniforme, ovvero vicino all'omnidirezionalità, il pattern geometrico della riflessione data da pannelli di dimensioni limitate.

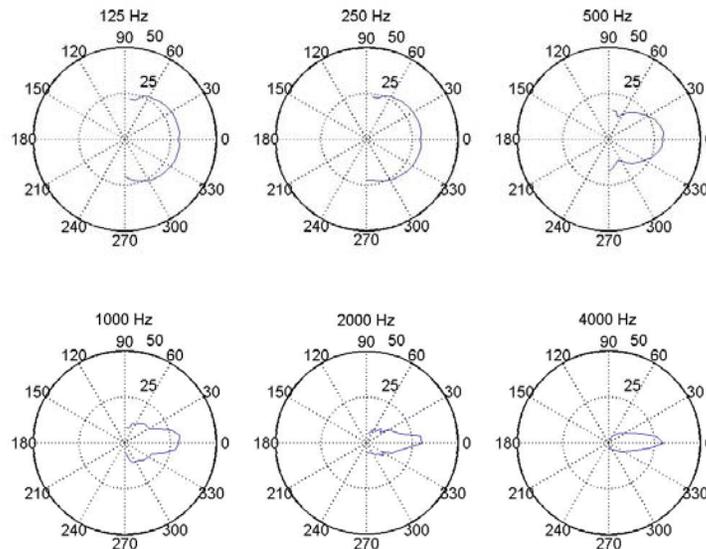
Assegna un valore pari a **1 alla perfetta diffusione** (ottenibile con un semicilindro) e **0 alla totale specularità di riflessione**.

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

Il coefficiente per incidenza casuale **d** viene ottenuto mediando i risultati su più direzioni d'arrivo.

Grafici polari: distribuzione geometrica della riflessione

Si elaborano i livelli sonori presi dai singoli microfoni dell'array in terze d'ottava e in ottave, ottenendo anche degli utili **diagrammi polari** (p.e. un pannello piatto 'illuminato' dalla direzione normale).

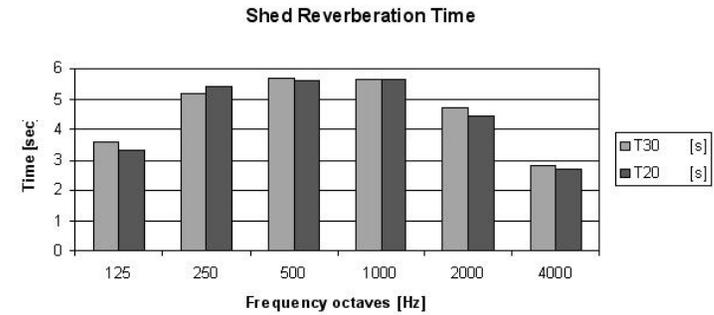


Risultati degli studi.

- Effettuate circa 340 misure a 24 canali in 2 campagne di misura;
- Usati sistemi di osservazione sperimentali per osservare gli effetti nel campo vicino.
- 3 articoli scientifici presentati a convegni internazionali in 2 anni.
- Oggi si riassumono le innovazioni principali portate al sistema di acquisizione ed elaborazione dei dati.
- Si descrivono infine i risultati e le osservazioni maggiormente degne di nota e si consiglia di leggere i tre articoli e la bibliografia per approfondimenti.

Modifiche al sistema di misura: il segnale d'indagine.

Lo spazio scelto per le misure mostrava un tempo di riverbero lungo ($T_{60} = 5.5$ sec) e un rumore di fondo alto ($L_{eq} = 45$ dB(A))

