

STUDIO  
SOUND  
SERVICE

Il **M**oderno **S**tudio **d**i **R**egistrazione  
e **d**i **P**roduzione **A**udio

[www.mmm.unifi.it](http://www.mmm.unifi.it)

*Martedì 28/10/2014 - Conservatorio Tito Schipa, Lecce*

dott. **D**onato **M**asci  
[donatomasci@gmail.com](mailto:donatomasci@gmail.com)

# Introduzione all'acustica degli ambienti chiusi

**slide disponibili al link:**

[www.studiosoundservice.com/didattica/materiale-didattico](http://www.studiosoundservice.com/didattica/materiale-didattico)

# Presentazione

Works » Studi di Registrazione Teatri Chiese Radio Auditorium – Sale Conferenza Italiano English

 **STUDIO SOUND SERVICE**  
acoustic design

Home News Studio » Servizi » Didattica » Realizzazioni » Portfolio Contatti search this site...



« Progettiamo e correggiamo l'acustica per ogni spazio ed ogni suono. »

[www.studiosoundservice.com](http://www.studiosoundservice.com)

# Progettazioni acustiche



- Studi di registrazione
- Teatri - Sale da concerto
- Auditorium - Sale Conferenza
- Cinema, studi radio/TV
- Luoghi di culto
- Consulenze in acustica edile, civile, industriale e legale

# Portfolio

## Studio Sound Service s.a.s.

### Studi per artisti e produttori come:

- Andrea Bocelli, Eros Ramazzotti, Ligabue, Piero Pelù, Enrico Cremonesi, Mogol, Venditti, Masini, Homo Sapiens, Planet Funk, Mario Manzani, Roberto Zanetti

### Circa 300 studi di registrazione e mastering in tutta Italia tra cui citiamo:

- Larione 10, Firenze
- House of Glass (Gianni Bini), Viareggio (LU)
- International Sound, Conversano (BA)
- Top Studio (Pietro Benini), Savio Ravenna (RA)
- Sound Studio Service (Capaccioni), Città di Castello (PG)
- Audacia Records (Stornelli), Avezzano (AQ)
- Creative Mastering (Cappelli), Forlì
- PPG Studio (Guerrini - Bocelli) S. Pietro Belvedere (PI)
- Sudestudio, Guagnano (LE)

### Studi radio/televisivi e postpr. a/v

- Mediaset (Matrix, Striscia la Notizia, TG5 e altri)
- Radio Subasio, Radio Toscana, Lady Radio, Radio Cuore, Radio Blu
- Jinglebell, Milano

### Cinema

- Home cinema per George Lucas in residenza privata italiana
- Cromie Disco e Imax, Castellaneta Marina (TA), Cinema a 360°

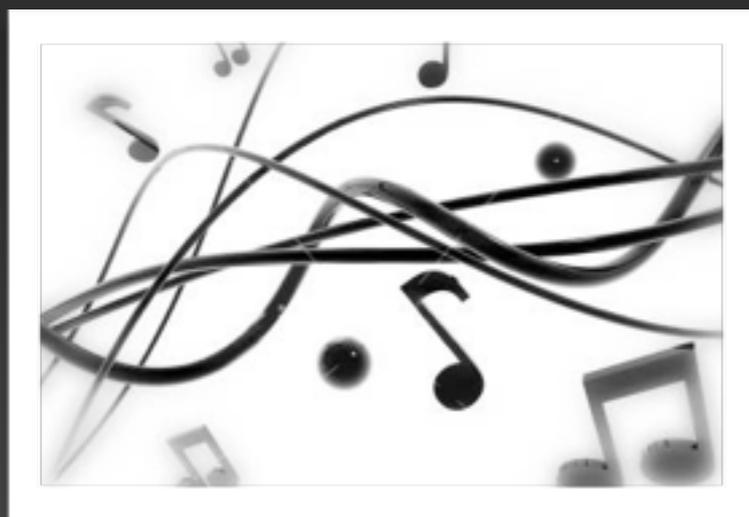
### Edifici Religiosi

- Santuario di Maria Theotokos di Loppiano (FI) (più teatro/auditorium annesso)
- Chiesa di Santa Maria Nuova di Terranuova Bracciolini (AR) (arch. Mario Botta)
- Chiesa di San Gerardo a Monza
- Chiesa di Castiglioncello del Trinoro, Sarteano

### Teatri e Auditorium

- Auditorium del Nuovo Palazzo di Giustizia di Firenze *(in lavorazione)*
- Teatro Bucci San Giovanni Valdarno *(in lavorazione)*
- Teatro Boccaccio di Certaldo *(in lavorazione)*
- Teatro Politeama di Poggibonsi
- Teatro del Popolo di Colle Val D'Elsa
- Teatro del Popolo di Castelfiorentino
- Teatro dei Risorti di Buonconvento

# Il Fenomeno Sonoro



Sorgente

1



Mezzo

*(zona di trasmissione)*

2



Ascoltatore

3

# Il Mezzo elastico

Il suono richiede un mezzo elastico in cui propagarsi.

**Il suono nell'aria:** le particelle di materia coinvolta nel trasporto del suono fluttuano attorno ad una posizione di equilibrio e il loro moto è parallelo alla direzione dell'onda:  
**onde longitudinali.**

In altri mezzi il suono si può propagare sotto forma di  
onde di tipo trasversale.

# Velocità del suono

La velocità del suono è la velocità con cui un suono si propaga in un certo ambiente, detto mezzo.

**La velocità del suono varia a seconda del mezzo** (ad esempio, il suono si propaga più velocemente nell'acqua che non nell'aria), e varia anche al variare delle proprietà del mezzo, specialmente con la sua temperatura.

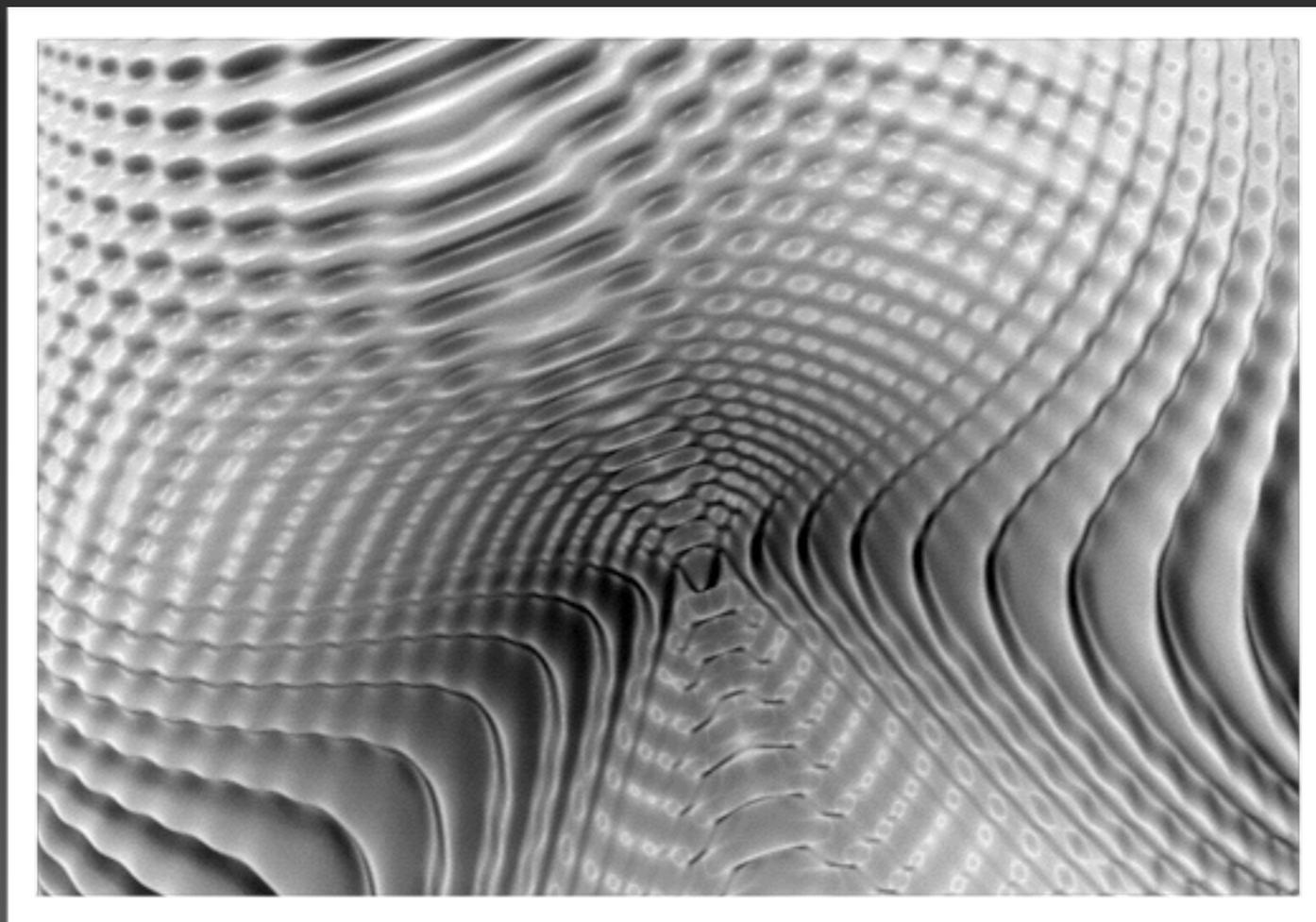
$$f = \frac{c}{\lambda} = \frac{343}{\lambda}$$

