



# **Recenti sviluppi scientifici in materia di acustica edilizia ed ambientale**

***Angelo Farina***

***Docente di Acustica Applicata presso la  
Facoltà di Ingegneria dell'Università di Parma***

# Tecnologie di ieri, oggi, domani

- Misura delle prestazioni acustiche

- Misure tradizionali (norme serie ISO 140)

- Tecnica intensimetrica (norma ISO 15186/2)

- Misure pseudo-impulsive (norma ISO 18233)

- Olografia Acustica (non ancora standardizzata)

- Previsione delle prestazioni acustiche

- Metodo EN 12354 (valutazioni delle prestazioni acustiche di edifici a partire dalle prestazioni di prodotti)

- Simulazione multifisica agli elementi finiti

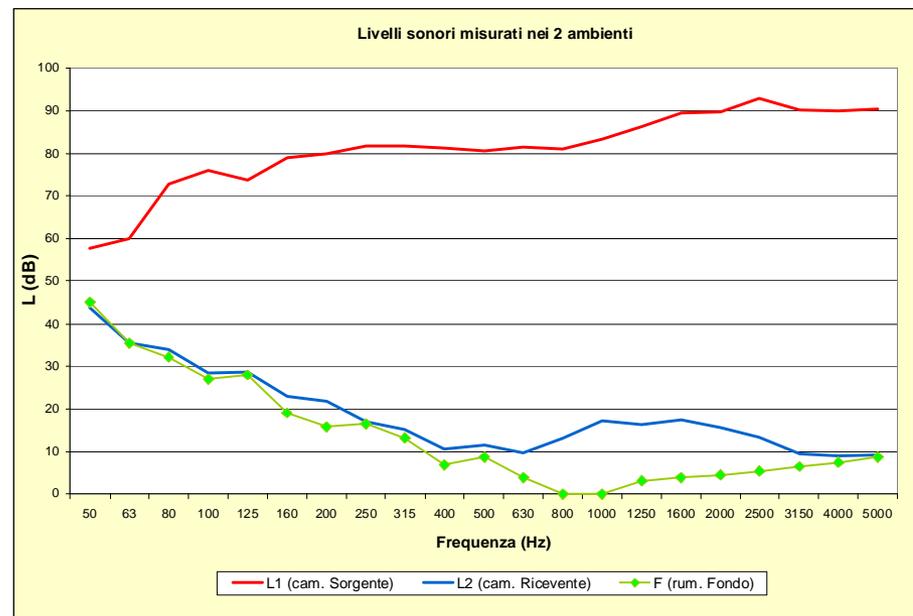
# Misure tradizionali

- Utilizzo di sorgenti sonore di tipo stazionario (altoparlanti) di notevole dimensione, potenza e costo
- Misura lenta, con lunghe medie nello spazio e nel tempo



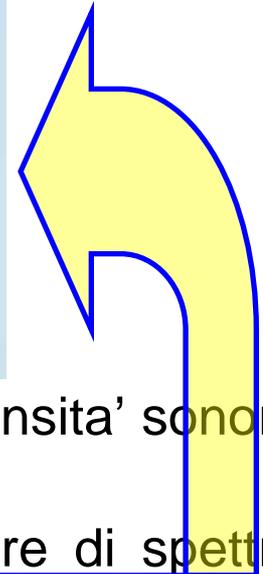
# Misure tradizionali

- Occorre impiegare un analizzatore di spettro in terzi d'ottava, operante in tempo reale (strumento costoso e delicato)
- La misura e' spesso contaminata dal rumore di fondo



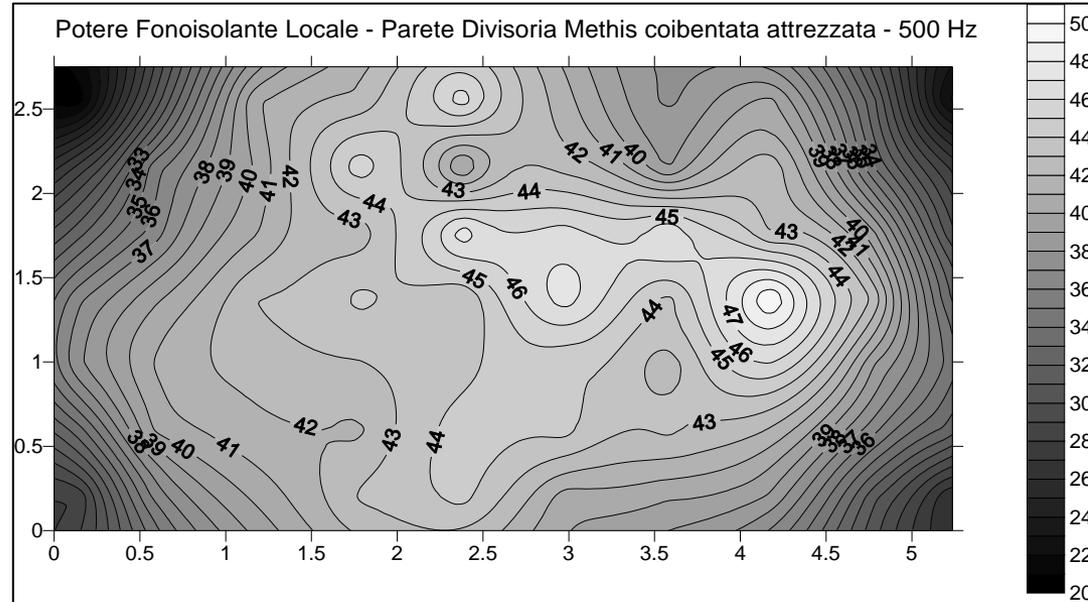
- In ogni caso, essa fornisce solo il valore complessivo della prestazione acustica in esame, senza alcuna indicazione delle cause del mancato raggiungimento del limite legale

# Tecnica Intensimetrica



- Nell'ambiente ricevente si mappa il valore dell'intensità sonora sulle superfici attraverso le quali arriva il rumore
- E' necessario impiegare un avanzato analizzatore di spettro bicanale, corredato di una apposita **sonda intensimetrica**; il tutto ha un costo molto elevato, oltre 40.000 Euro
- La misura e' fatta su una griglia di centinaia di punti, quindi richiede parecchie ore
- Il principale vantaggio rispetto al metodo tradizionale consiste nella possibilità di visualizzare le mappe ed individuare i "ponti acustici" delle strutture

# Tecnica Intensimetrica

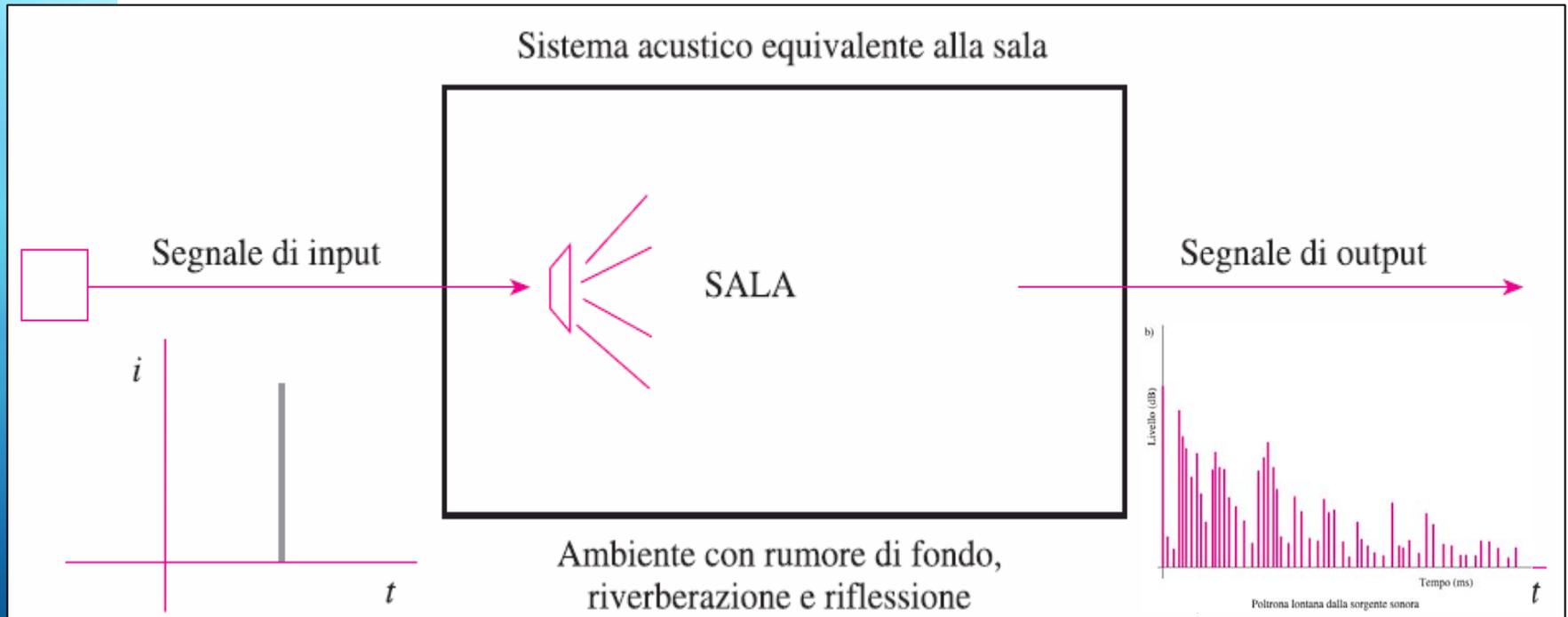


- A sinistra viene mostrata la misura su una griglia di punti, a destra il risultato della mappatura del valore del potere fonoisolante della parete
- Nell'esempio mostrato si vede che le zone a basso potere fonoisolante corrispondono ai 4 vertici della parete, che non "chiude" perfettamente contro le pareti laterali

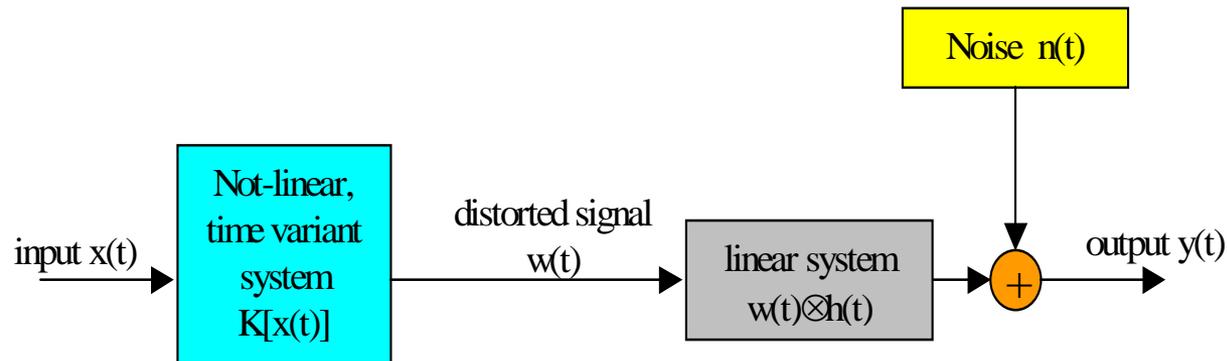
# Misure pseudo-impulsive

- Questo metodo e' applicabile attualmente solo per le misure dell'isolamento di facciata e del potere fonoisolante di tramezzi interni (orizzontali o vertical) **ma non** per il livello del rumore di calpestio o del rumore prodotto dagli impianti
- Anziche' impiegare un grosso altoparlante alimentato con rumore casuale, si impiega un piccolo altoparlante alimentato con un segnale speciale, chiamato ESS (exponential sine sweep)
- Si registra tale segnale mediante un normale ed economico microfono a pressione, collegato ad un piccolo registratore audio digitale (su scheda SD): la strumentazione richiesta e' pertanto leggera ed economica, e la misura molto rapida, in quanto pressoché immune dal rumore di fondo
- Mediante opportuna elaborazione del segnale digitalizzato, esso viene trasformato nella cosiddetta "risposta all'impulso".

# Schema di misura della risposta all'impulso



# Schema del processo di misura



- Si desidera misurare la risposta impulsiva lineare  $h(t)$ . Essa può essere ricavata dalla conoscenza del segnale di test  $x(t)$  e del segnale misurato  $y(t)$ . L'influenza della parte non lineare  $K$  e del rumore  $n(t)$  deve essere minimizzata

## Il metodo Exponential Sine Sweep

$x(t)$  è un segnale sinusoidale a frequenza variabile, con variazione esponenziale della frequenza nel tempo.

$$x(t) = \sin \left[ \frac{\omega_1 \cdot T}{\ln \left( \frac{\omega_2}{\omega_1} \right)} \cdot \left( e^{\frac{t}{T} \cdot \ln \left( \frac{\omega_2}{\omega_1} \right)} - 1 \right) \right]$$

# Il metodo Exponential Sine Sweep

- La metodica di deconvoluzione della risposta all'impulso è semplice: supponiamo di realizzare un filtro inverso  $z(t)$  tale che:

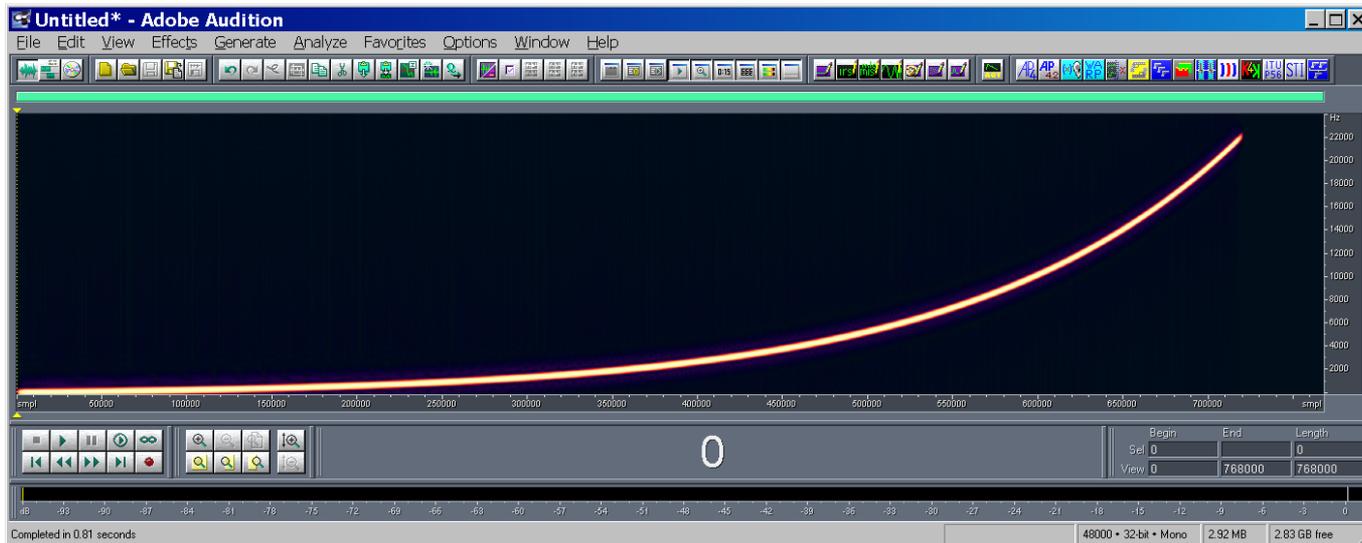
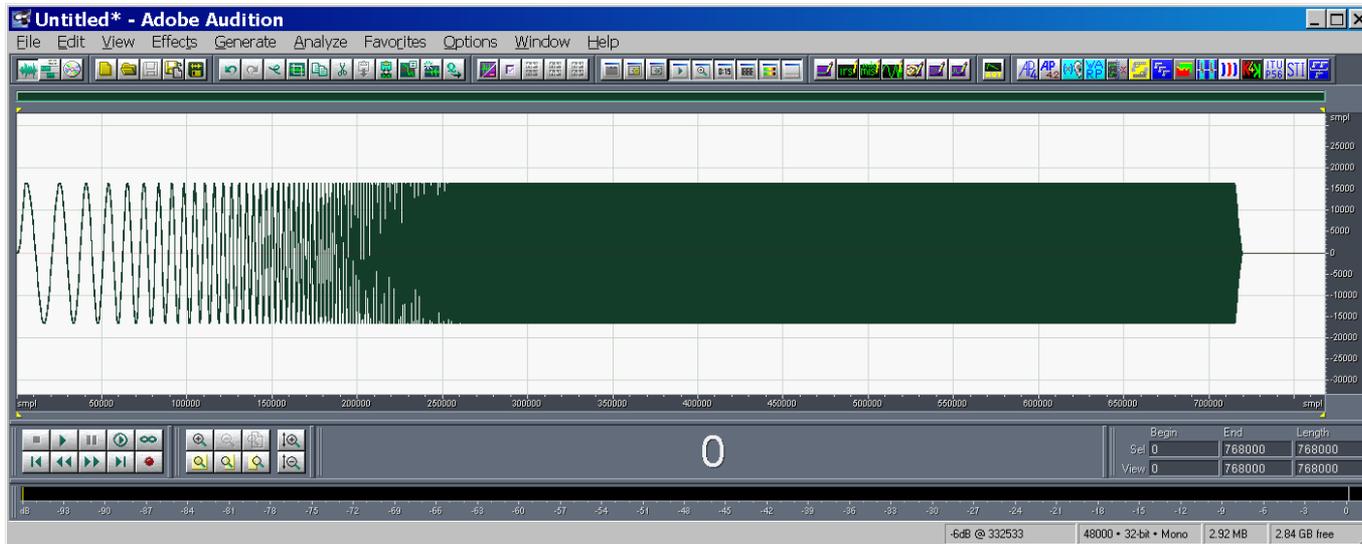
$$x(t) \otimes z(t) \Rightarrow \delta(t) \quad (\text{impulso ideale})$$

- Se ora applichiamo tale filtro inverso al risultato della misura  $y(t)$ , che altro non è che la convoluzione di  $x(t)$  con la risposta all'impulso dell'ambiente,  $h(t)$ , otteniamo:

$$y(t) \otimes z(t) = x(t) \otimes h(t) \otimes \delta(t) \Rightarrow h(t)$$

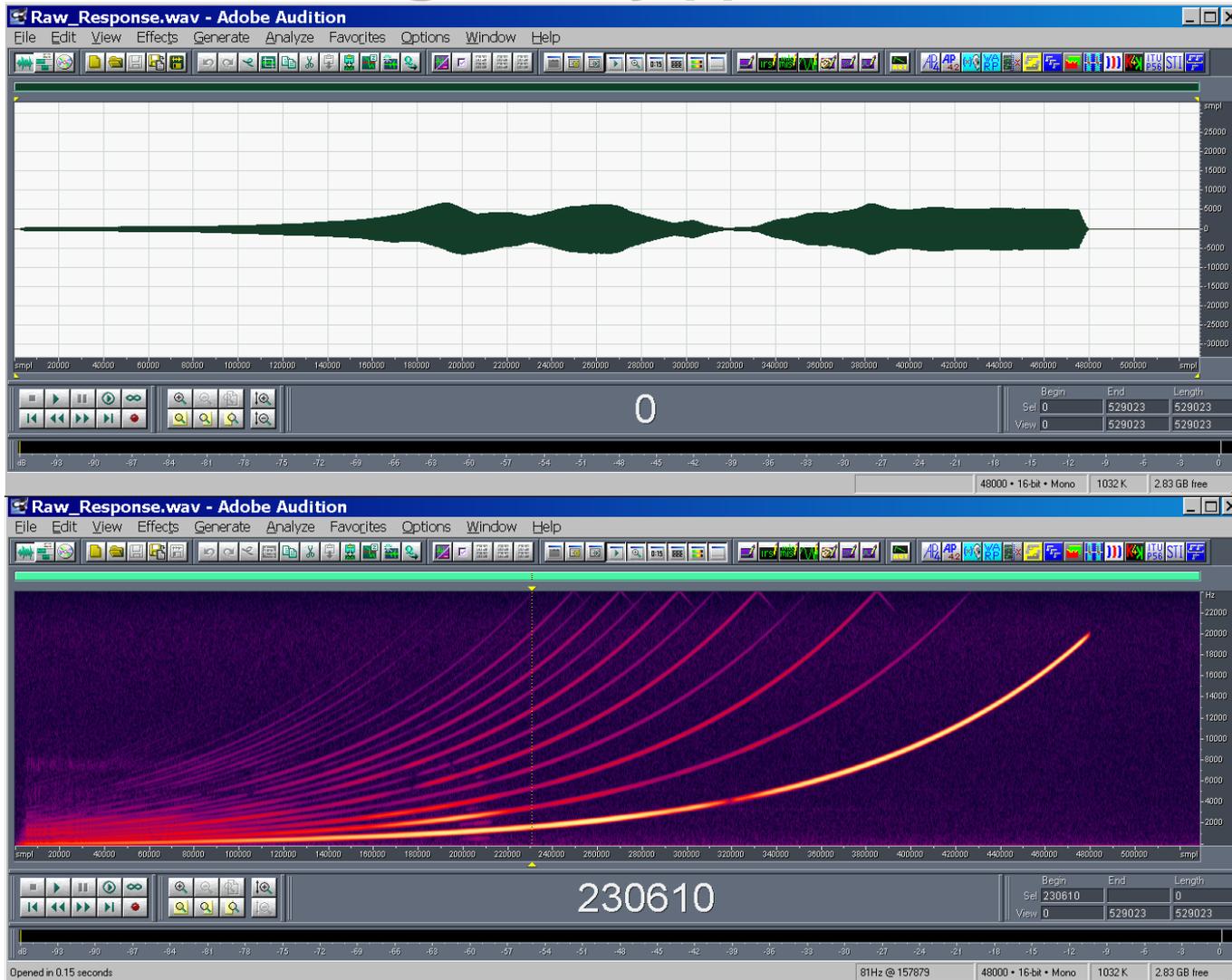
- Il filtro inverso  $z(t)$  è semplicemente il “time reversal” del segnale originario  $x(t)$ , con applicata una appropriata equalizzazione

# Test Signal – $x(t)$



Stop

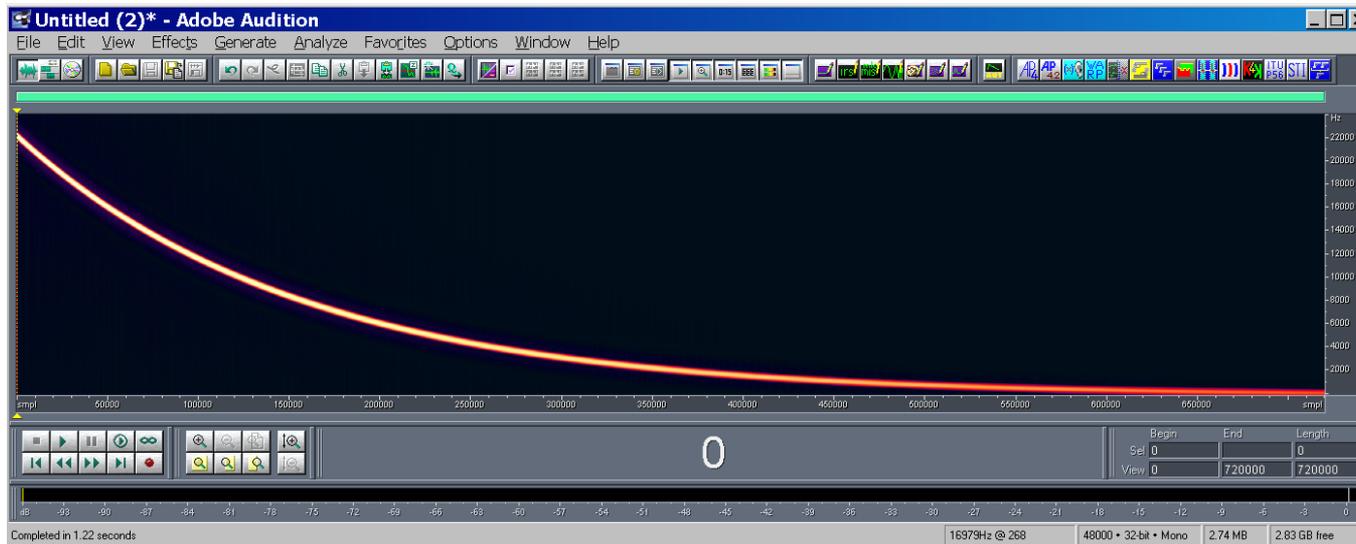
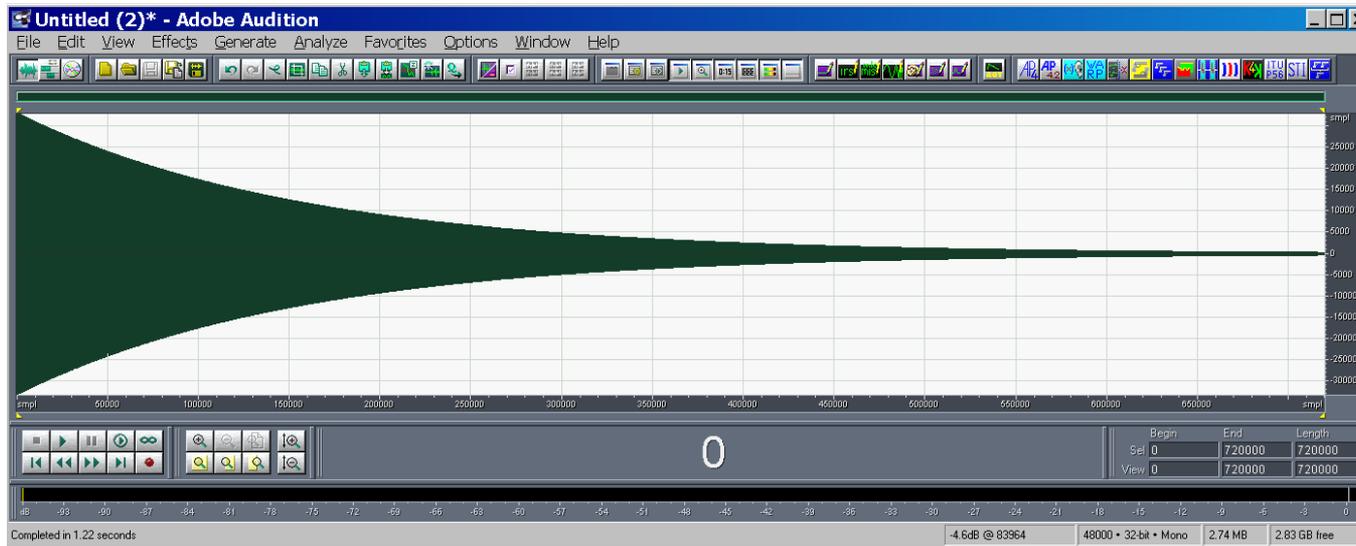
# Measured signal - $y(t)$



Stop

- Le armoniche sono causate dalla distorsione non lineare dell'altoparlante

# Inverse Filter – $z(t)$



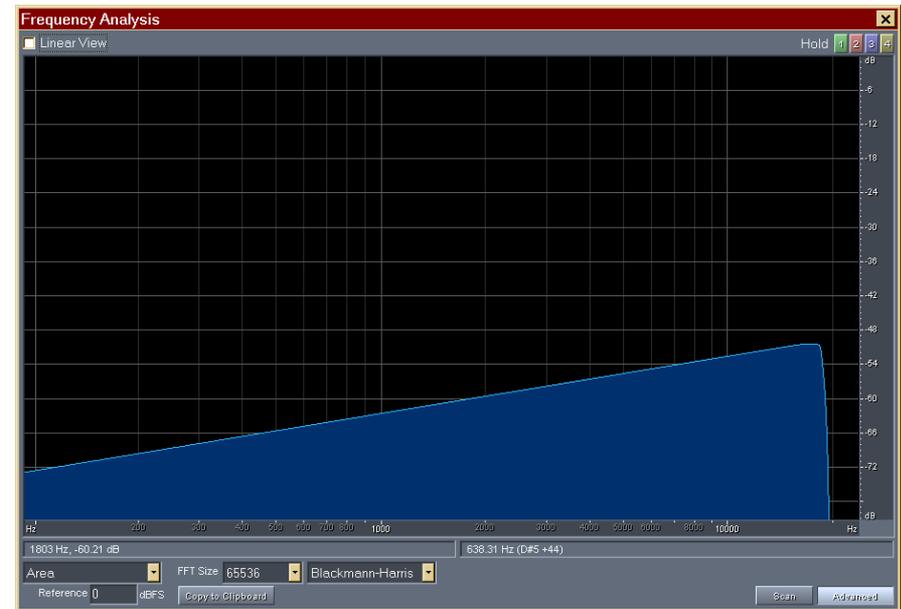
Stop

# Deconvoluzione del segnale

Viene usata la tecnica del “time reversal mirror”, cioè la convoluzione del segnale misurato con lo stesso segnale di test, temporalmente invertito. Se il contenuto spettrale del segnale non è piatto, occorre una opportuna riqualizzazione del risultato.