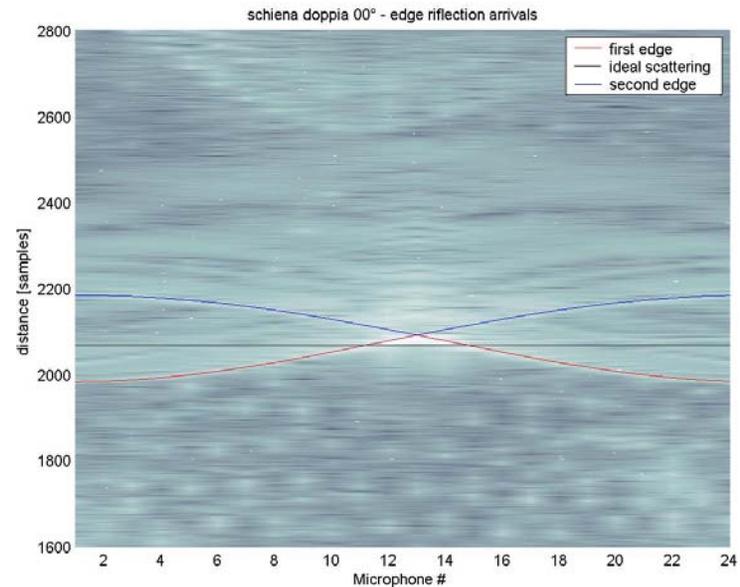


- Il documento richiedeva di usare la tecnica **MLS**: si è calcolato quindi un segnale di ordine 19, lungo 11 secondi, stimando un tempo di misura singola superiore a 55 secondi per permettere mediatura;
- Si è quindi utilizzata una **singola sweepata esponenziale** lunga 15 secondi (generata tramite Aurora – www.aurora-plugins.com);
- Ciò ha permesso di **risparmiare circa il 60% del tempo di misura reiettando il rumore di fondo.**

Studio del fronte d'onda riflessa.

- La tecnica **WFA** si è dimostrata ancora una volta un utile strumento di osservazione e verifica;
- **Modello dell'onda riflessa** pone idealmente due sorgenti omnidirezionali sui bordi del pannello;
- Ciò ha permesso l'ottimizzazione della finestrazione temporale;
- Conferma di modelli fisici precedenti.

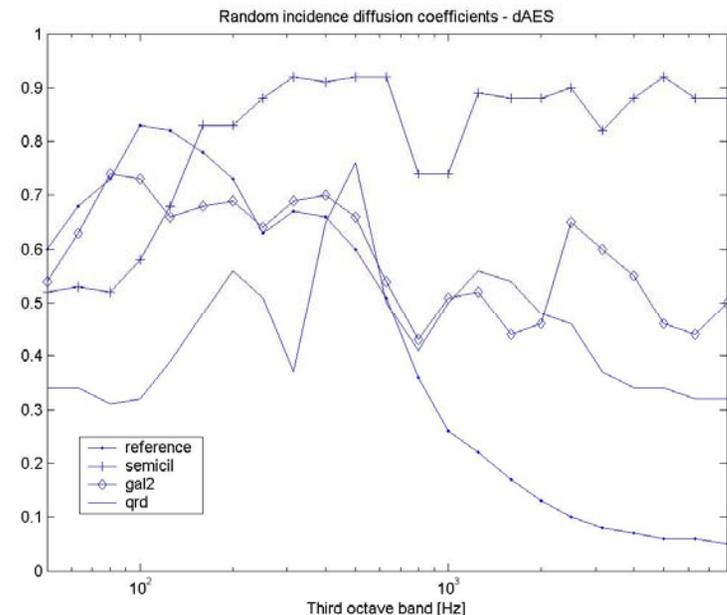
$$r_{reflected} = \min[\sqrt{(2r \cos \varphi)^2 + (2 \sin \varphi \mp x)^2} + \sqrt{(r \cos \theta)^2 + (r \sin \theta \pm x)^2}]$$



Risultati delle analisi: Misure su singoli pannelli.

Si è iniziato dallo studio dei singoli pannelli:

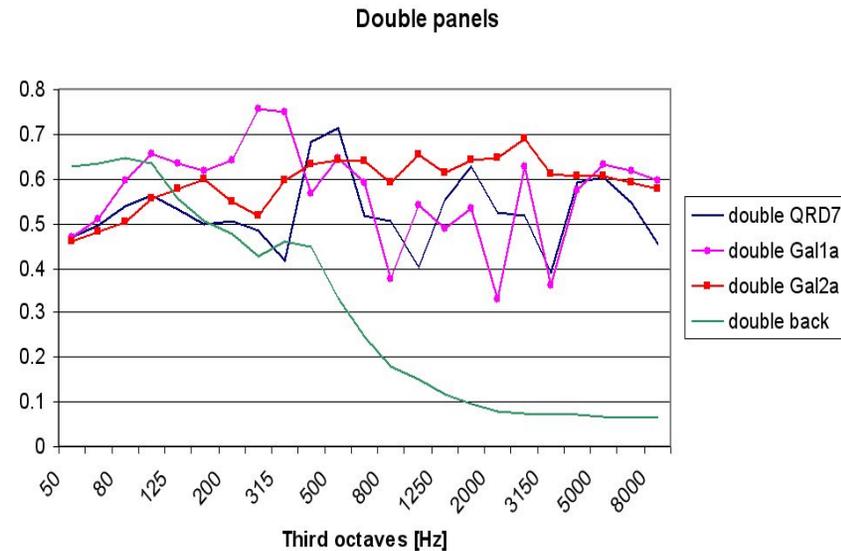
- Conferma dei risultati degli studi Parmensi del 1999-2000;
- Pannello piatto di riferimento è effettivamente sempre più speculare al crescere della frequenza;
- Semicilindro è il più uniforme;
- Pannello Galav2 da buoni risultati, soprattutto se paragonato al QRD7.