# Velocità del suono

| Influenza della temperatura dell'aria sulla velocità del suono |            |                             |                           |
|--|------------|-----------------------------|---------------------------|
| $T$ in °C  | $a$ in m/s | $\rho$ in kg/m <sup>3</sup> | $Z$ in N·s/m <sup>3</sup> |
| -10  | 325,4      | 1,341                       | 436,5                     |
| -5   | 328,5      | 1,316                       | 432,4                     |
| 0  | 331,5      | 1,293                       | 428,3                     |
| +5   | 334,5      | 1,269                       | 424,5                     |
| +10  | 337,5      | 1,247                       | 420,7                     |
| +15  | 340,5      | 1,225                       | 417,0                     |
| +20  | 343,4      | 1,204                       | 413,5                     |
| +25  | 346,3      | 1,184                       | 410,0                     |
| +30  | 349,2      | 1,164                       | 406,6                     |

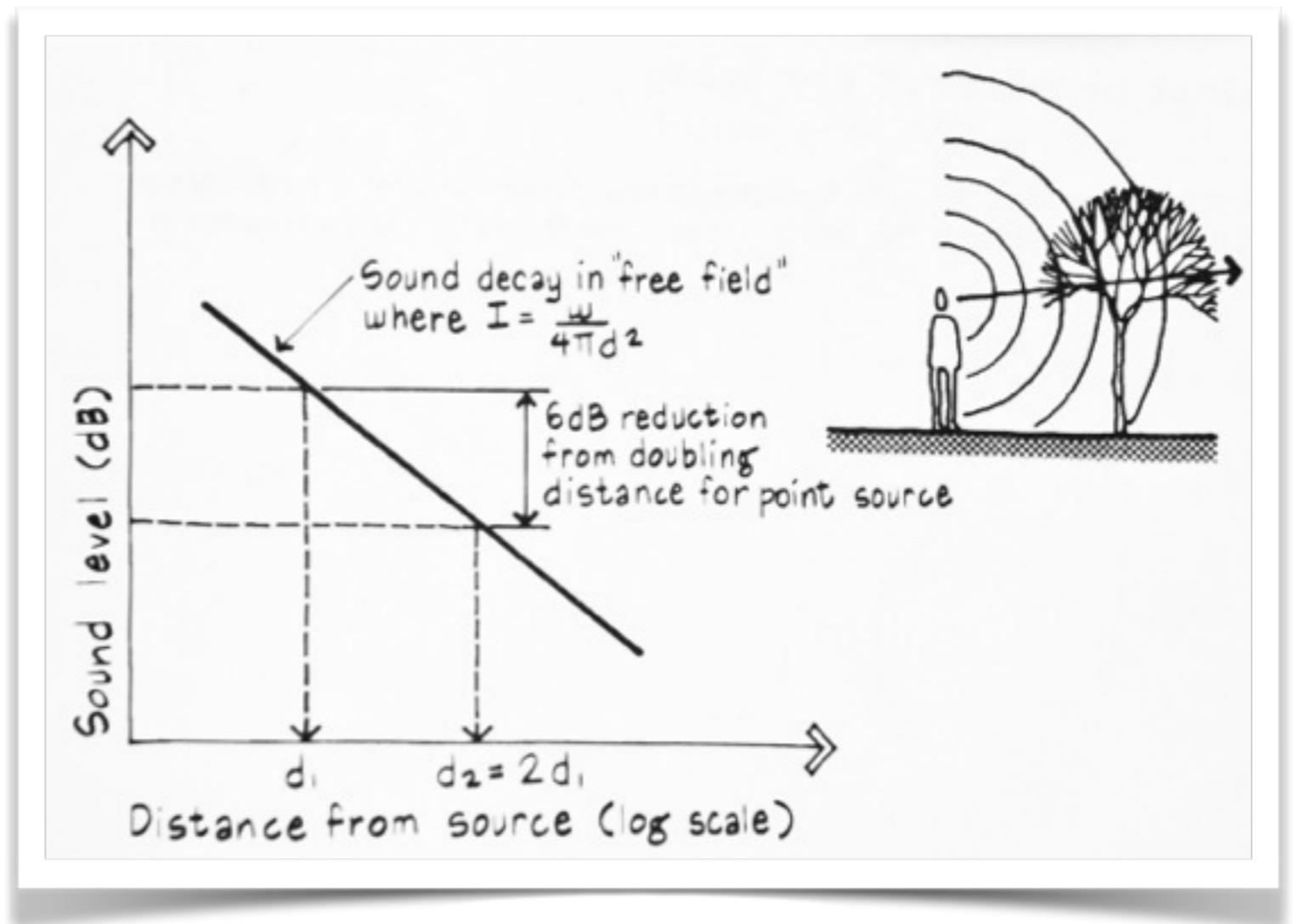
| Materiali         | Velocità del suono [m/s] |
|-------------------|--------------------------|
| Aria              | 343                      |
| Acqua             | 1 480                    |
| Ghiaccio          | 3 200                    |
| Vetro             | 5 300                    |
| Acciaio           | 5 200                    |
| Piombo            | 1 200                    |
| Titanio           | 4 950                    |
| PVC (morbido)     | 80                       |
| PVC (duro)        | 1 700                    |
| Calcestruzzo      | 3 100                    |
| Faggio            | 3 300                    |
| Granito           | 6 200                    |
| Peridotite        | 7 700                    |
| Sabbia (asciutta) | 10-300                   |

# Propagazione del suono

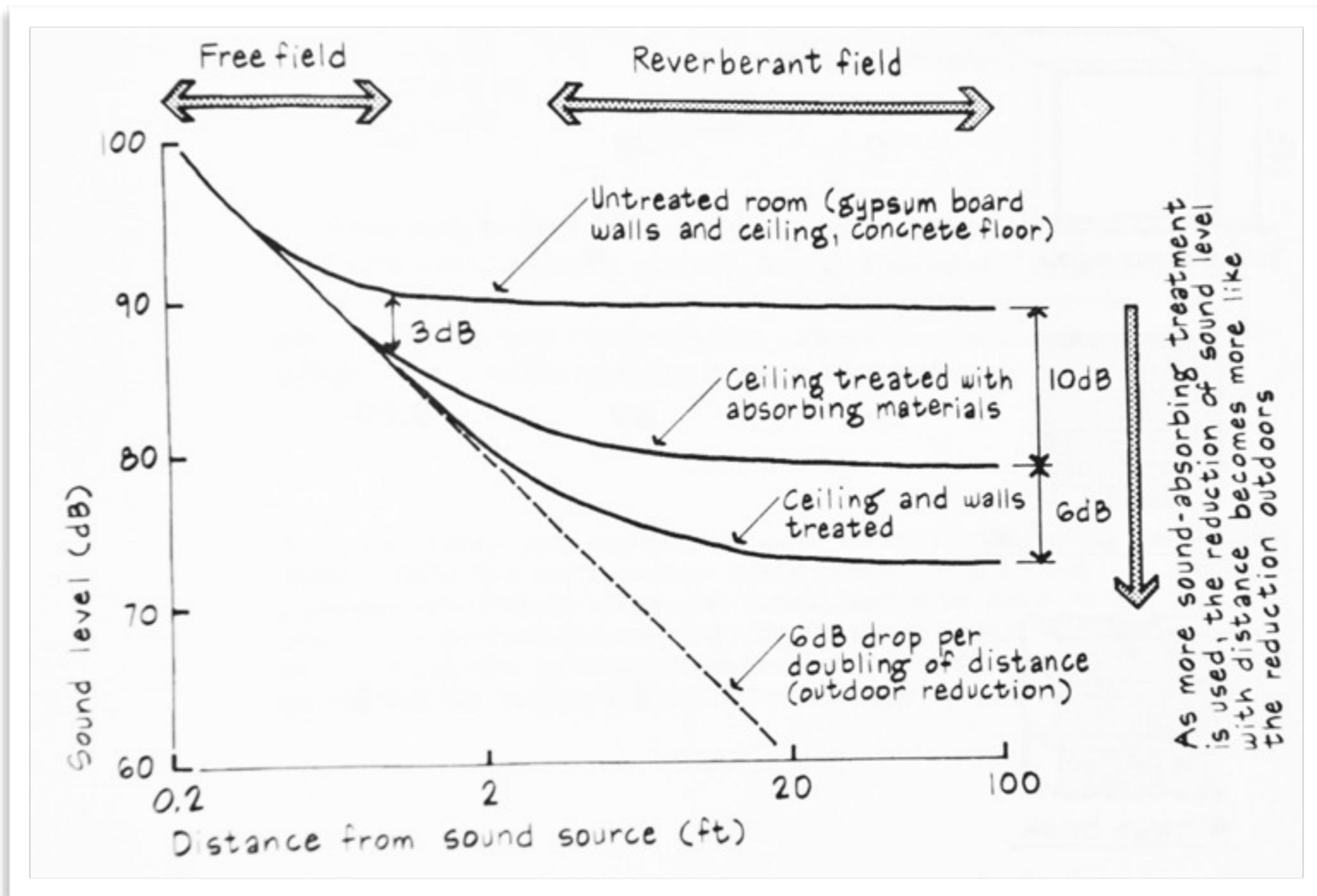


# Attenuazione del suono con la distanza in campo libero

In *campo libero* il suono decade di 6 dB per ogni raddoppio della distanza.