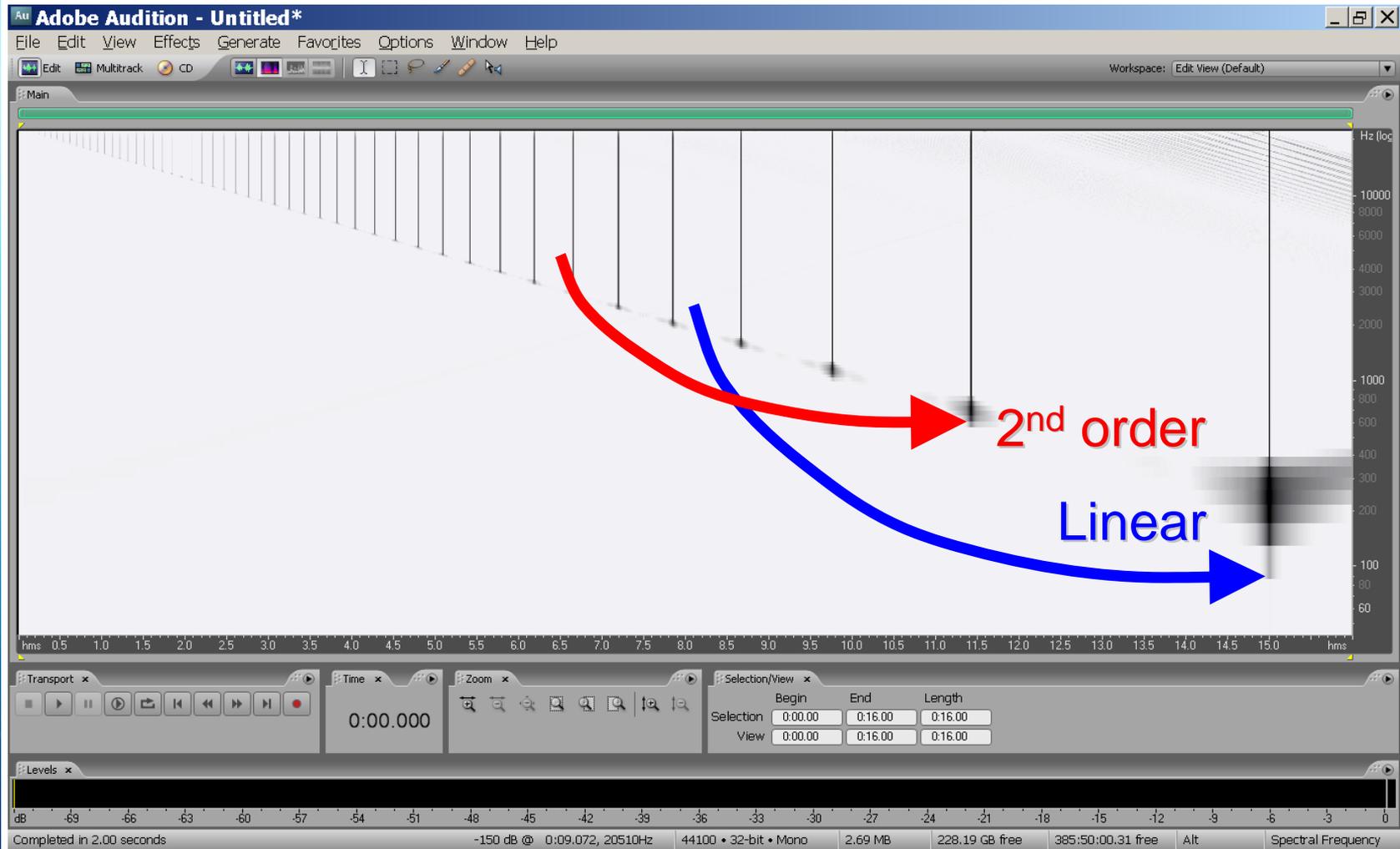


Segnale di test  $x(t)$



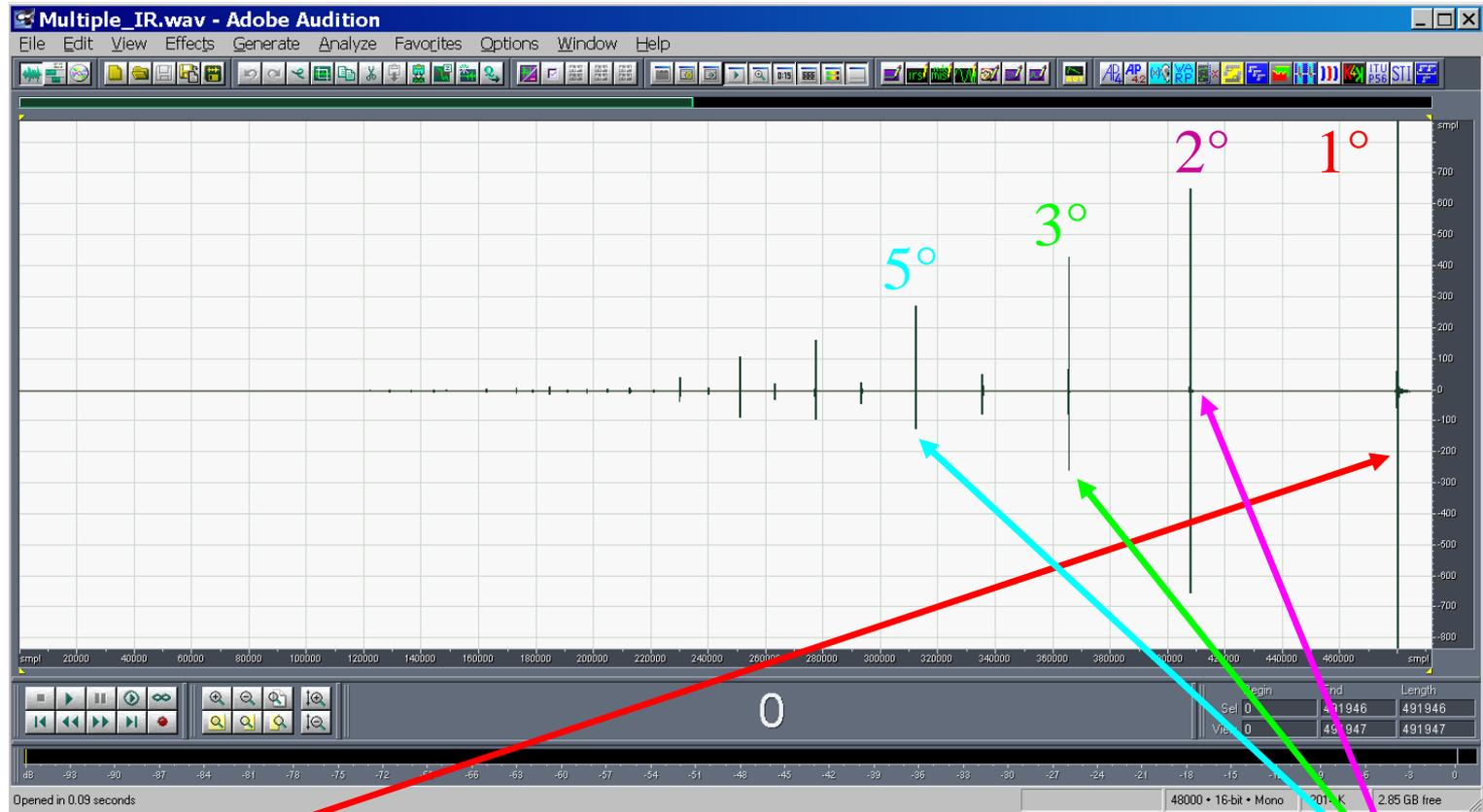
Filtro Inverso  $z(t)$

# Deconvoluzione = rotazione del sonogramma



- La convoluzione con il filtro inverso fa ruotare il piano tempo-frequenza in senso antiorario

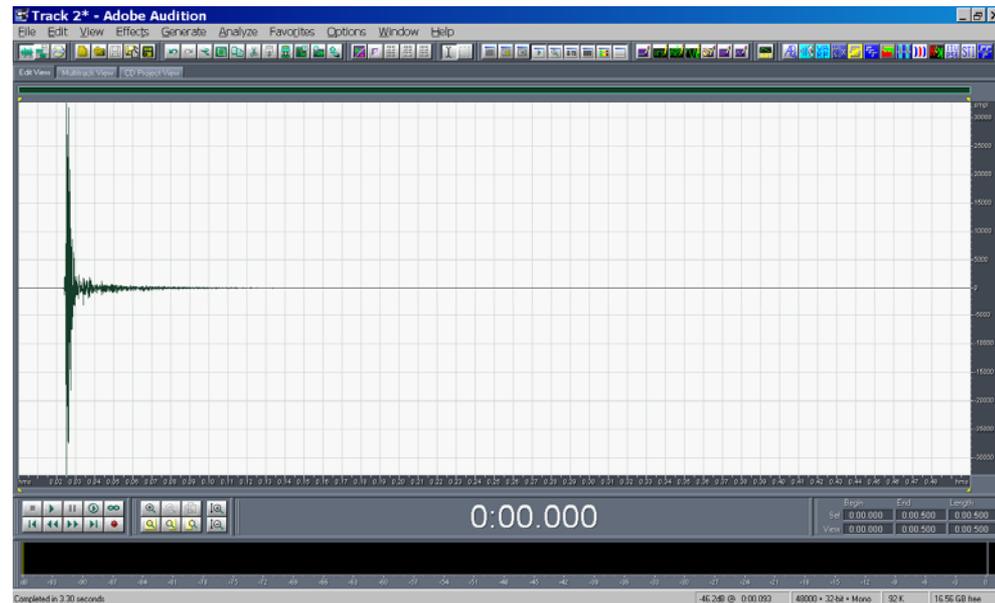
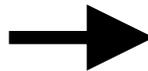
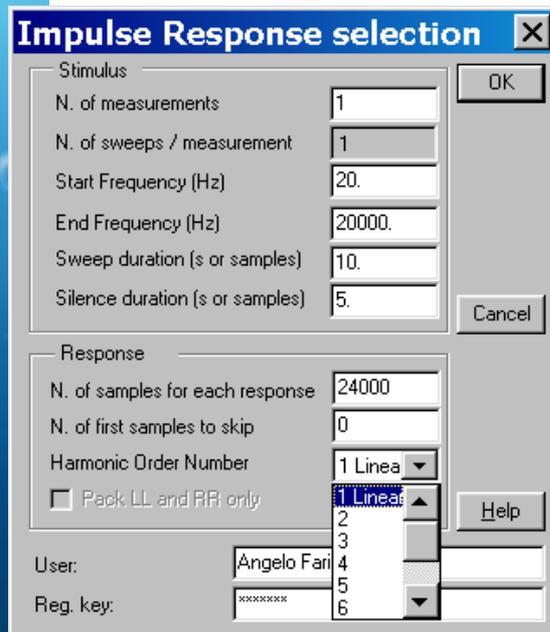
# Risultato della deconvoluzione



L'ultima risposta all'impulso e' la lineare, le precedenti sono i prodotti di distorsione armonica ai vari ordini

# IR Selection

- E' poi possibile isolare la sola risposta lineare, ed eventualmente tagliarla lungo l'asse dei tempi, in modo da escludere i "cammini di fiancheggiamento" che giungono con tempi di ritardo elevato:

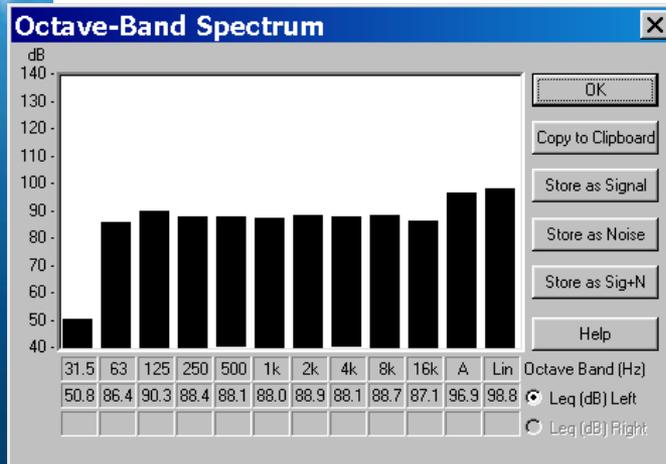
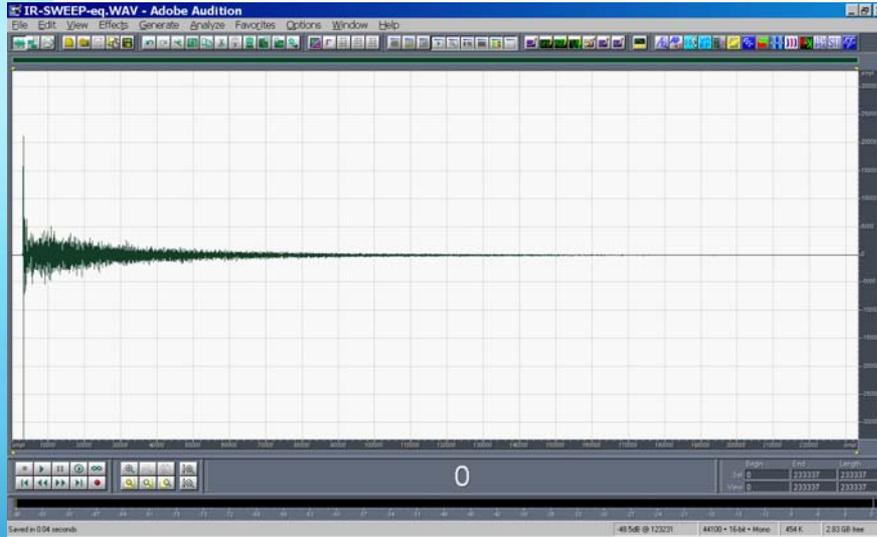