Risultati delle analisi: Misure su coppie pannelli.

Si è continuato con lo studio di coppie di pannelli (per maggior realismo di applicazione):

- Conferma degli andamenti già osservati per i singoli pannelli;
- Pannello piatto di riferimento è più speculare del caso singolo;
- QRD7 ha un massimo alla frequenza di disegno;
- Pannello Galav2 da ottimi risultati;
- Pannello Galav1 ha un massimo a bassa frequenza.

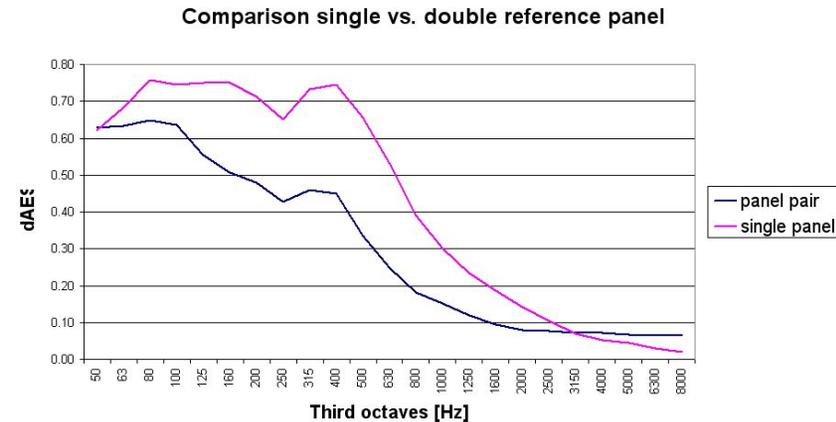


Il fenomeno della diffrazione.

L'analisi dei pannelli di riferimento (le schiene dei pannelli Galav) ha permesso di individuare i due massimi a bassa e media frequenza e di correlarli alle dimensioni geometriche degli stessi (in tabella).

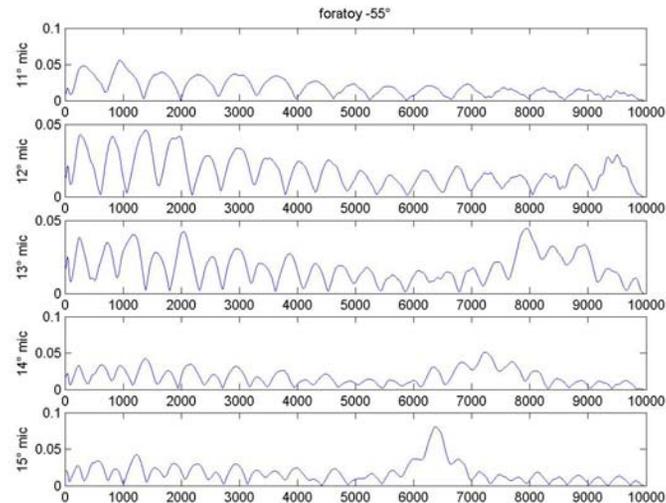
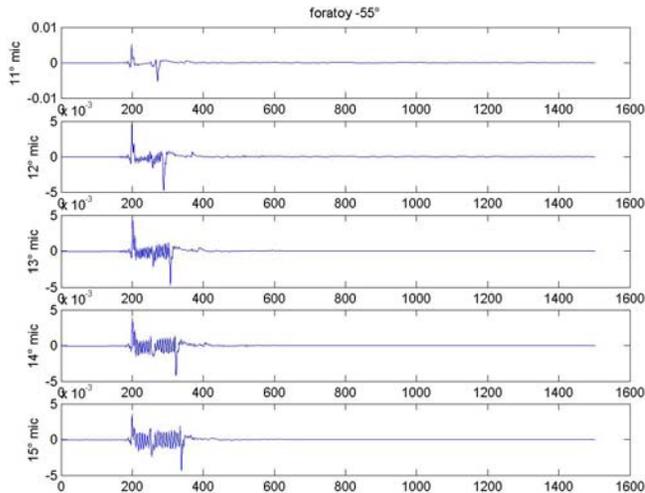
Il sistema di misura osserva quindi il fenomeno della diffrazione del suono intorno ai pannelli.

La diffrazione definisce lo scatter alle frequenze inferiori.



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

Riflessione del pannello forato.