# Attenuazione del suono con la distanza in un ambiente chiuso

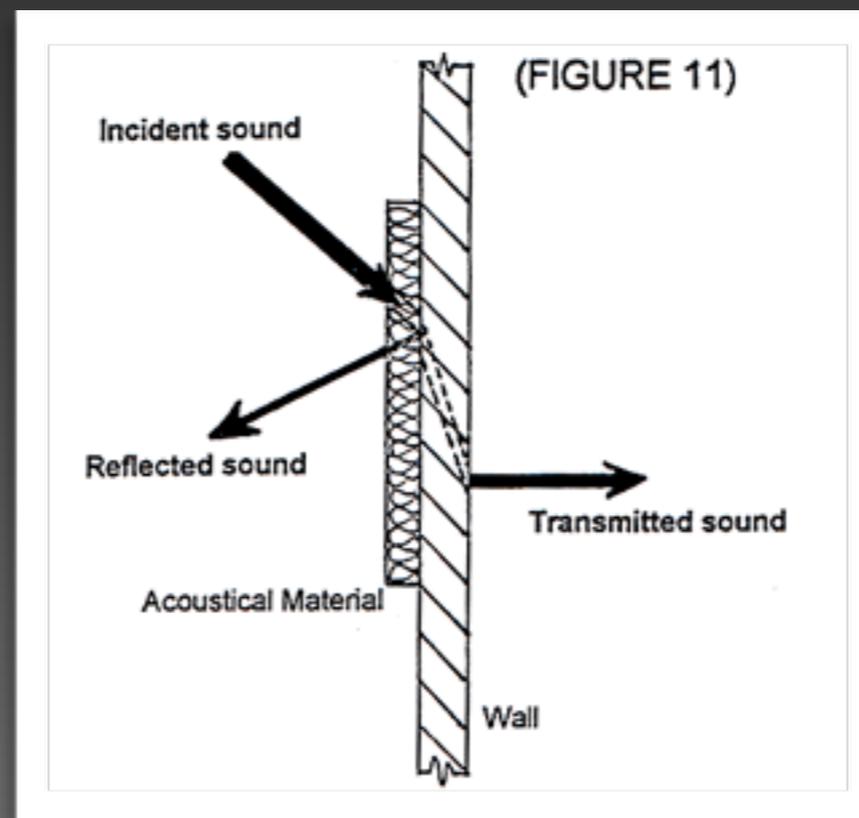


Il decadimento del suono in un ambiente chiuso dipende dalle proprietà *assorbenti*, *riflettenti* e *diffondenti* delle superfici che lo costituiscono.

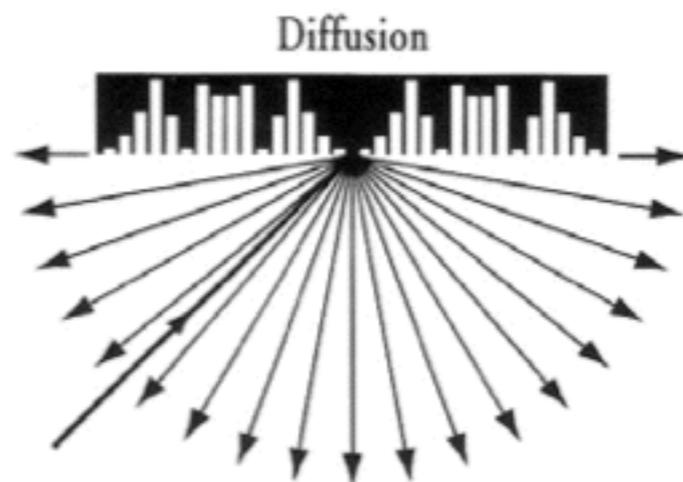
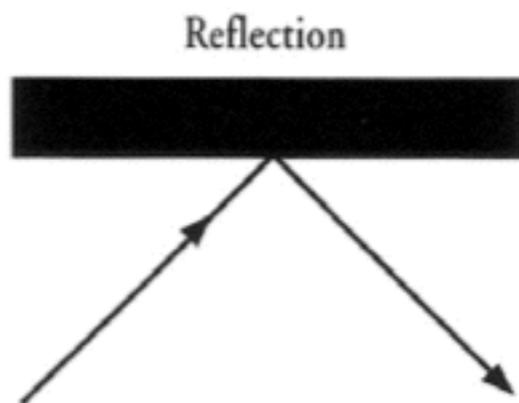
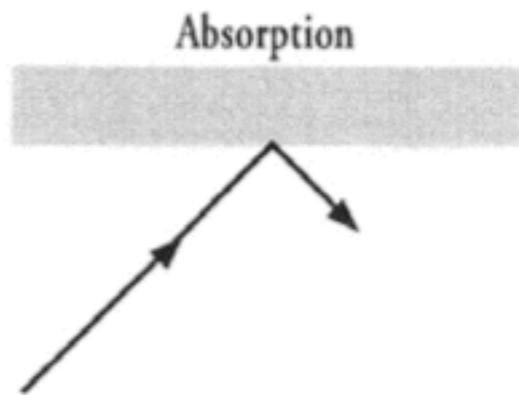
(muri, pavimenti pareti, oggetti, persone etc)

Se l'ambiente chiuso è  
riverberante, il livello di  
pressione sonora è  
(con buona approssimazione)  
lo stesso in tutti i punti.  
( $L_p$  non dipende da  $r$ )

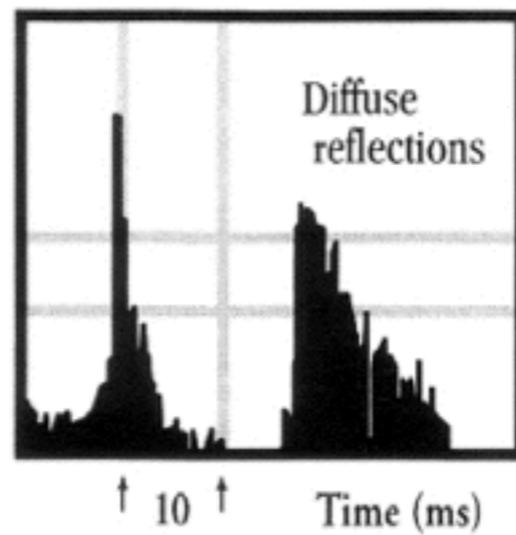
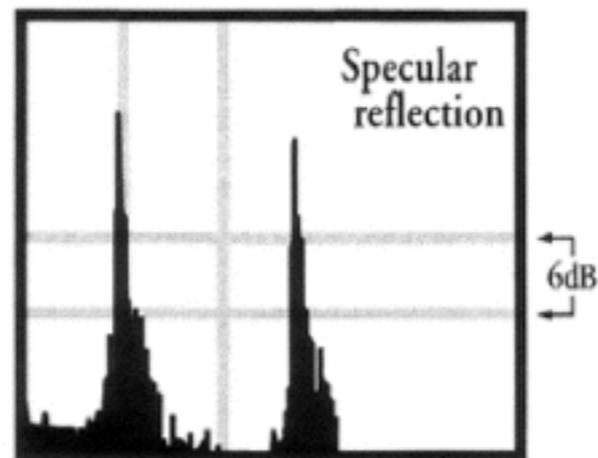
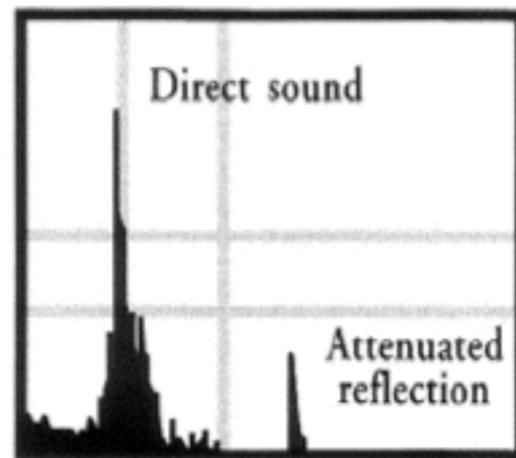
# Proprietà dei Materiali: assorbimento, riflessione e diffusione