# Esempio di misura ESS

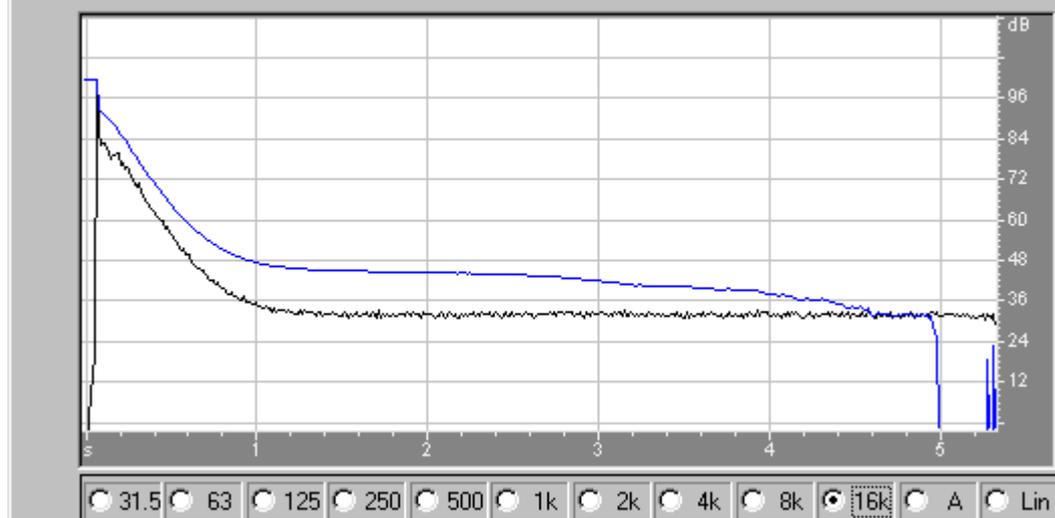


- A sin., piccolo altoparlante auto-amplificato, collegato ad un iPod per la generazione del segnale ESS
- A destra, registratore audio su scheda SD

# Esempio di misura ESS



## Acoustical Parameters according to ISO3382 (v. 4.2)

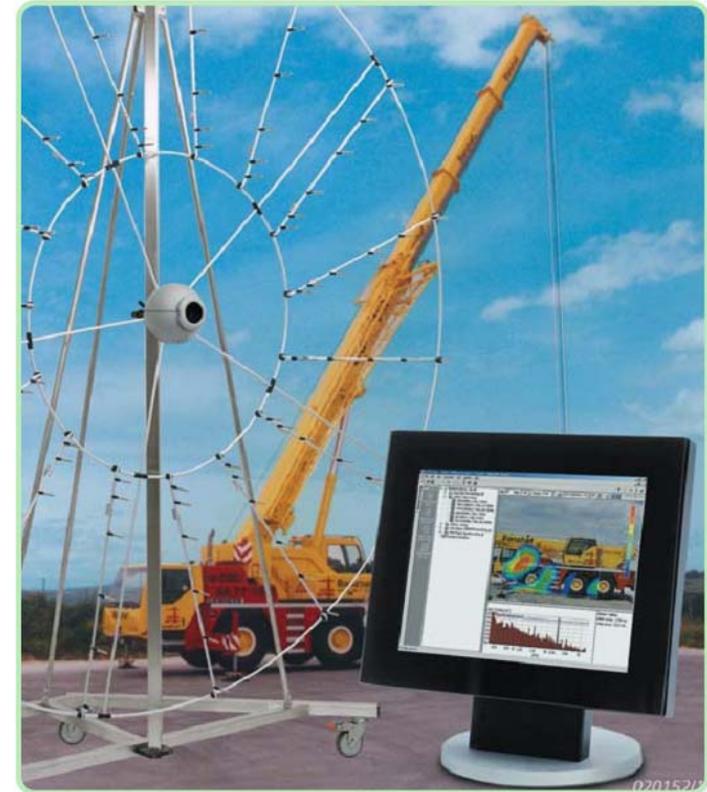


## Vantaggi delle misure pseudo-impulsive

- Grande immunità dal rumore di fondo
- Parziale possibilità di valutare la presenza di cammini di fiancheggiamento
- Misura molto rapida, fattibile con strumentazione economica, interamente funzionante a batteria
- Il software necessario a generare il segnale di test e deconvolvere la risposta all'impulso si scarica gratuitamente da Internet
- Trattandosi di una metodica standardizzata UNI/ISO, la misura ha comunque valore legale
- E' in corso la ricerca finalizzata all'estensione di questo metodo anche alla misurazione del livello di calpestio, usando un piccolo attuatore magnetostriativo (vibratore) fissato al pavimento anziche' un altoparlante.

# Olografia acustica

- Si utilizza un array di 32-64 microfoni, disposti su un piano o su una sfera
- Al centro dell'array, una o piu' videocamere forniscono una immagine panoramica della "scena acustica"
- Avanzate tecniche di "beamforming" consentono di mappare l'intensita' del rumore proveniente dai vari punti dell'immagine, ottenendo cosi' una sorta di "termografia acustica" che mostra le zone di maggior emissione di rumore



# Olografia acustica – array microfonici

**Spherical Array**



**Applications:** Vehicle and aircraft interior, building and industrial plants

**NSI Method:** Spherical Beamforming

**No. of Channels:** 36 or 50

**Size:** 0.20 cm diameter

**Wheel Array (incl. camera)**



**Applications:** General purpose (90-channel array typically used in automotive component applications)

**NSI Method:** Beamforming

**No. of Channels:** 42 and over

**Size:** 0.65 m to 4.0 m diameter

**Half-wheel Array**



**Applications:** Full vehicles including wind tunnel and pass-by testing

**NSI Method:** Beamforming

**No. of Channels:** 42 and over

**Size:** 1.5 m to 4.0 m diameter

**Grid Array**



**Applications:** General purpose, stationary noise sources

**NSI Method:** STSF and NS-STSF

**No. of Channels:** 6 and over

**Size:** 0.125 m × 0.125 m and over (various spacing available)

# Olografia acustica – array microfonici

**Slice Wheel Array**



**Hand-held Array (single or double-layer)**



**2D Robot**



**Pentangular Array**



**Applications:** General purpose, engines, automotive components/ interior, etc.

**NSI Method:** Beamforming and NS-STSF/SONAH

**No. of Channels:** 36, 60 or 84

**Size:** 0.55 m to 2.0 m diameter

**Applications:** Components, interiors, etc.

**NSI Method:** Real-time holography, patch mapping and Conformal SONAH

**No. of Channels:** min.  $6 \times 6 \times 1$ , max.  $8 \times 8 \times 2$

**Spacing:** 25, 30, 35, 40 and 50 mm

**Applications:** Large, stationary noise sources, engines, vehicles

**NSI Method:** STSF

**No. of Channels:** 6 to 96

**Size:** 1 m  $\times$  1 m up to 10 m  $\times$  3 m

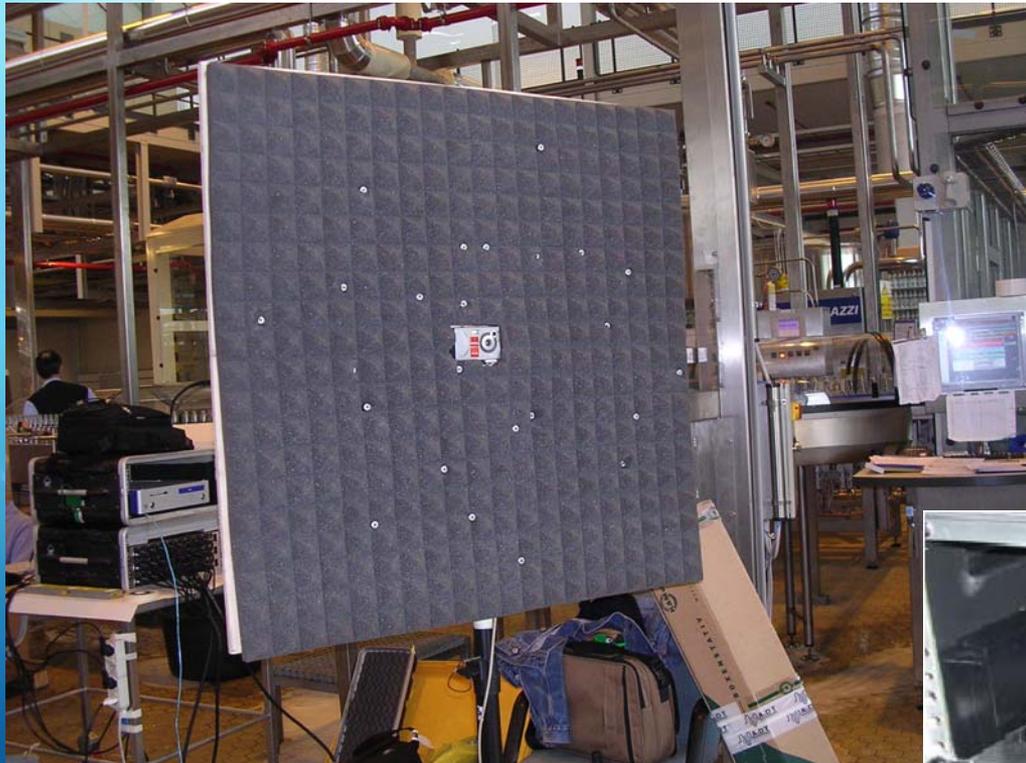
**Applications:** Outdoor noise sources, wind turbines, factories

**NSI Method:** Beamforming, extraneous noise suppression

**No. of Channels:** 30

**Size:** 3.5 m diameter

# Array planare (“acoustic camera”)



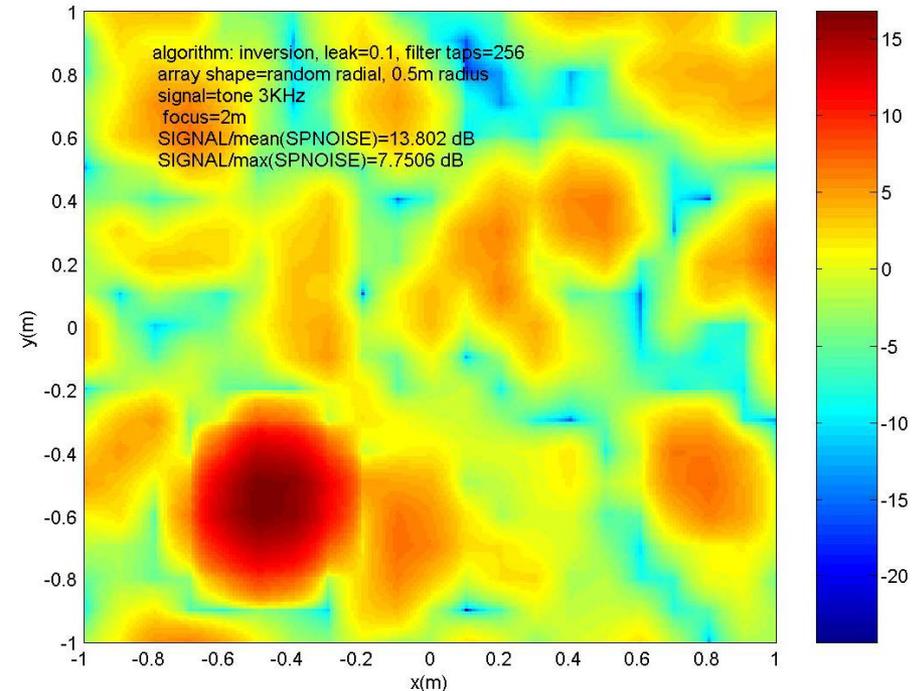
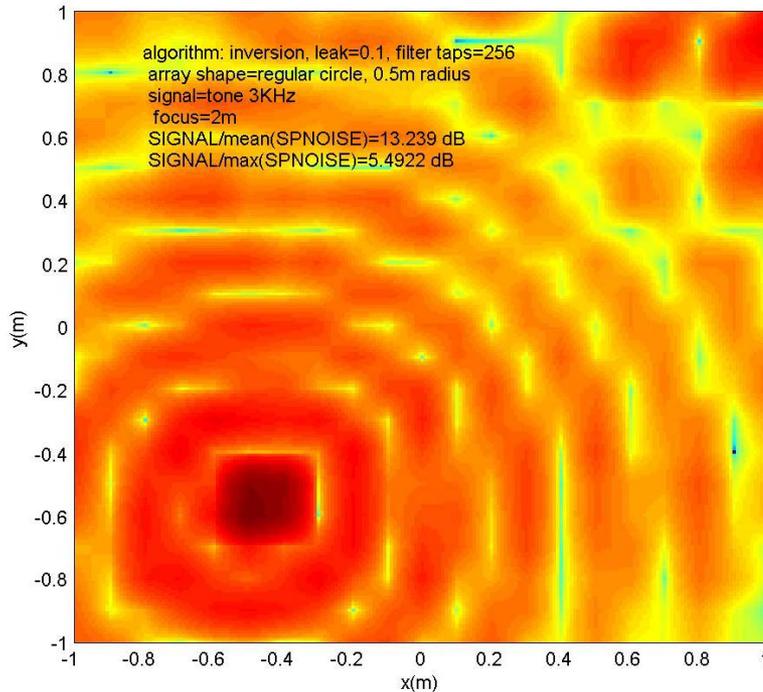
- 32 microfoni omnidirezionali di basso costo montati su un pannello di 1mx1m, con disposizione pseudo-casuale
- Sistema di acquisizione dati di basso costo (convertitori Behringer)