Si è notata una vibrazione ad alta frequenza sui microfoni vicini alla normale.

L'analisi dello spettro mostrano una variazione di posizione in frequenza in funzione dell'angolo di osservazione.

Modellizzazione del pannello forato.

Il comportamento di variabilità angolo-frequenza misurato ha delle analogie con il comportamento degli array di sorgenti.

Si è creato un semplice modello bidimensionale di sorgenti sferiche omnidirezionali emittenti ai tempi di incidenza sugli stessi.

$$p = \frac{\rho_0 k c (4\pi a^2 \hat{u})}{4\pi \cdot r} \sum_i \sum_j e^{-jkx_{i,j}} e^{-jky_{i,j}}$$

a = raggio della sorgente

u = modulo della velocità superficiale

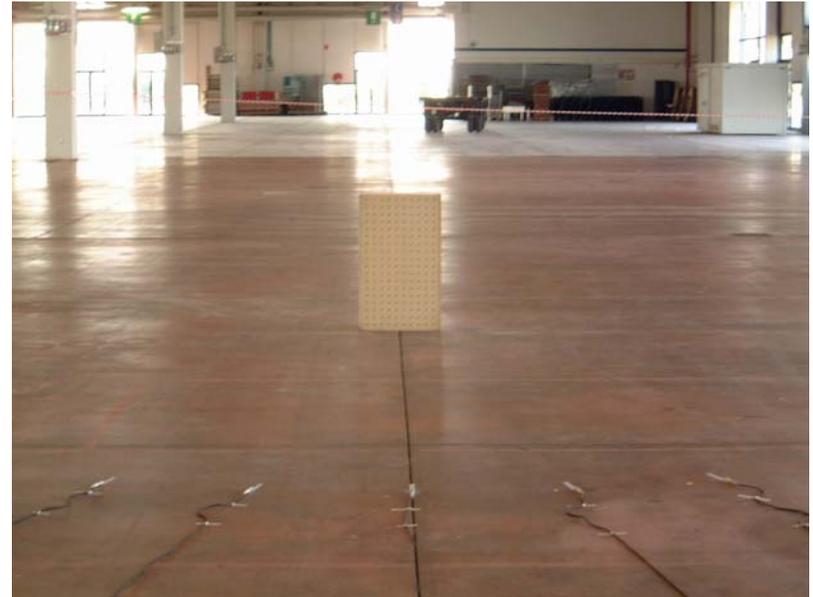
r = distanza del ricevitore

i = colonna i -esima della matrice

j = riga j -esima della matrice

$x_{i,j}$ = distanza tra sorgente e ciascun monopolo (i, j)

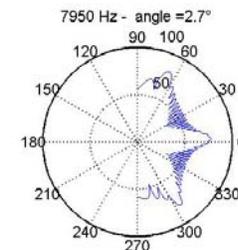
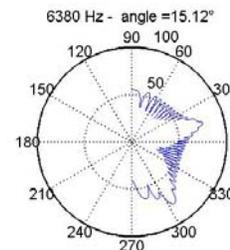
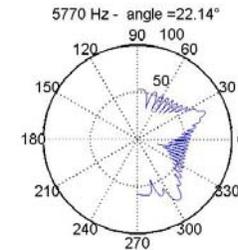
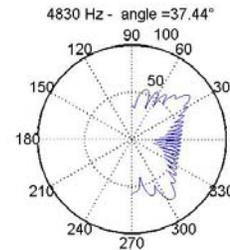
$y_{i,j}$ = distanza tra ciascun monopolo (i, j) e ogni punto di ricezione



Verifica del modello.

Si è ottenuta un' ottima corrispondenza tra la posizione dei massimi in frequenza misurati (in tabella) e i risultati del modello appena descritto (in figura).

FORATOY - 55°		
Mic #	Fmax	Theta
12	9.50E+03	-7.5
13	7.95E+03	0
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



Conclusioni.

- Esperienze di misure fatte in scala 1:1, pochi esperimenti simili nel mondo;
- Utilizzo del sine sweep ha migliorato il sistema di misura;
- Applicazione del metodo WFA: utile per l'analisi dei dati e migliore definizione dell'effetto di bordo;
- Diffrazione ben definita a bassa frequenza;
- Misure su diverse tipologie di pannelli ne hanno caratterizzato i comportamenti come ben distinti (conferma della validità del metodo);
- Modellizzazione della riflessione data da un pannello forato, apre a studi successivi;
- Numerose osservazioni sono state raccolte e proposte alle commissioni preposte per modificare i due standard di misura relativi al coefficiente geometrico di diffusione (o di uniformità di diffusione).