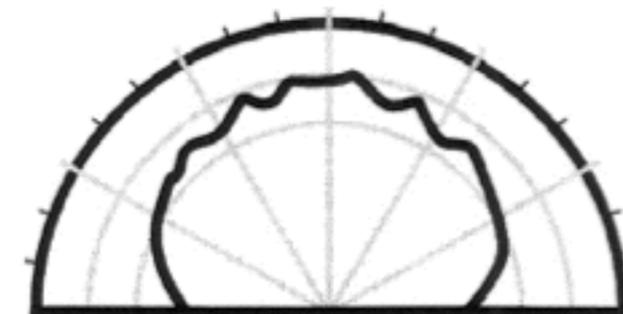
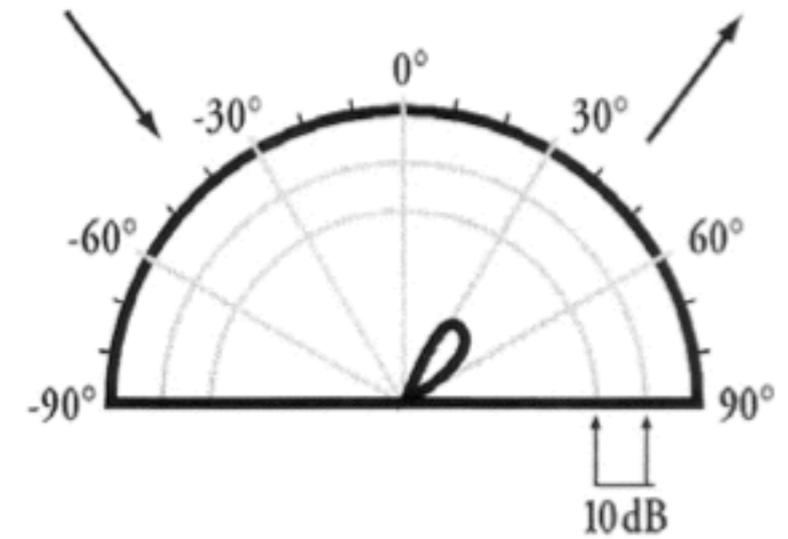
Acoustical treatment



Temporal response

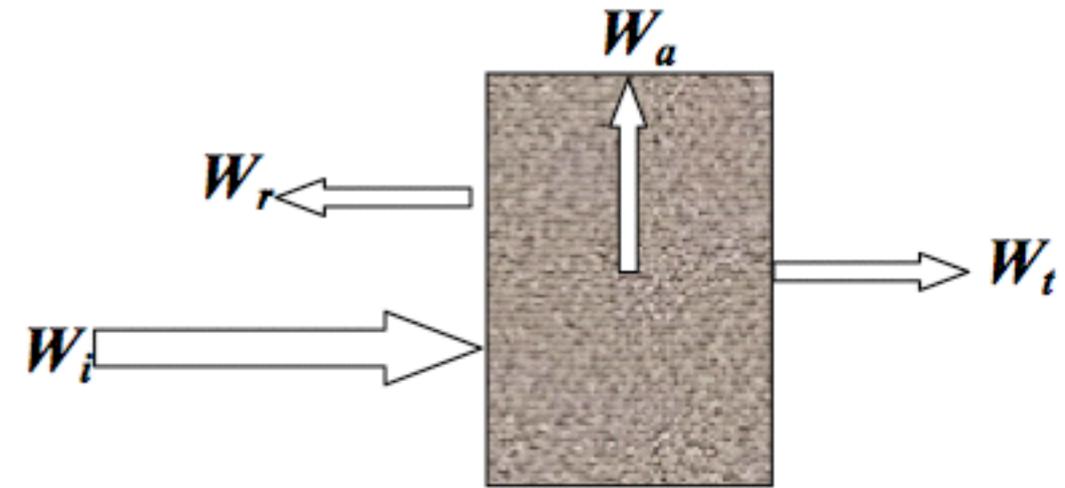


Spatial response



**Le proprietà di assorbimento,  
riflessione e diffusione  
acustica influiscono sulle  
caratteristiche  
temporali e spaziali  
dell'ambiente.**

In un ambiente chiuso la porzione di energia riflessa dalle superfici di confine dipende dal loro comportamento acustico, in generale descritto dai coefficienti di riflessione, assorbimento e trasmissione:



Bilancio energetico per il teorema della conservazione dell'energia:

$$W_i = W_r + W_a + W_t$$

Definisco i coefficienti come rapporti tra energie:

$$r = \frac{W_r}{W_i} \quad \delta = \frac{W_a}{W_i} \quad \tau = \frac{W_t}{W_i}$$

Relazione tra i coefficienti:

$$r + \delta + \tau = 1$$

Definizione di coefficiente di assorbimento acustico apparente:

$$\alpha = 1 - \frac{W_a + W_t}{W_i} = 1 - r$$

# Assorbimento acustico

Assorbimento acustico  
di una superficie:

$$A = S \cdot \alpha \quad [\text{m}^2]$$

Assorbimento acustico totale di  
una stanza con n superfici:

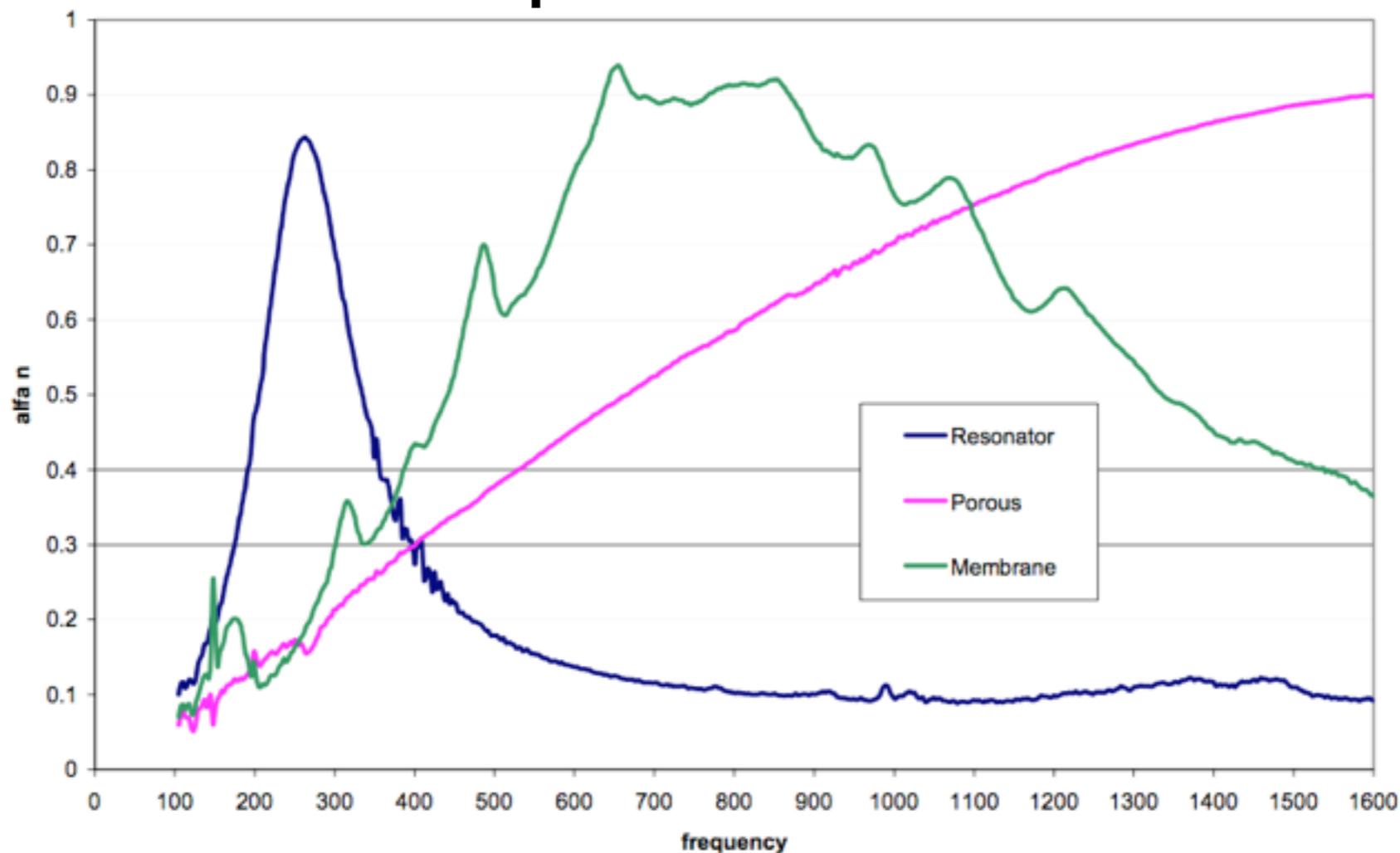
$$A = S_1\alpha_1 + S_2\alpha_2 + \dots + S_n\alpha_n = \Sigma S_i\alpha_i \quad [\text{m}^2]$$