- Calcolo dei filtri e processamento segnale in Matlab

# Circular array vs. Random array

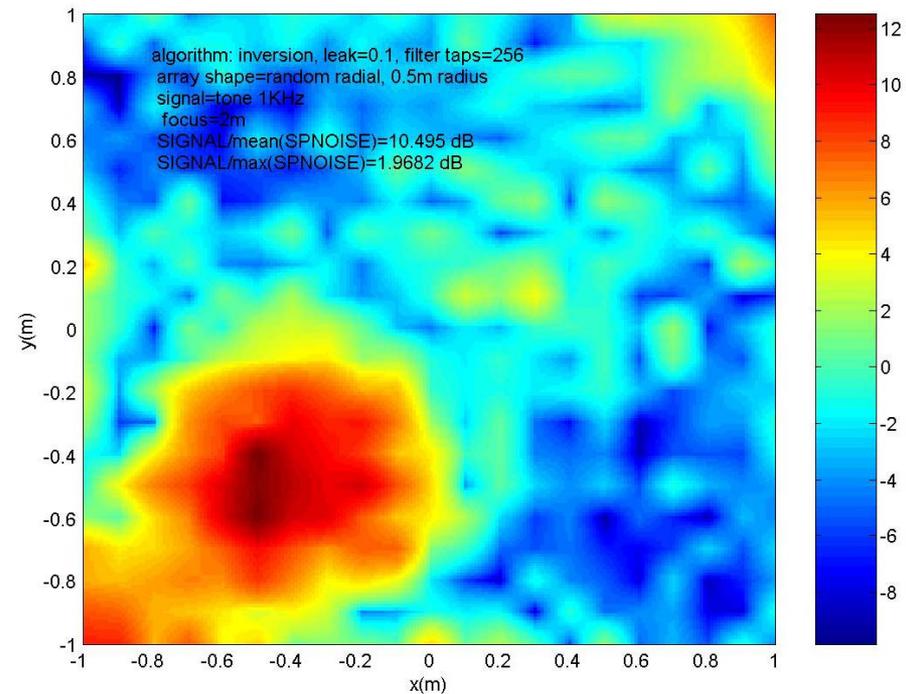
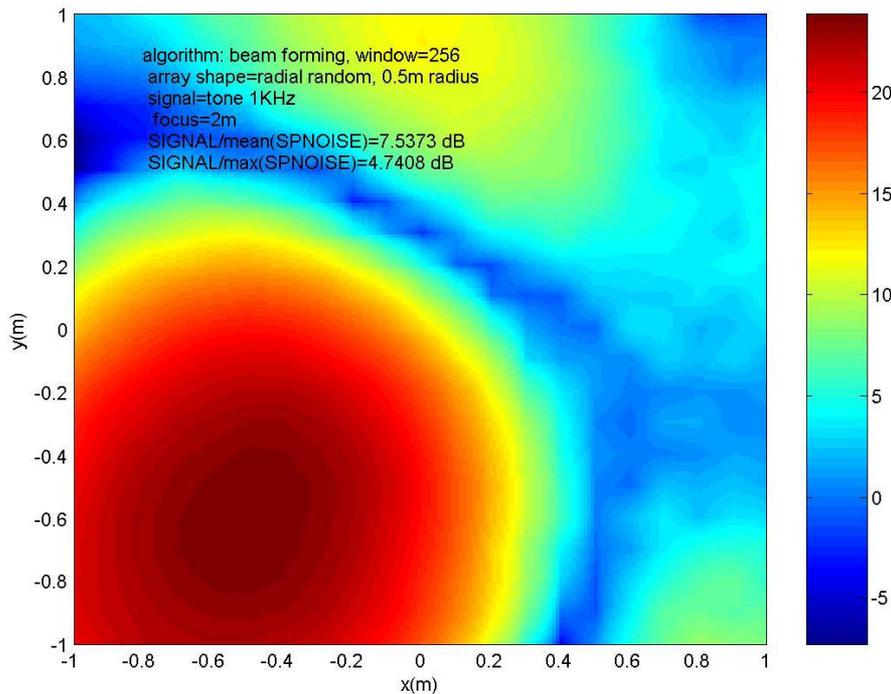
## Simulated matrix inversion - 3 kHz



**Le posizioni ottimali sono state individuate mediante 10000 generazioni causali, e scegliendo quella che forniva l'immagine piu' definita**

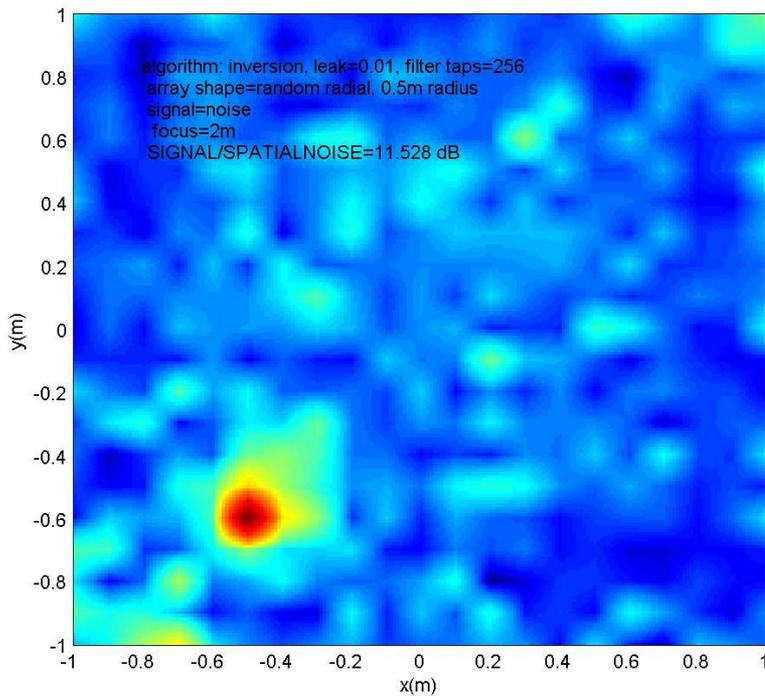
# Beamforming vs. Inverse filters

## Random Array - Matrix inversion - 1 kHz

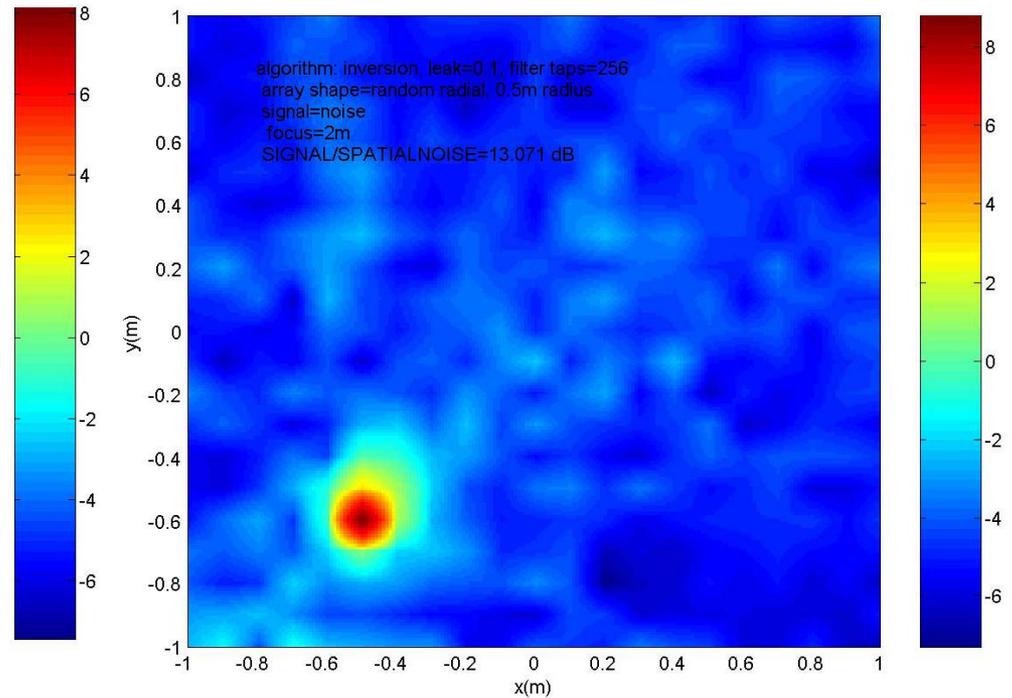


# Effect of the regularization parameter

## Random Array - Matrix Inversion - 5 kHz



$\varepsilon = 0.01$



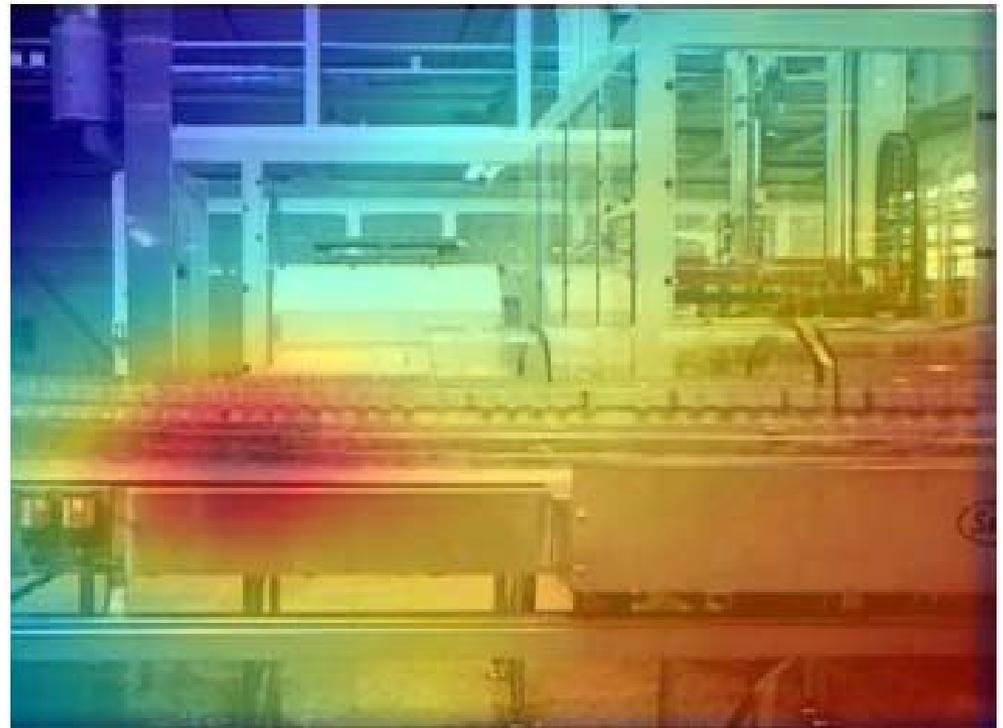
$\varepsilon = 0.1$

# Indoor application (source localisation)



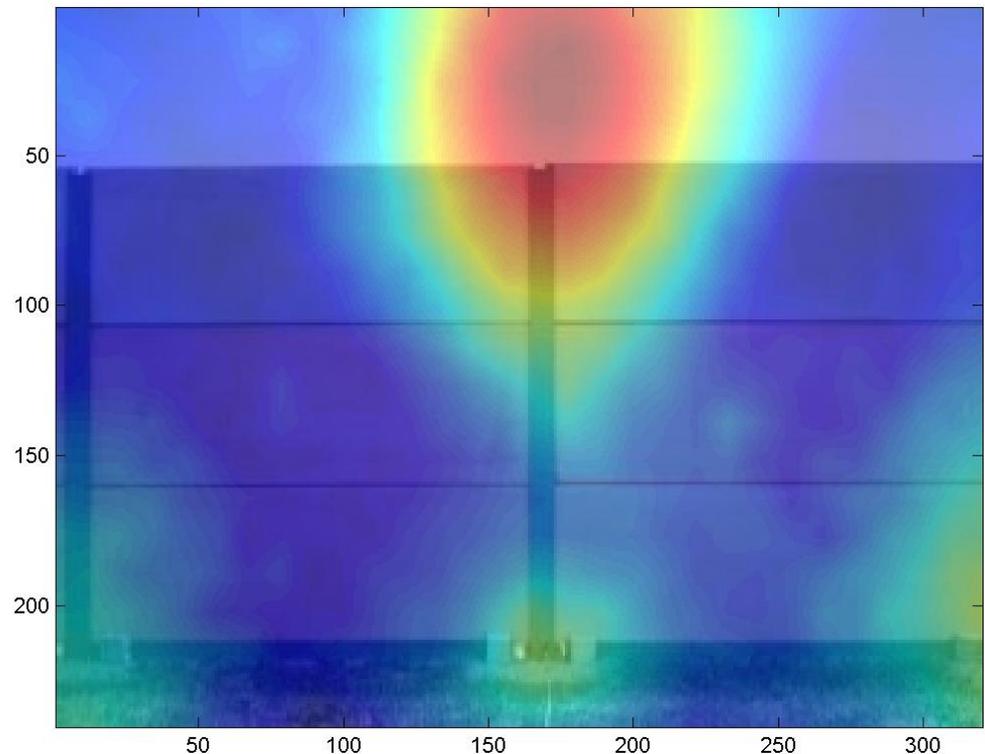
- L'array e' dotato di una WebCam
- Il filtraggio determina l'energia sonora proveniente da ciascun pixel dell'immagine video

- Si genera una mappa a falsi colori dei livelli sonori
- La mappa viene sovrapposta all'immagine video



# Outdoor application

- L'array e' collocato dietro una barriera antirumore
- Viene visualizzato il flusso di energia sonora che la scavalca, ma anche quello che "passa sotto"



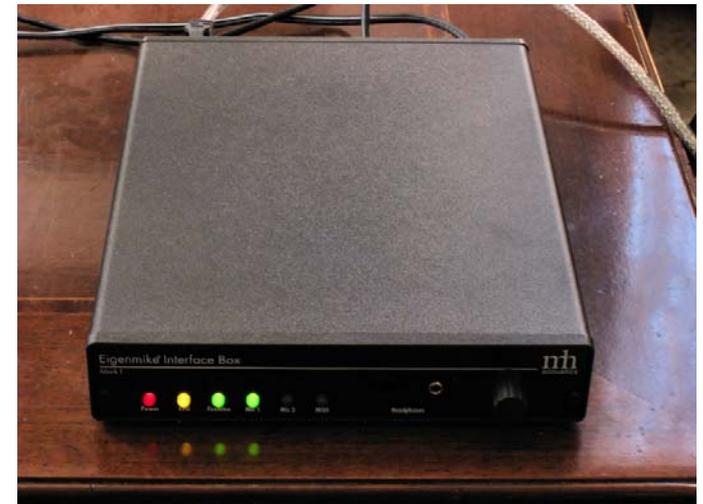
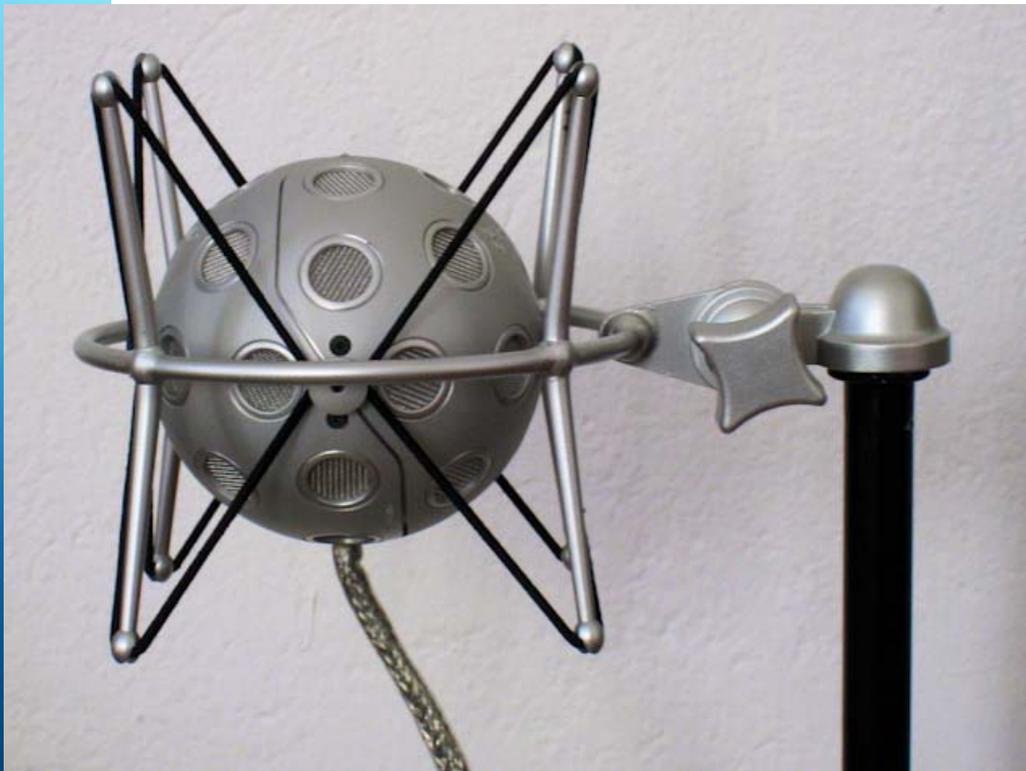
# Array sferici