# Assorbimento acustico

1. Assorbimento per porosità

2. Assorbimento per risonanza di membrana

3. Assorbimento per risonanza di cavità



# I. Materiali assorbenti per porosità

Assorbono l'energia sonora per un fenomeno di tipo dissipativo legato all'attrito viscoso che si genera tra struttura del materiale e particelle d'aria in moto

**materiali fibrosi** (lana di vetro, lana di roccia, fibra di poliestere, feltri fibre di acido polilattico (mais), fibre vegetali (cotone, canapa, cocco, legno, cellulosa etc), fibre animali (lana, piuma d'oca etc))

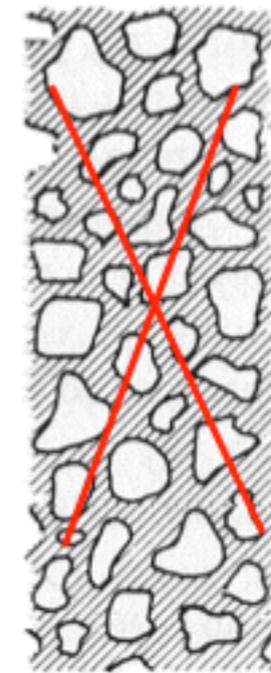
**materiali porosi (o a celle aperte)** (poliuretani espansi a cella aperta, resina melamminica, schiuma espansa a base di polietilene, schiume di alluminio, aggregati di elastomeri espansi, altri materiali aggregati tipo pietra, gomma plastica etc)

# NON SONO FONOASSORBENTI!!!

Attenzione perché sul mercato ci sono molti materiali che vengono venduti con esoteriche proprietà fonoassorbenti, quindi è facile sbagliare, in particolare diffidate dai materiali che non hanno almeno uno dei seguenti requisiti:

- contengono un'elevata percentuale di aria al loro interno, in collegamento con l'ambiente esterno
- consentono al campo acustico di penetrare al loro interno e di dissipare energia per attrito viscoso sulle pareti della struttura del materiale

**SI**

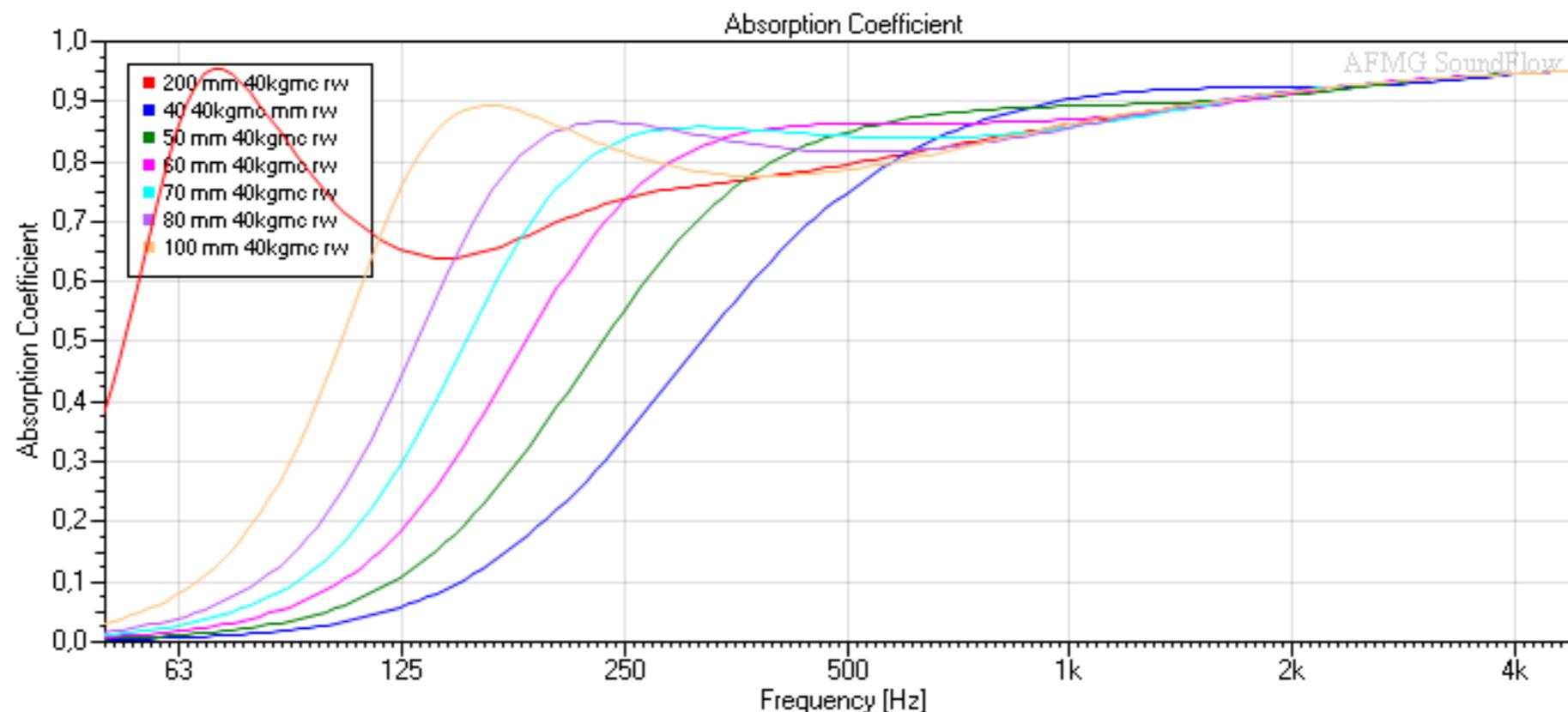


**NO**

Esempio:  
Polietilene,  
poliuretani a cella  
chiusa, polistirolo

# Effetto dello spessore nell'assorbimento

Lo spessore del materiale fonoassorbente aumenta le prestazioni di fonoassorbenza in particolar modo alle basse frequenze.

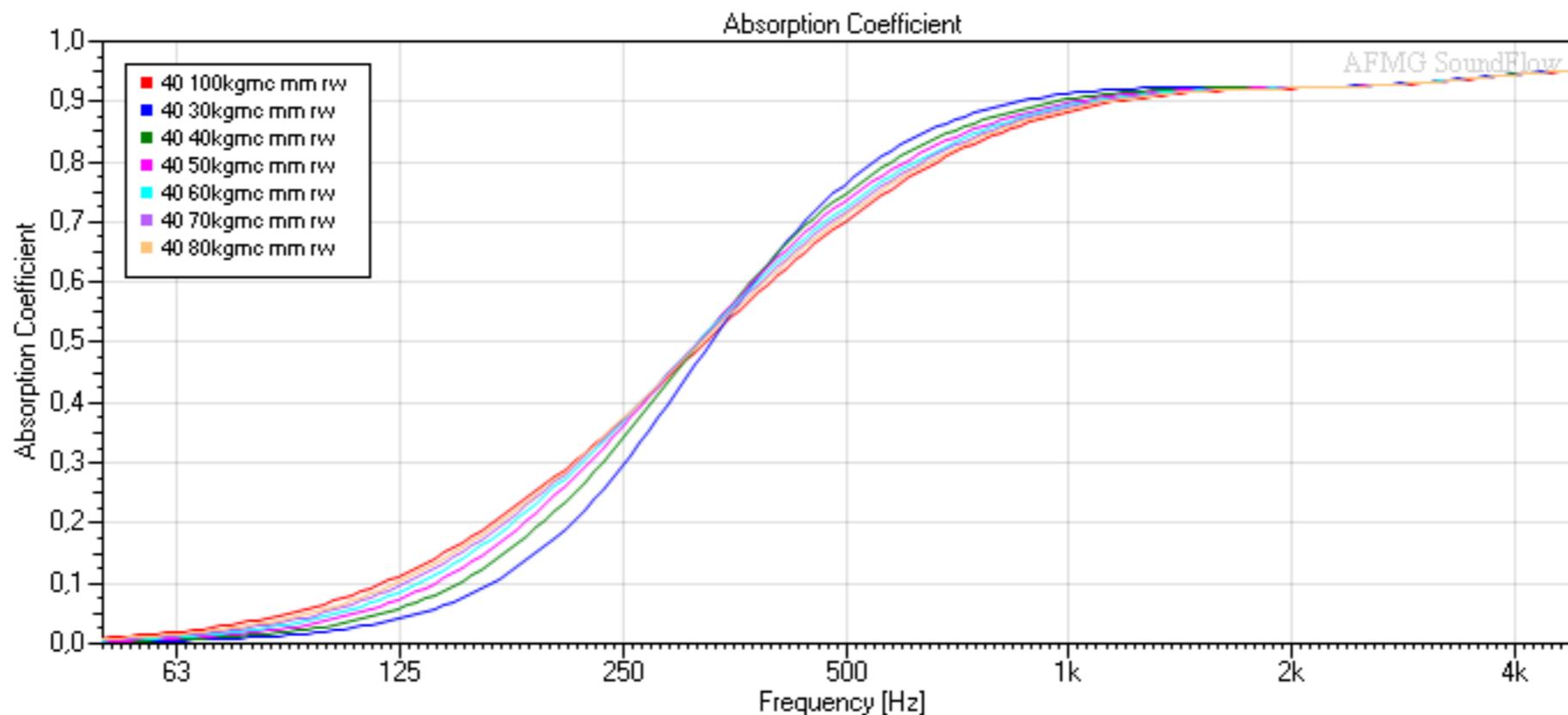


Attenzione perchè 5 cm di lana di roccia non assorbono praticamente niente sotto i 100 HZ!!!