- L'Università di Parma ha realizzato una sonda microfonica sferica dotata di 32 capsule Knowles



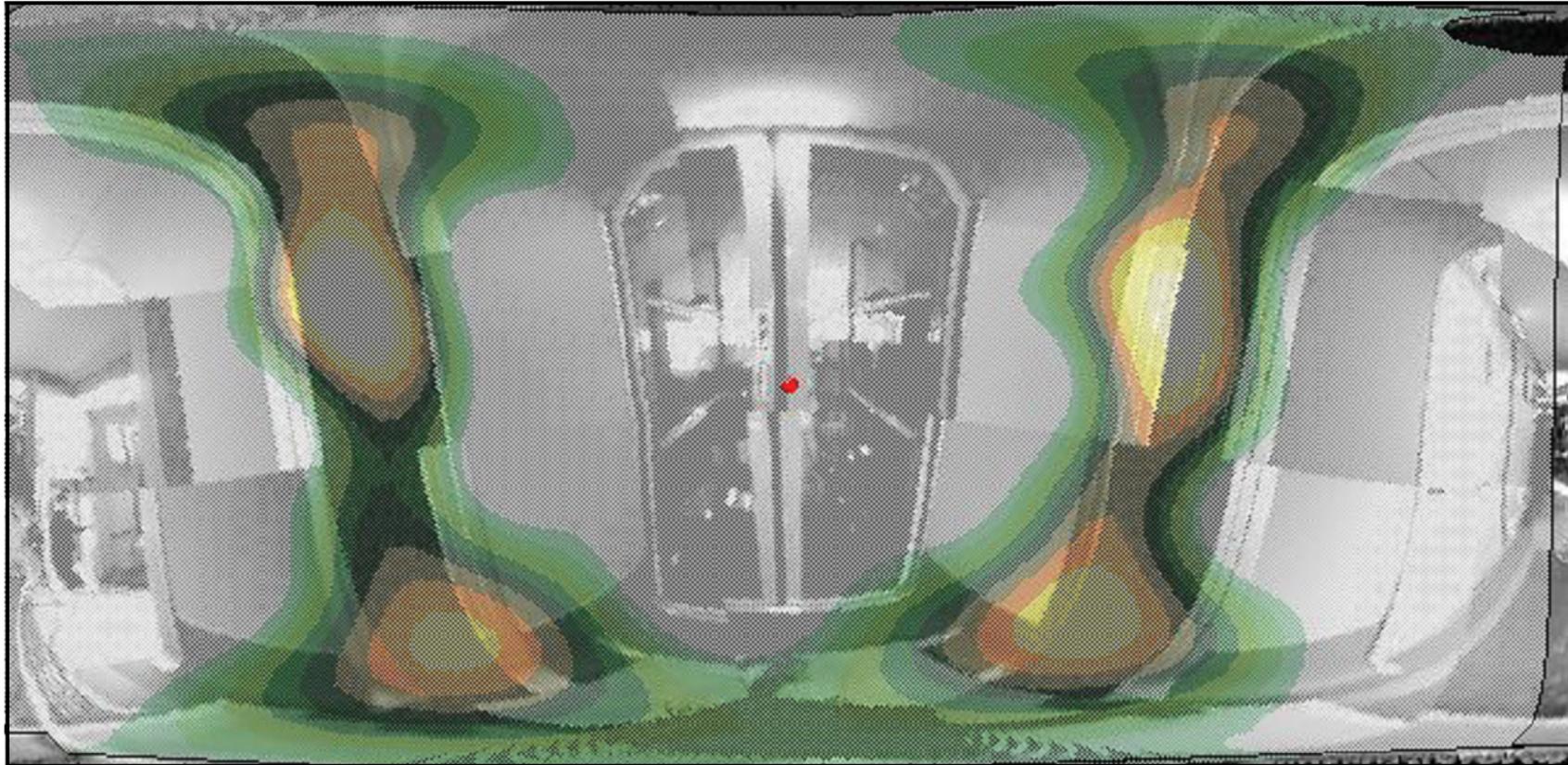
# Array sferici

- È stato recentemente acquistato il sistema microfonico ed interfaccia audio Eigenmike-32



# Array sferici

- Una singola misura con un array sferico consente di visualizzare l'intero "panorama sonoro" nell'ambiente ricevente



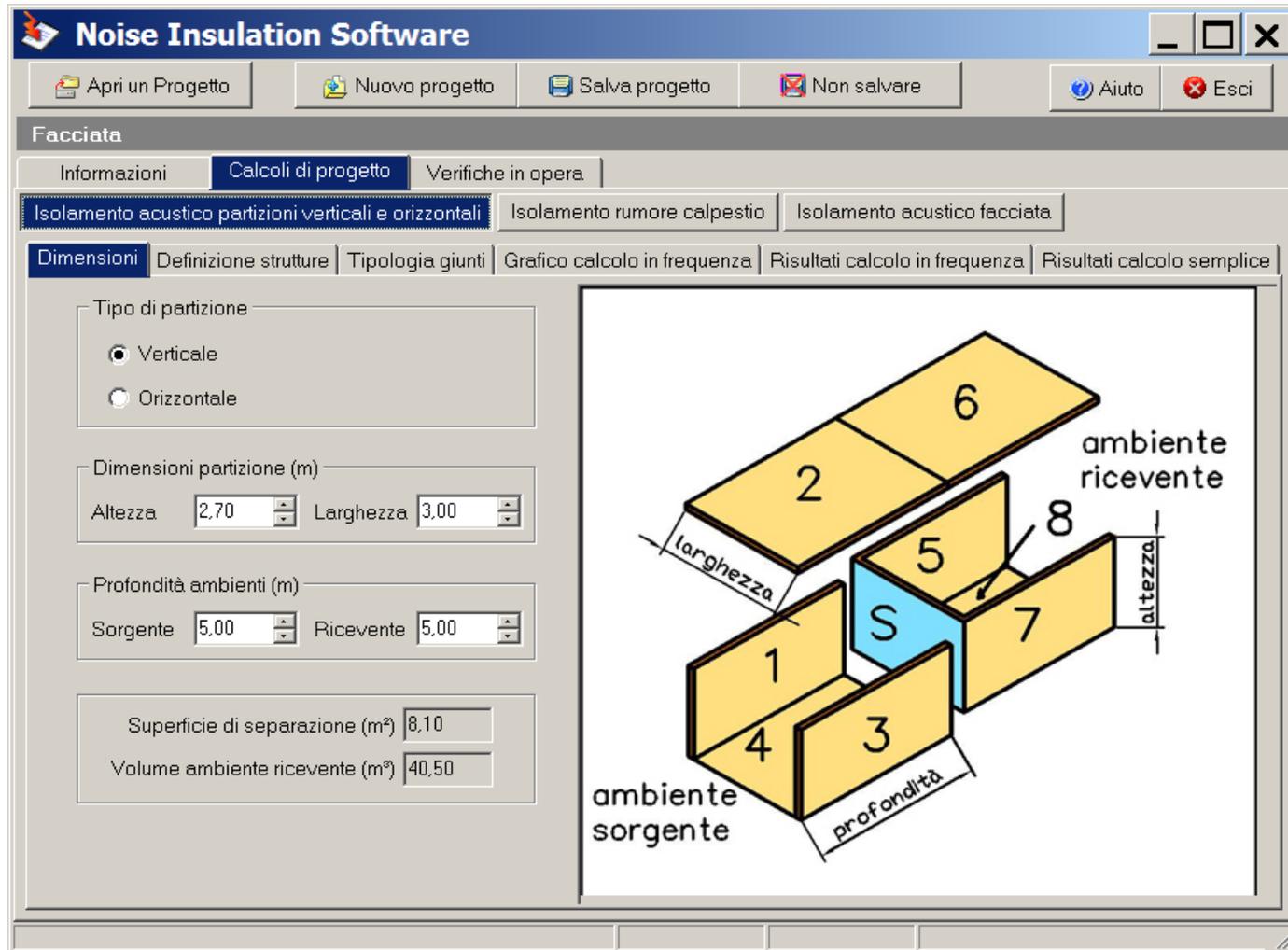
# Vantaggi dell'olografia acustica

- Sostanzialmente fornisce le stesse informazioni della misura intensimetrica (MA NON E' STANDARDIZZATA!)
- La misura e' molto veloce, e basta effettuarla in un unico punto al centro della stanza ricevente
- Fornisce valide informazioni sulla presenza di cammini di fiancheggiamento o difetti costruttivi
- Puo' essere abbinata all'uso del segnale ESS (misura pseudo-impulsiva), consentendo cosi' l'impiego di un piccolo altoparlante
- Sebbene gli array microfonici "di marca" siano molto costosi, l'esperienza del ns. laboratorio ha mostrato che e' possibile costruire un valido array a 32 microfoni, planare o sferico, con meno di 2000 Euro.
- Quel che manca per un uso generalizzato del metodo e' la disponibilita' di software gratuito o a basso costo

# Simulazione delle prestazioni acustiche

- Sono oggi disponibili a basso costo (meno di 100 Euro) numerosi programmi di simulazione operanti secondo EN 12354
- Questi programmi guidano il progettista nella stima della prestazione acustiche che si ottiene ipotizzando diverse tipologie costruttive per muri divisorii, elementi di facciata e solai
- Il programma opera sulla base di valori sperimentali misurati in laboratorio dei singoli componenti edilizi impiegati
- Purtroppo i dati disponibili derivano in gran parte da sperimentazioni fatte in paesi nordici, che mal corrispondono alle prestazioni delle tipologie costruttive usate in Italia
- Ma fortunatamente alcune associazioni di produttori di laterizi e di serramenti stanno colmando questa lacuna

# Il software NIS (Noise Insulation Software)

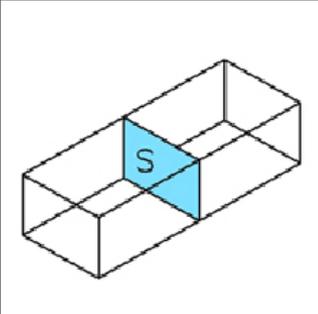


- Scelta del tipo di divisorio (interno / facciata / calpestio)

# Il software NIS (Noise Insulation Software)

**Definizione strutture**

Identificazione struttura  
Struttura di separazione



Tipologia struttura

- Parete semplice in laterizio
- Parete semplice in calcestruzzo
- Parete semplice in gesso
- Parete a sandwich in laterizio**
- Parete in cartongesso
- Solaio in calcestruzzo
- Solaio in laterocemento
- Solaio a predalles

Pareti composte

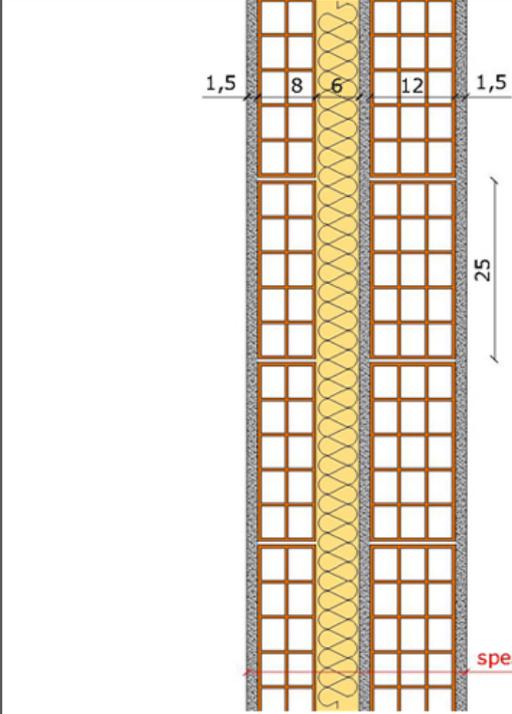
m' (kg/m<sup>2</sup>) 247,1  
Rw (dB) 57,2  
s (cm) 30,5

Chiudi OK

Parete a sandwich in laterizio | Pareti composte

Scorrimiento dati  
Struttura nuova

Muratura a doppia parete costituita da uno strato di mattoni forati da 8 cm (8x25x25), foratura 60%, densità 1800 kg/m<sup>3</sup>, intercapedine riempita con un