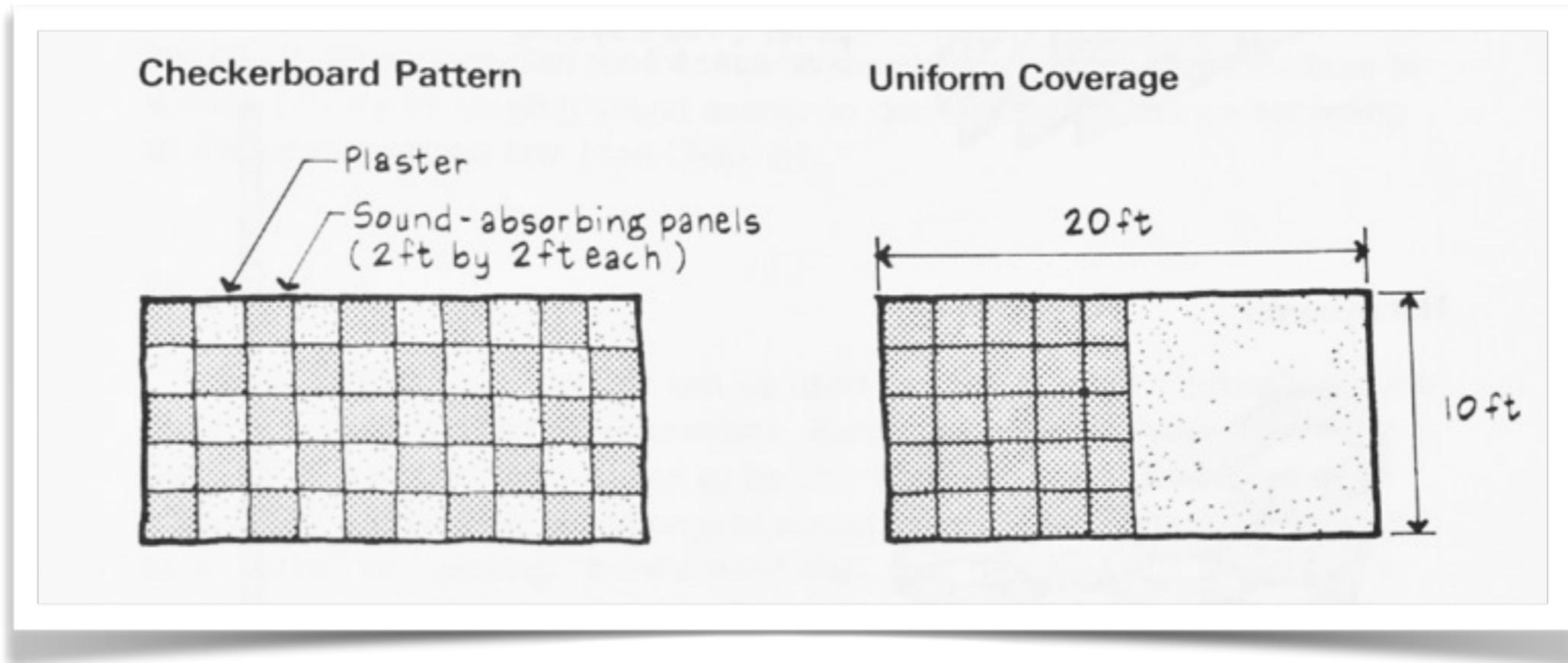


# Effetto della densità nell'assorbimento

La densità influisce poco nell'assorbimento: conviene (economicamente) molto di più utilizzare materiali leggeri (max 40 kg/m<sup>3</sup>) magari più spessi o montati su camera d'aria.

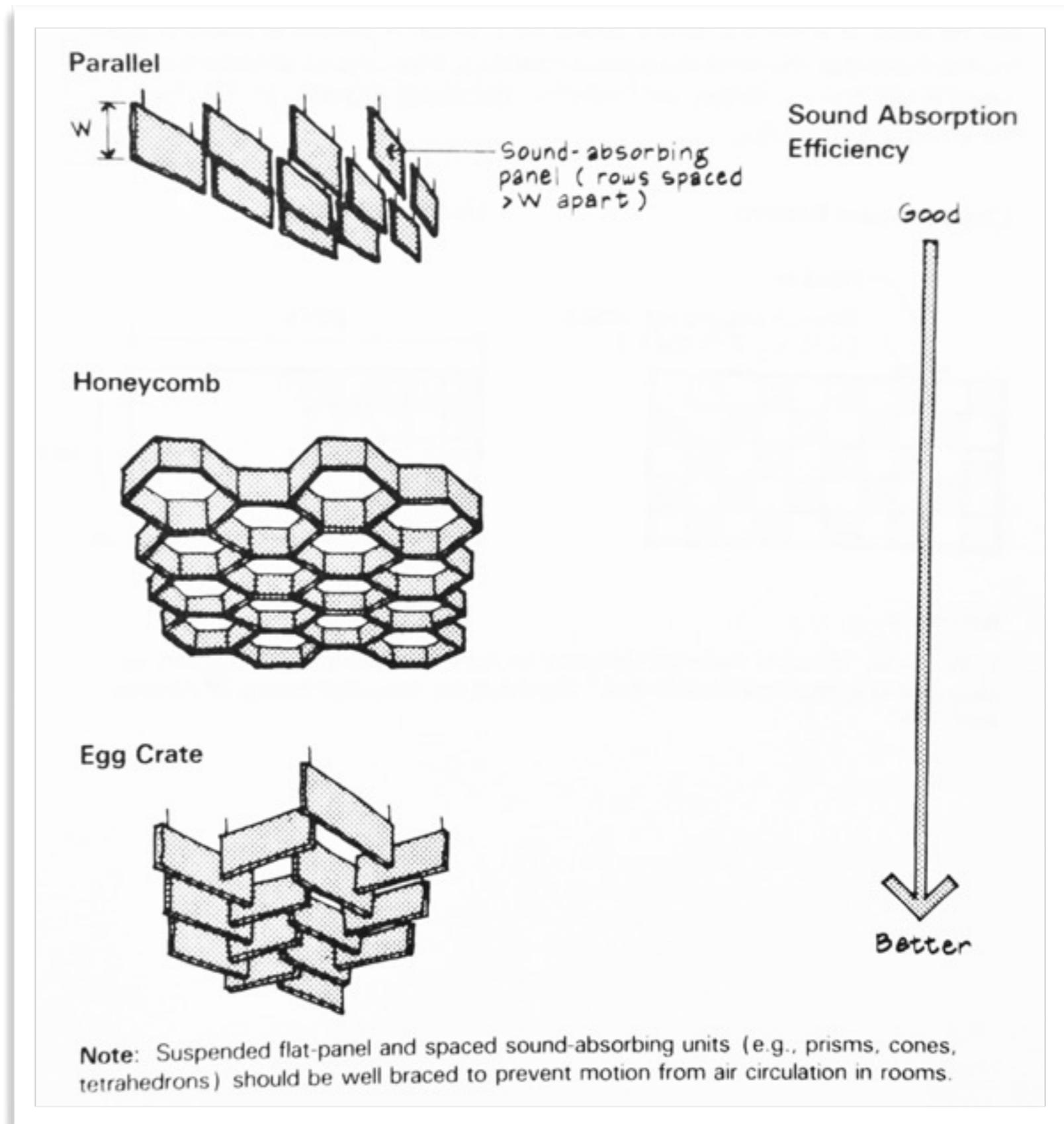


# “Area Effect”



L'efficienza di un materiale fonoassorbente può variare in base alla distribuzione e posizionamento in una stanza. Per esempio 25 pannelli assorbenti assorbiranno più energia sonora se posizionati a scacchiera piuttosto che in modo uniforme. Questa variazione è dovuta alla diffrazione dell'energia sonora attorno ai perimetri dei pannelli spaziatati tra loro e all'assorbimento addizionale dei loro bordi.

L'“Area Effect” influisce anche in 3 dimensioni: un caso pratico è l'installazione dei baffles a soffitto. Alcuni pattern sono meglio di altri.