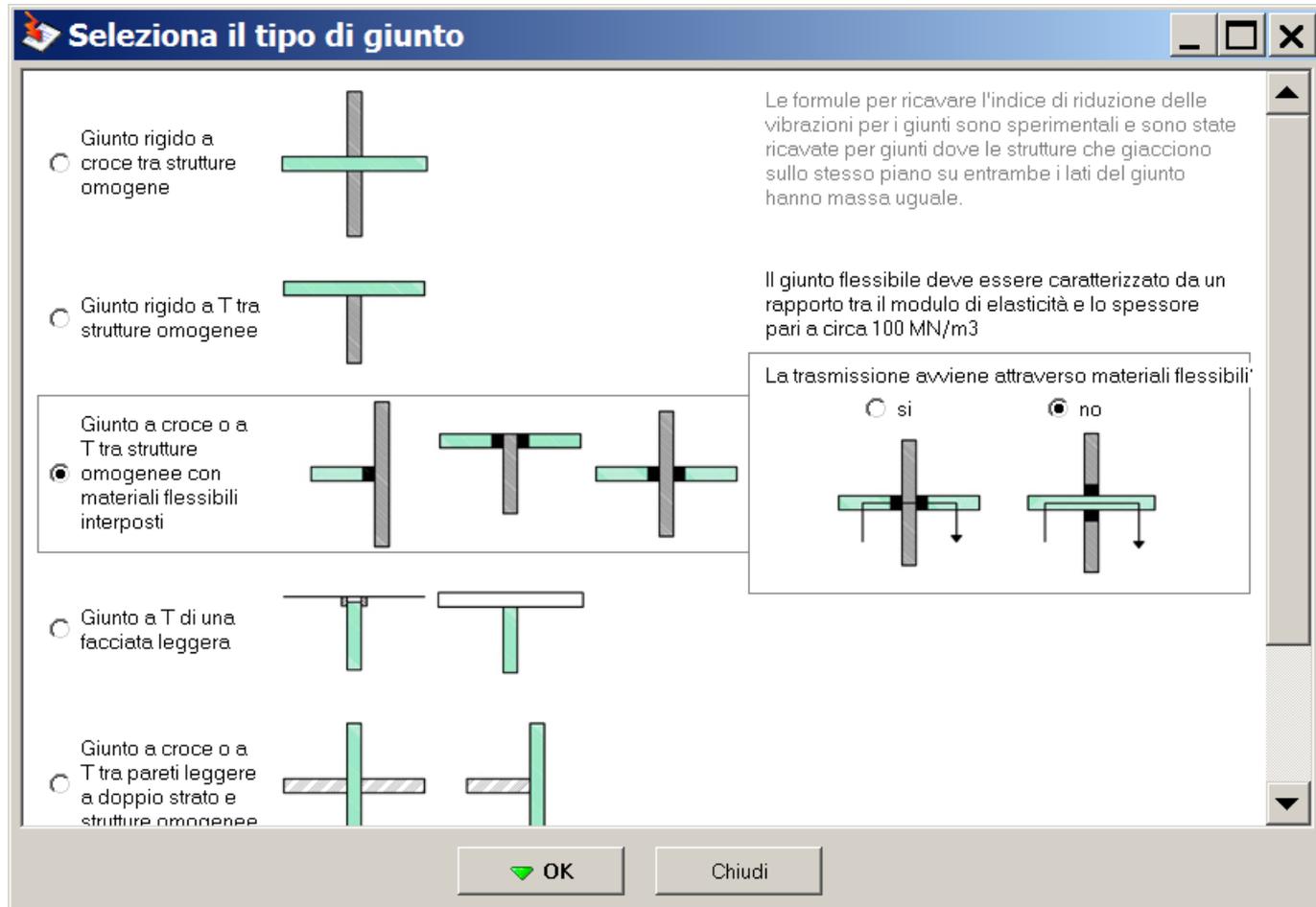


spessore 30,5 cm

100	125	160	200	250	315	400	500	630	800	1000	1250	1600	2000	2500	3150
51,9	50,9	47,5	47	46,8	46,8	51,6	53,2	54,4	57,3	61	60,3	60,5	59,4	60,6	62,5
50,3	46,4	46,5	43	44,9	46,9	49,3	52,5	55	57,8	61,5	63,3	63	62,1	61,8	62,7

- Selezione del materiale impiegato per ciascuna superficie

# Il software NIS (Noise Insulation Software)



- Scelta del tipo di giunto per ciascun collegamento

# Il software NIS (Noise Insulation Software)

**Noise Insulation Software**

Facciata

**Nodo 1-S**

Giunto a croce o a T tra strutture omogenee con materiali flessibili interposti

**Nodo 2-S**

Giunto rigido a T tra strutture omogenee

**Nodo 3-S**

Giunto rigido a T tra strutture omogenee

**Nodo 4-S**

Giunto a croce o a T tra strutture omogenee con materiali flessibili interposti

**Calcolo semplice**

Valori Kij

	K 1-S	K 2-S	K 3-S	K 4-S	K 1-5	K 2-6	K 3-7	K 4-8	K S-5	K S-6	K S-7	K S-8
500	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0

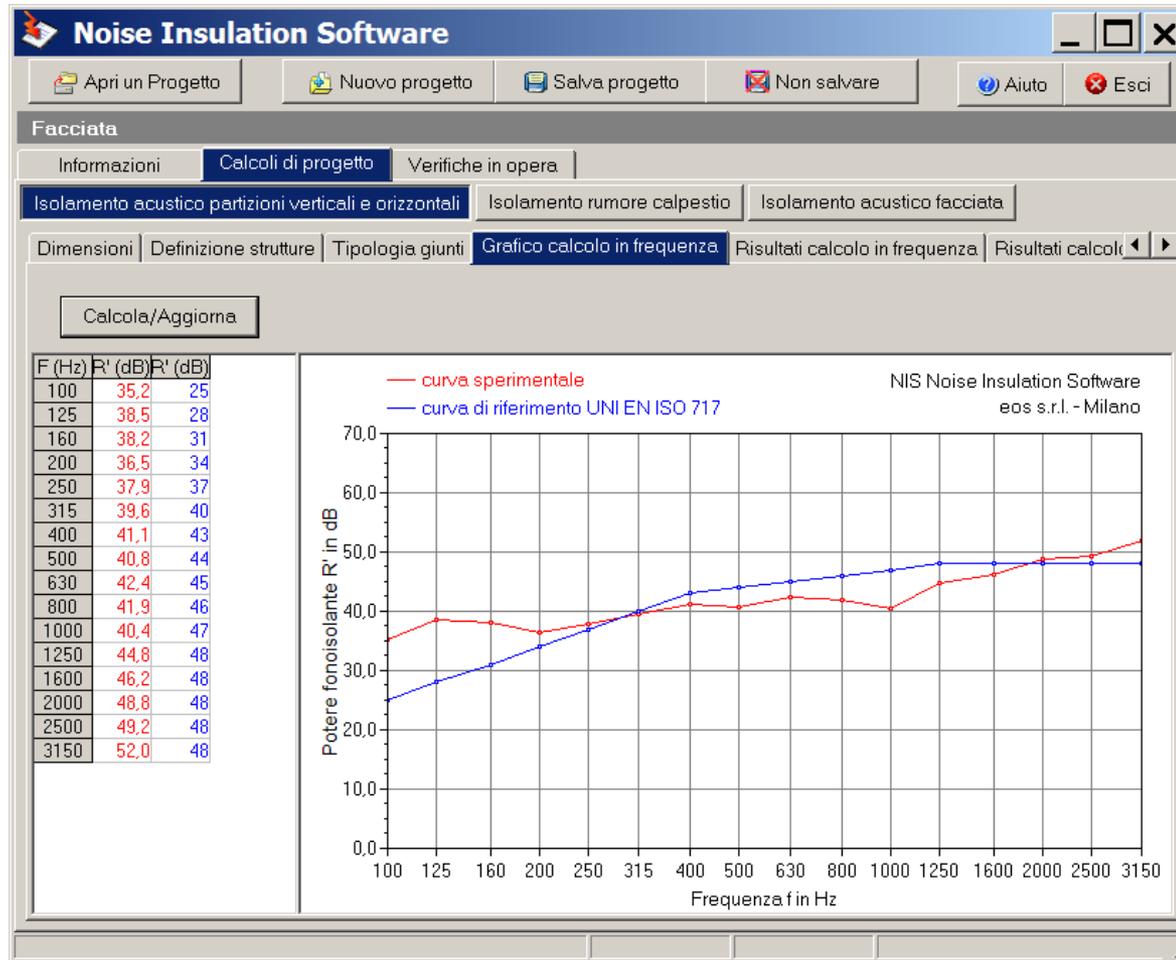
**Calcolo in frequenza**

Valori Kij nella banda di frequenza

	K 1-S	K 2-S	K 3-S	K 4-S	K 1-5	K 2-6	K 3-7	K 4-8	K S-5	K S-6	K S-7	K S-8
100	5,7	5,7	5,7	5,7	0,0	5,2	5,2	0,0	5,7	5,7	5,7	5,7
125	5,7	5,7	5,7	5,7	0,0	5,2	5,2	0,0	5,7	5,7	5,7	5,7
160	6,8	5,7	5,7	6,8	0,0	5,2	5,2	0,0	6,8	5,7	5,7	6,8
200	7,8	5,7	5,7	7,7	0,0	5,2	5,2	0,0	7,8	5,7	5,7	7,7
250	8,7	5,7	5,7	8,7	0,0	5,2	5,2	0,0	8,7	5,7	5,7	8,7
315	9,7	5,7	5,7	9,7	0,0	5,2	5,2	0,0	9,7	5,7	5,7	9,7
400	10,8	5,7	5,7	10,8	0,0	5,2	5,2	0,0	10,8	5,7	5,7	10,8
500	11,7	5,7	5,7	11,7	0,0	5,2	5,2	0,0	11,7	5,7	5,7	11,7
630	12,7	5,7	5,7	12,7	0,0	5,2	5,2	0,0	12,7	5,7	5,7	12,7
800	13,8	5,7	5,7	13,8	0,0	5,2	5,2	0,0	13,8	5,7	5,7	13,8
1000	14,7	5,7	5,7	14,7	0,0	5,2	5,2	0,0	14,7	5,7	5,7	14,7
1250	15,7	5,7	5,7	15,7	0,0	5,2	5,2	0,0	15,7	5,7	5,7	15,7
1600	16,8	5,7	5,7	16,8	0,0	5,2	5,2	0,0	16,8	5,7	5,7	16,8
2000	17,8	5,7	5,7	17,7	0,0	5,2	5,2	0,0	17,8	5,7	5,7	17,7
2500	18,7	5,7	5,7	18,7	0,0	5,2	5,2	0,0	18,7	5,7	5,7	18,7
3150	19,7	5,7	5,7	19,7	0,0	5,2	5,2	0,0	19,7	5,7	5,7	19,7

- Assegnazione del tipo di giunto ai nodi (matrice dei valori Kij)

# Il software NIS (Noise Insulation Software)



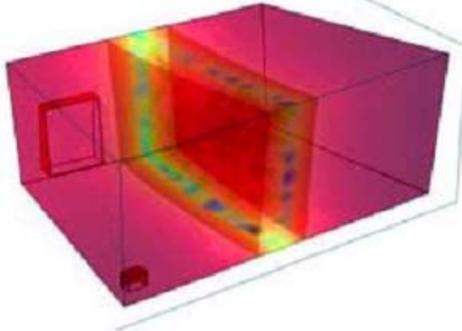
- Risultati del calcolo –  $R_w' = 44$  dB, quindi non conforme.

# Simulazione multifisica agli elementi finiti

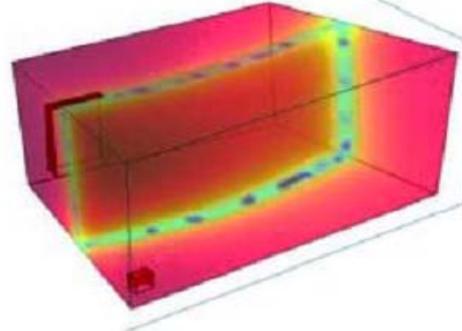
- E' in corso di sperimentazione una nuova metodica di simulazione agli elementi finiti, basata su un disegno CAD di dettaglio delle strutture (ad es. laterizi, strati di malta, di intonaco, materassini resilienti, etc.) e dei relativi vincoli travi, pilastri, solai, tamponamenti, serramenti, etc,
- Il tempo necessario alla modellazione CAD puo' essere di centinaia o migliaia di ore, a seconda della complessita' geometrica delle soluzioni impiegate
- Il tempo di simulazione puo' essere di alcune ore per ciascuna simulazione, quindi si tratta in generale di un metodo di calcolo molto oneroso, che richiede computer molto potenti (8-16 core) e dotati di molta RAM (da 16 Gb in su)
- I risultati possono divergere parecchio rispetto alle verifiche sperimentali, causa l'intrinseca instabilita' della modellazione multifisica