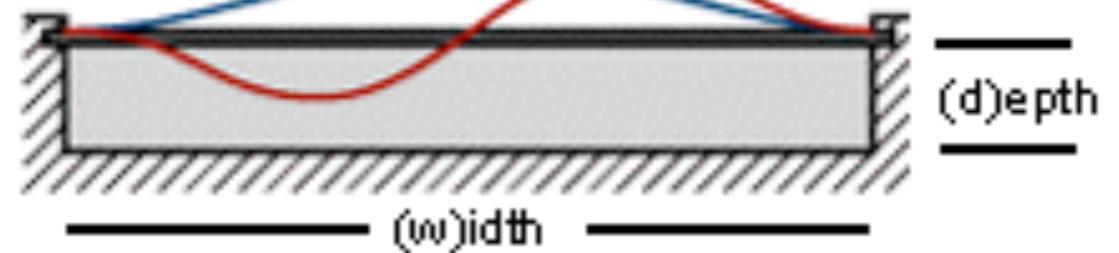
## 2. Assorbitori a membrana

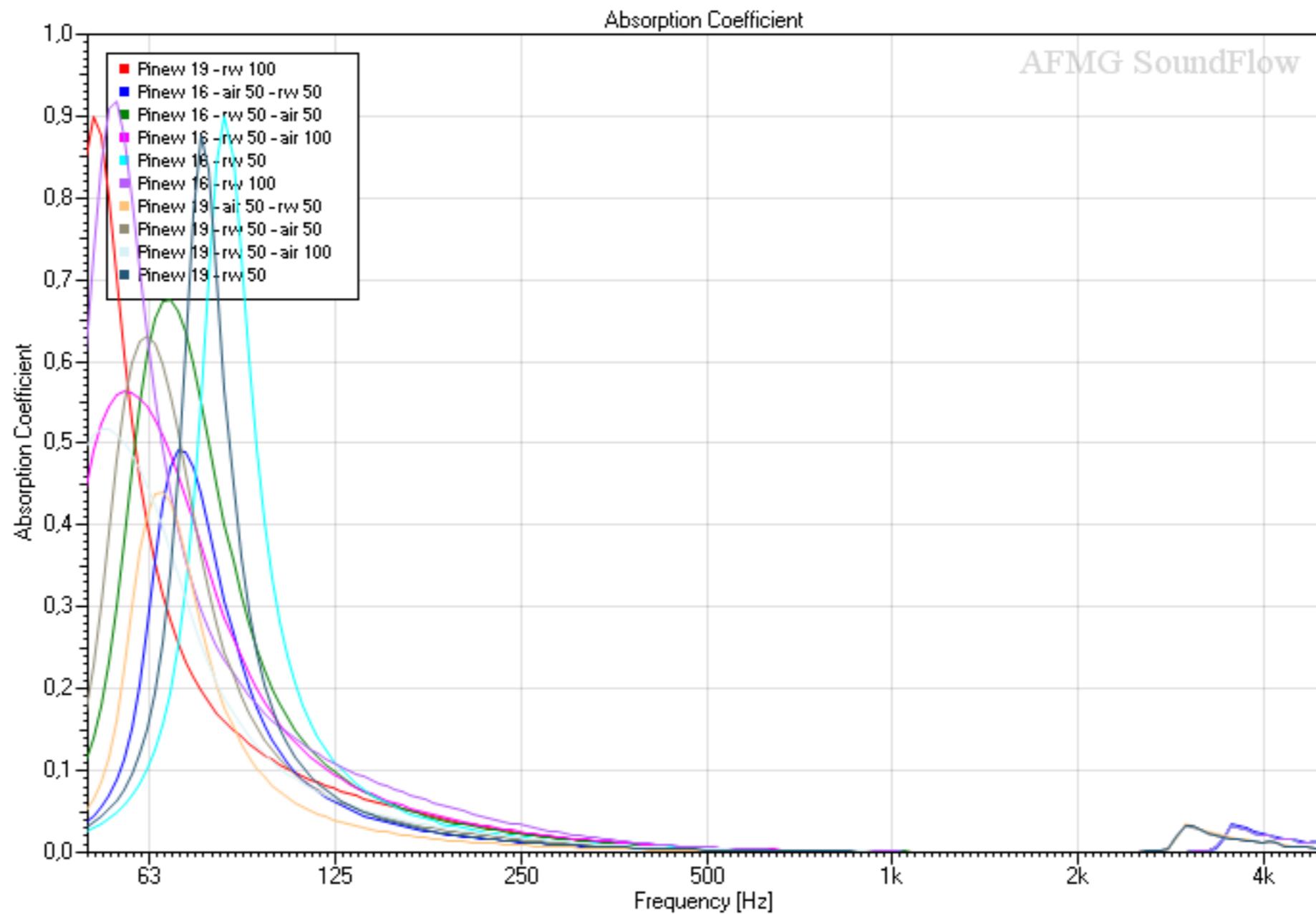
Assorbono l'energia sonora per un fenomeno di tipo dissipativo legato allo smorzamento dell'oscillazione che si genera alla risonanza della massa d'aria parzialmente confinata o di una superficie vibrante sollecitata da onde sonore incidenti su di essa.

$$f_0 = \frac{62}{\sqrt{\rho_A \cdot d}}$$

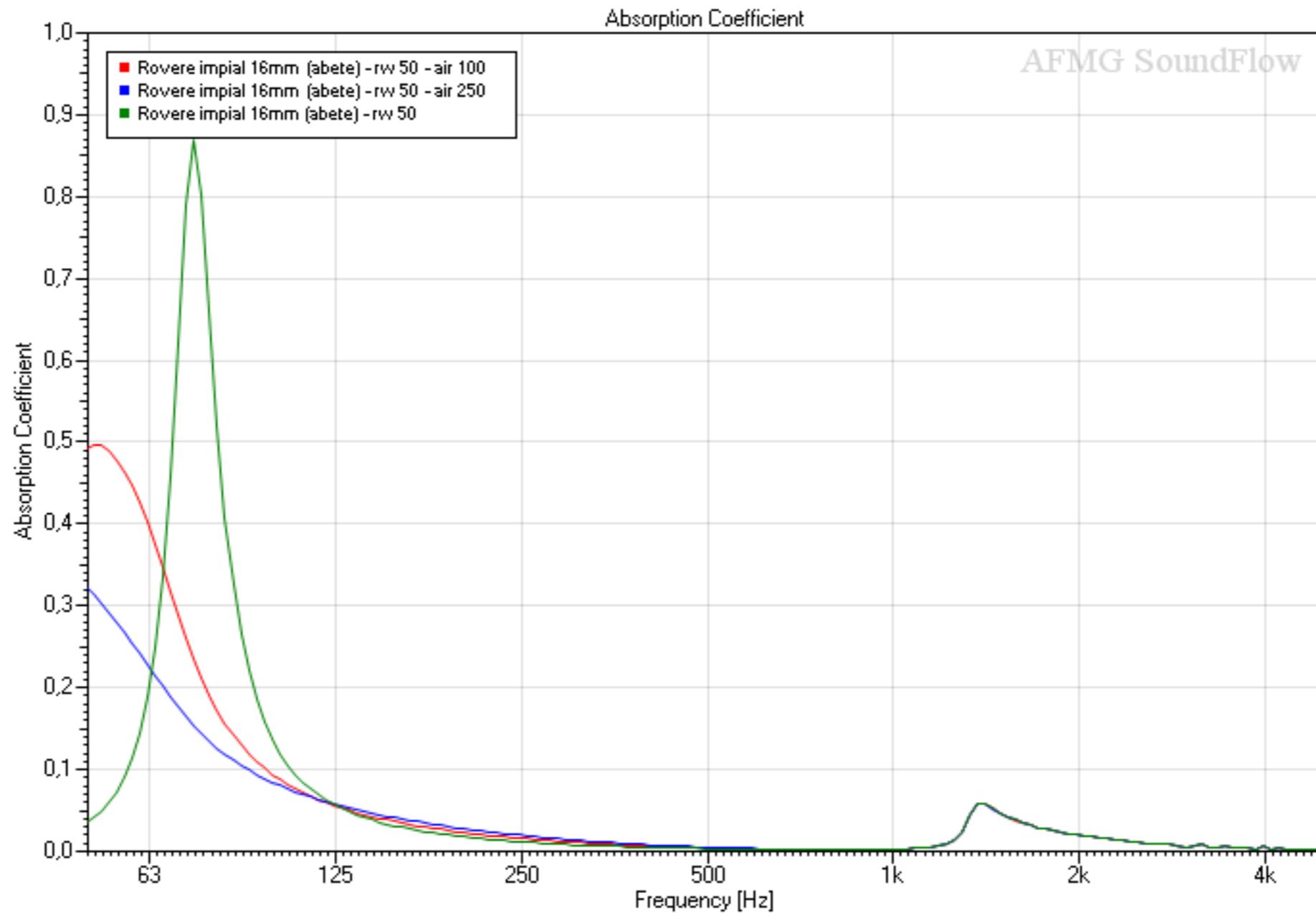
$\rho_A$  = densità del pannello (kg/m<sup>2</sup>)

$d$  = spessore della camera d'aria (cm)





**Pannelli risonanti: nella legenda il primo numero indica lo spessore in mm del pannello, la sigla rw indica la lana di roccia e il suo spessore e la sigla air indica la camera d'aria e il suo spessore.**