# Il modellatore multifisico Comsol

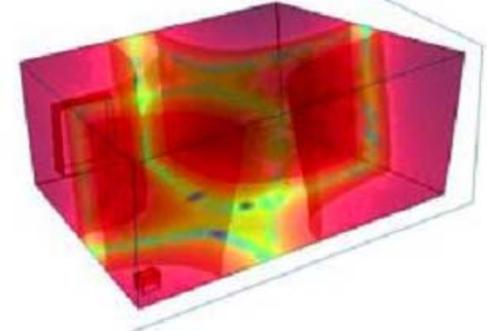
Mode (1,0,0) -  $f = 20.3$  Hz



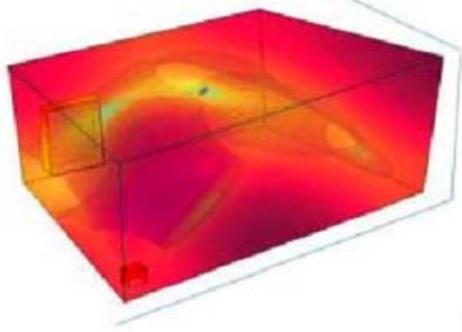
Mode (0,1,0) -  $f = 26.7$  Hz



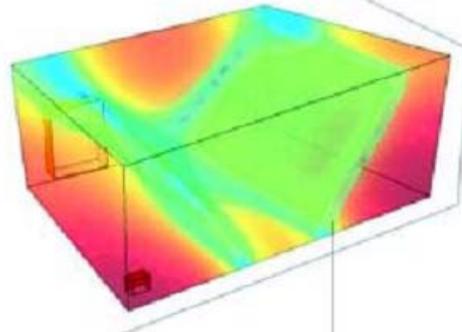
Mode (1,1,0) -  $f = 34.9$  Hz



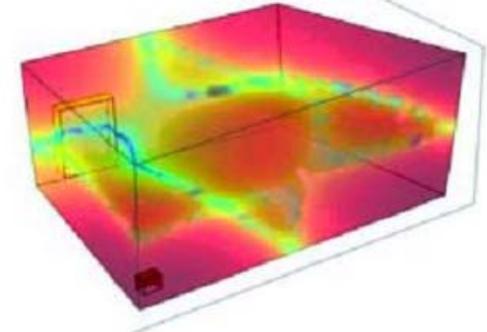
Mode (0,0,1) -  $f = 40.5$  Hz



Mode (2,0,0) -  $f = 40.9$  Hz

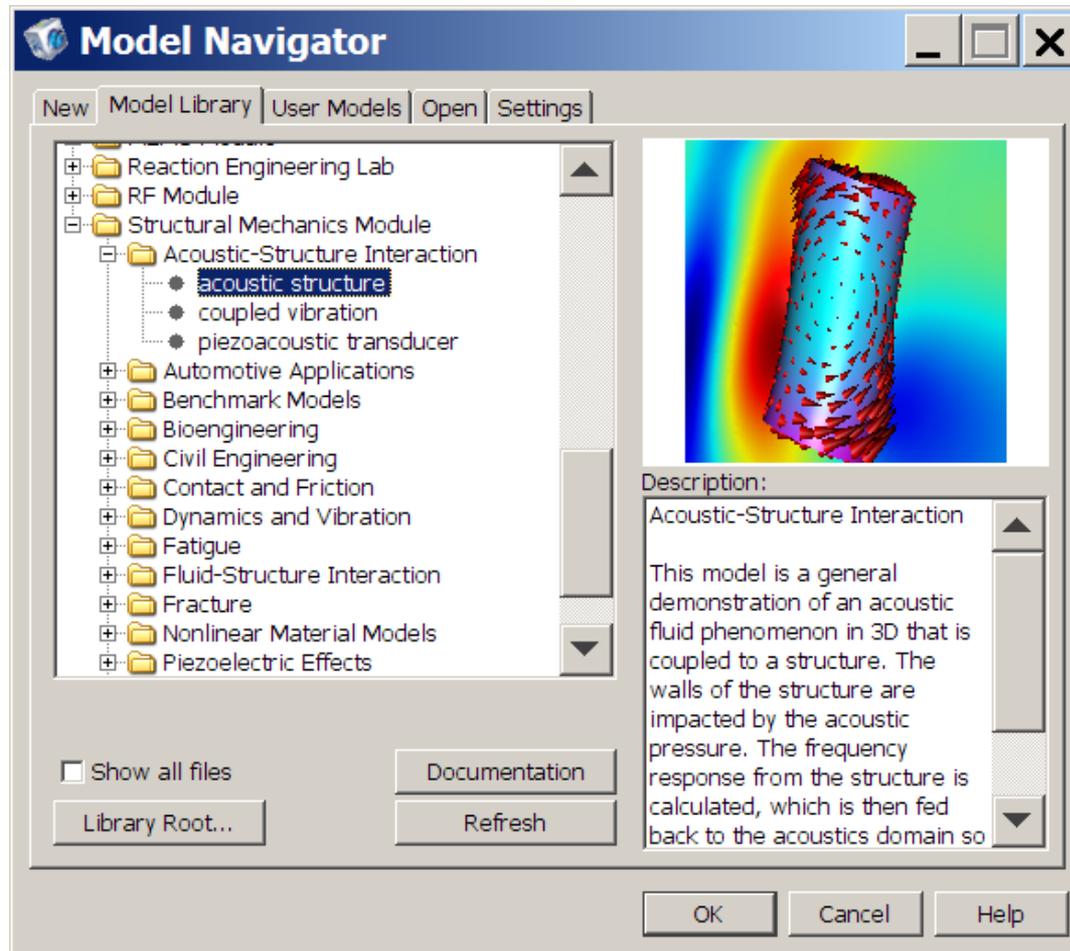


Mode (1,0,1) -  $f = 45.1$  Hz



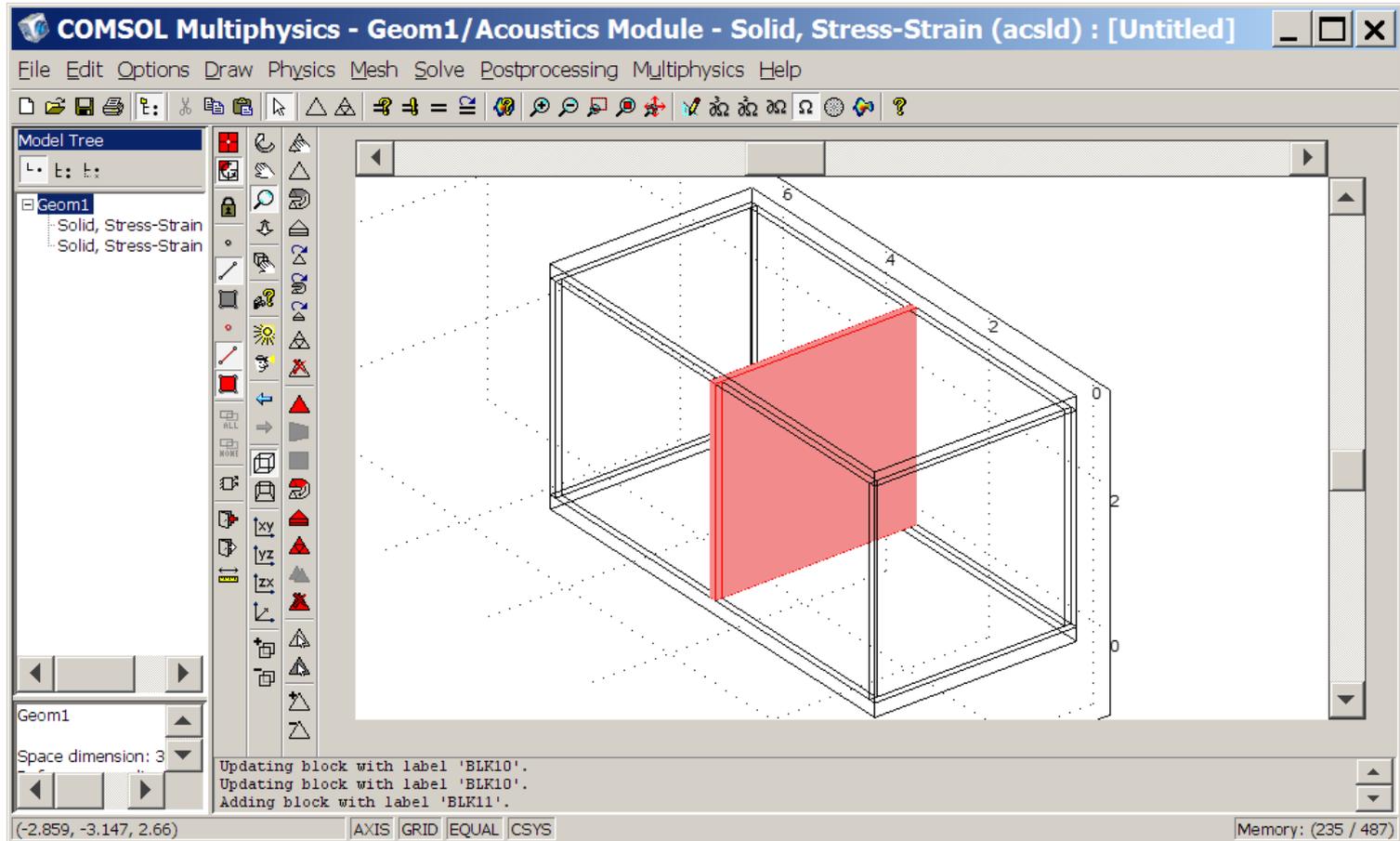
- Analisi modale (ricerca delle risonanze naturali di una stanza)

# Il modellatore multifisico Comsol



- E' possibile accoppiare la simulazione del campo acustico nell'aria con il campo vibrazionale nelle strutture

# Il modellatore multifisico Comsol

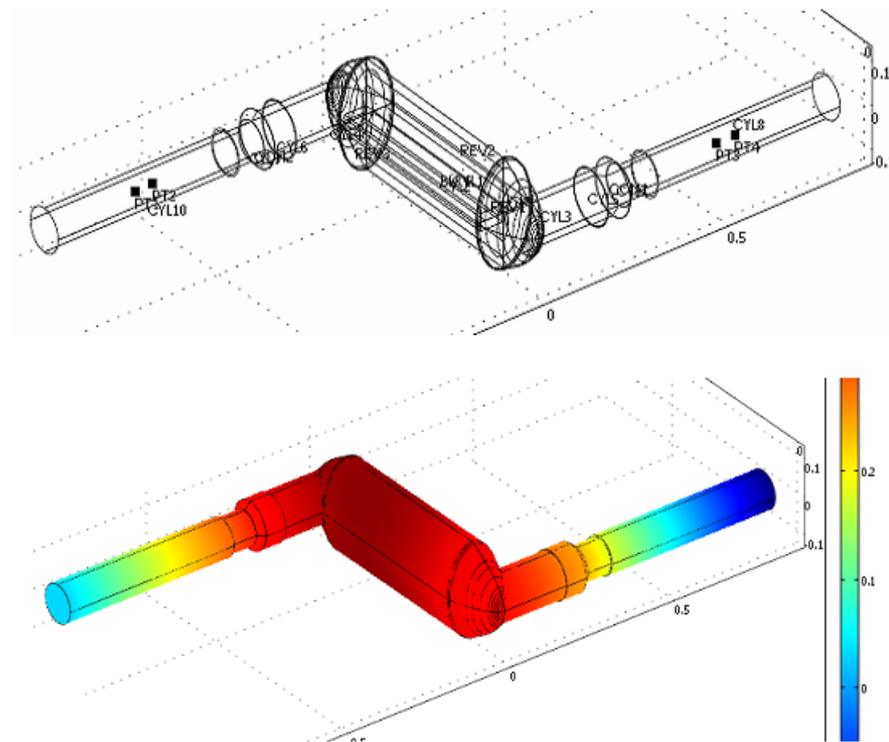


- Simulazione 3D acustica/strutturale di due stanze accoppiate

# Il modellatore multifisico Comsol

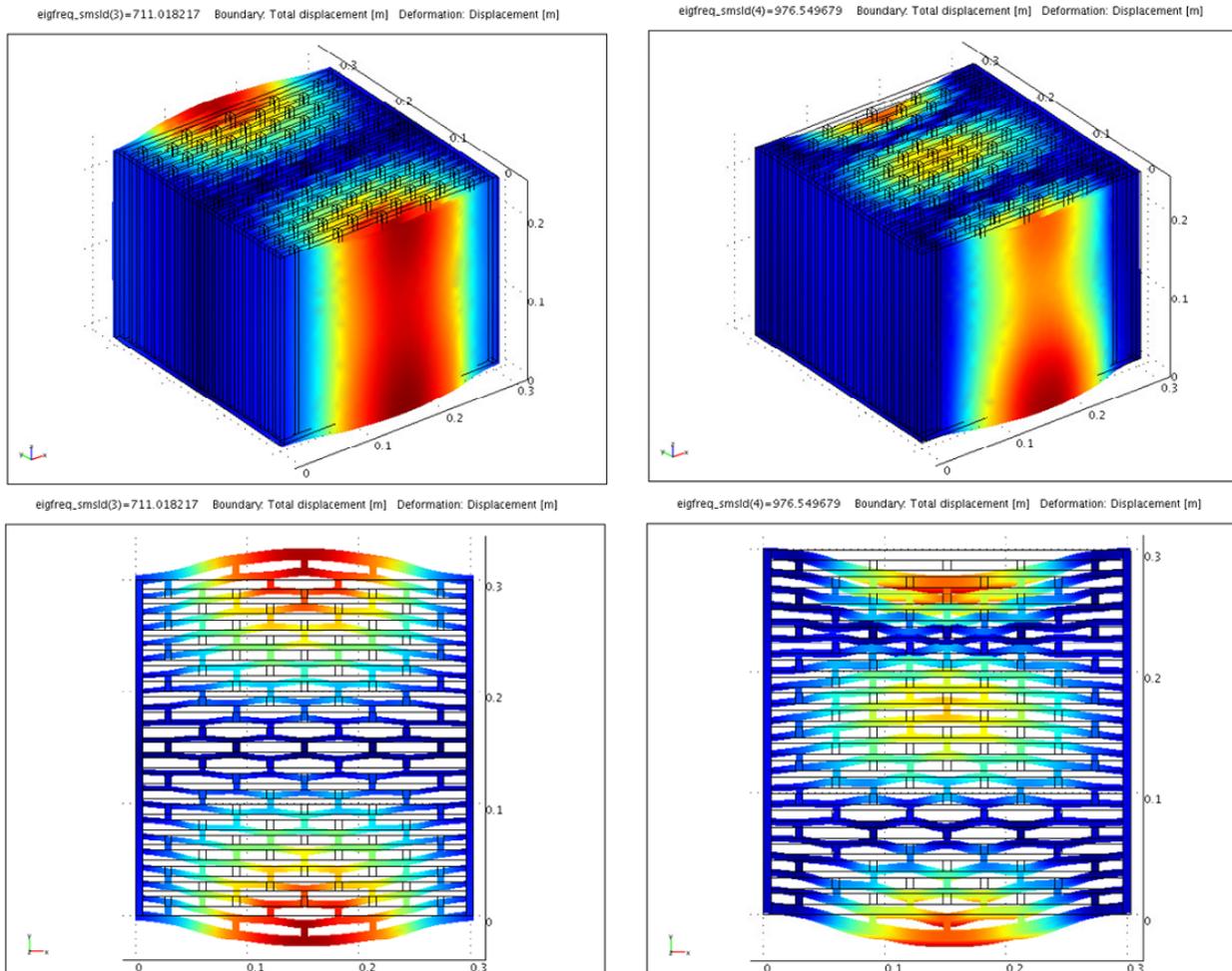
## Software commerciale *Comsol Multiphysics 3.2* ®

- Costruzione della **geometria** del modello completo
- **Condizioni al contorno**
  - Sorgente sonora: condizione di radiazione
  - Terminazione: impedenza  $\rho_0 c_0$
  - Pareti infinitamente rigide
- **Sottodomini**  
 $\rho$  e  $c$  nel "mezzo equivalente"
  - Aria ( $\rho_0$  e  $c_0$ )
  - Materiale fonoassorbente



- Simulazione di un silenziatore per la riduzione del rumore degli impianti in una civile abitazione

# Il modellatore multifisico Comsol



- Modi di vibrazione a 711 e 976 Hz di un blocco di laterizio alveolato

# CONCLUSIONI

- Gran parte dei tecnici acustici opera attualmente con la metodologia del passato (misure tradizionali), ed in fase di progetto degli edifici non effettua alcuna simulazione, limitandosi a fare affidamento su una certa collezione di risultati di misure in opera ottenuti con soluzioni tecniche ormai standardizzate.
- Sono invece disponibili alla stato attuale metodiche di misura standardizzate che offrono significativi vantaggi, sia in termini di identificazione dei difetti costruttivi (intensimetria) che di robustezza, rapidita' ed economicita' della misura (metodo pseudo-impulsivo)
- Sono altresì disponibili software di basso costo in grado di stimare con ragionevole accuratezza le prestazioni acustiche dell'edificio, basati su un metodo standardizzato (EN 12354)
- La ricerca sta infine sviluppando ulteriori metodiche di misura e di simulazione, che fra 2/3 anni saranno disponibili per tutti