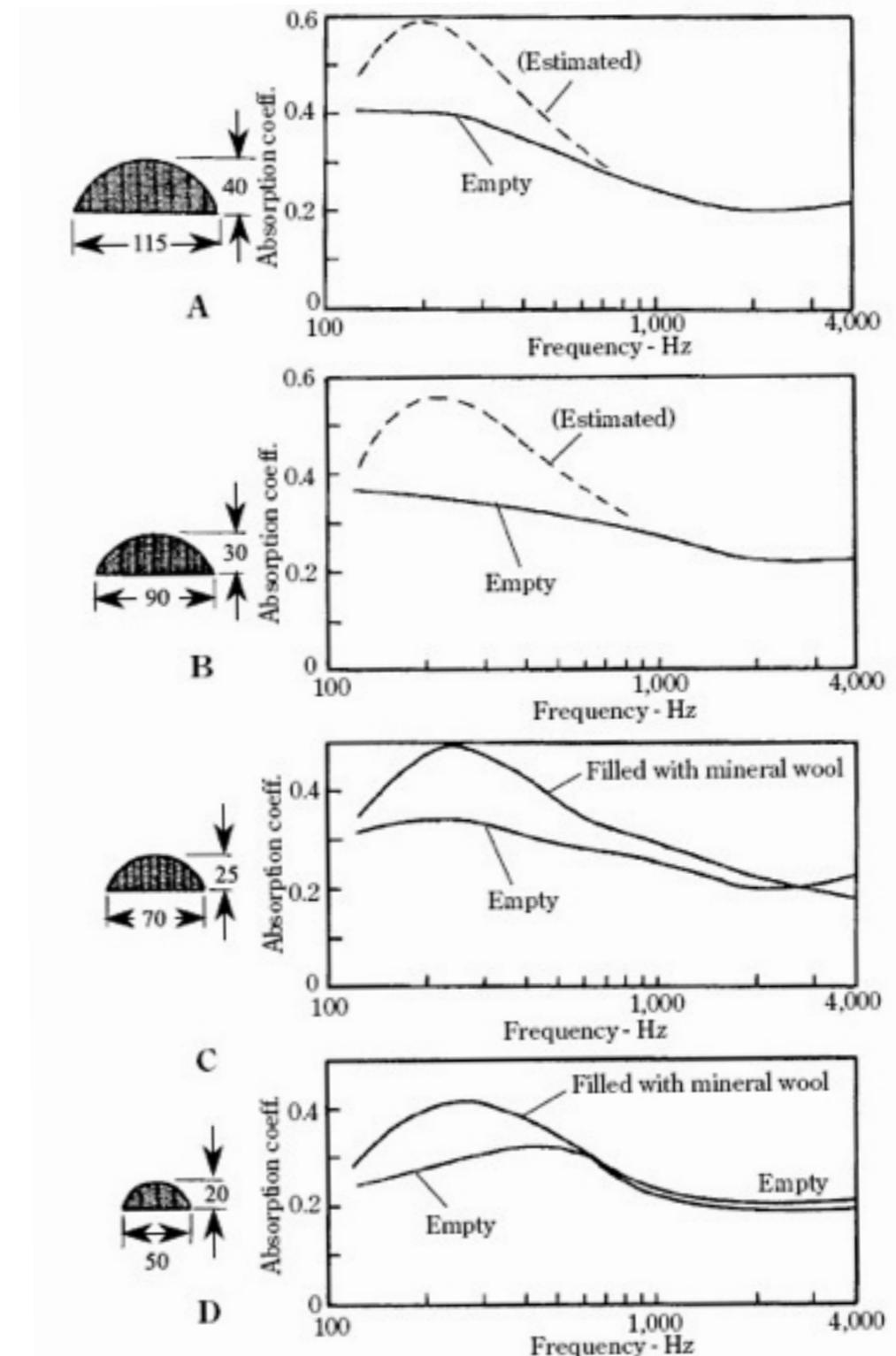
Tre diversi pannelli risonanti in rovere impiallacciato su abete: nella legenda il primo numero indica lo spessore in mm del pannello, la sigla rw indica la lana di roccia e il suo spessore e la sigla air indica la camera d'aria e il suo spessore.

# Assorbitori policilindrici

sono diffusori (ad alte freq.) e  
assorbitori (alle medio-basse)

Il policilindrico inoltre irradia il  
suono con un angolo di circa  $120^\circ$   
contro i  $20^\circ$  di un pannello piatto

Se il poly viene riempito con  
materiale assorbente  
aumenterà il suo potere  
assorbente per le basse  
frequenze, vedi fig a lato.



# Esempi di assorbitori diffusori policilindrici



# Esempi di assorbitori diffusori policilindrici



# 3. Assorbitori per Risonanza

Risonatori di Helmholtz

Assorbitori a pannelli forati

Assorbitori a stecche

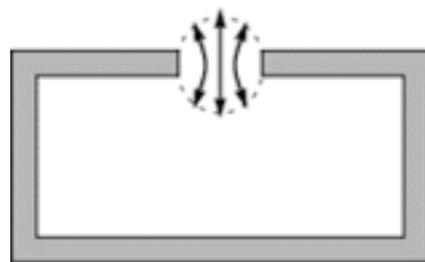
# Il principio della risonanza di Helmholtz

Il sistema si basa su una massa che vibra in risonanza con una molla.

Il rapporto tra la massa e la rigidità dinamica della molla definisce la frequenza di risonanza.

In questo caso l'aria agisce come una molla con una rigidità dinamica definita dal suo volume: più grande è il volume e più diventa debole la molla (frequenza di risonanza più bassa).

Per un risonatore di Helmholtz la massa è rappresentata dalla massa d'aria racchiusa nel collo del risonatore.



$$f_H = \frac{c}{2\pi} \sqrt{\frac{A}{V \cdot l}}$$

$A$  = area del collo

$V$  = volume del risonatore

$l$  = lunghezza del collo

# Caratteristiche della risonanza

1. Assorbimento del suono per una data frequenza e con una precisa campanatura. La larghezza della campana dipende dall'attrito del sistema, ad esempio questa si allarga se si inserisce materiale poroso fonoassorbente nel collo dell'apertura o dentro il risonatore stesso.
2. Il suono che non può essere assorbito dal risonatore viene diffuso. In particolare un risonatore irradia il suono dalla sua apertura in modo semisferico.

# Assorbitori a pannelli perforati

Possiamo vedere questa struttura come un sistema di risonatori accoppiati.

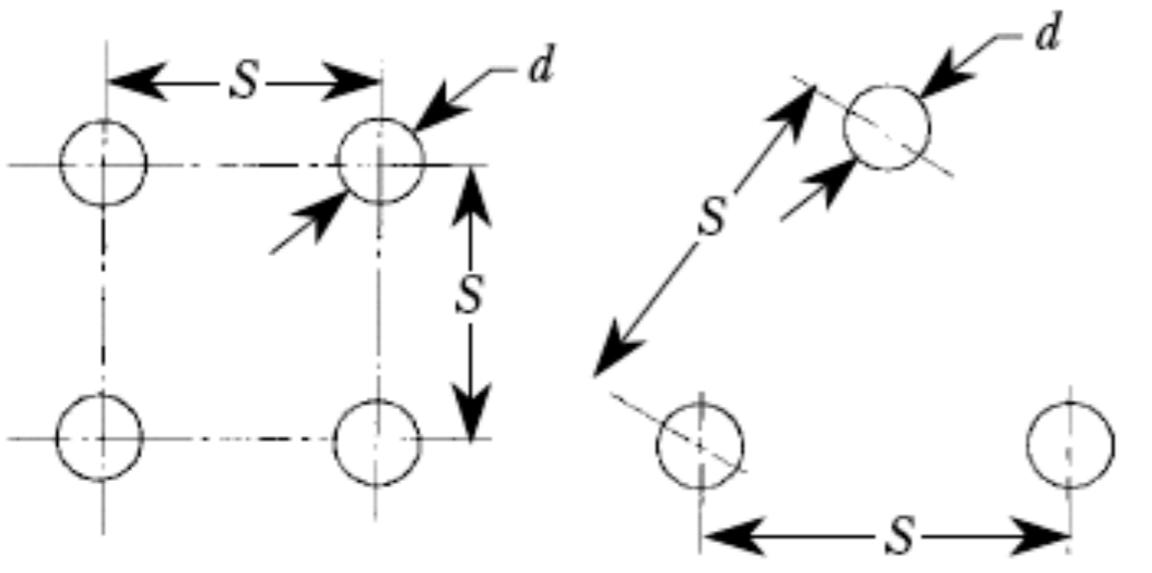
Se il suono giunge perpendicolare al pannello perforato, tutti i piccoli risonatori sono in fase. Per le onde sonore che arrivano dal lato, l'assorbimento è meno efficiente. Questa perdita può essere minimizzata sezionando la cavità dietro alla faccia perforata.

$$f_{Hp} = 508 \sqrt{\frac{P\%}{t \cdot l}}$$

$P\%$  = percentuale di perforazione: (area dei buchi / area del pannello) x 100

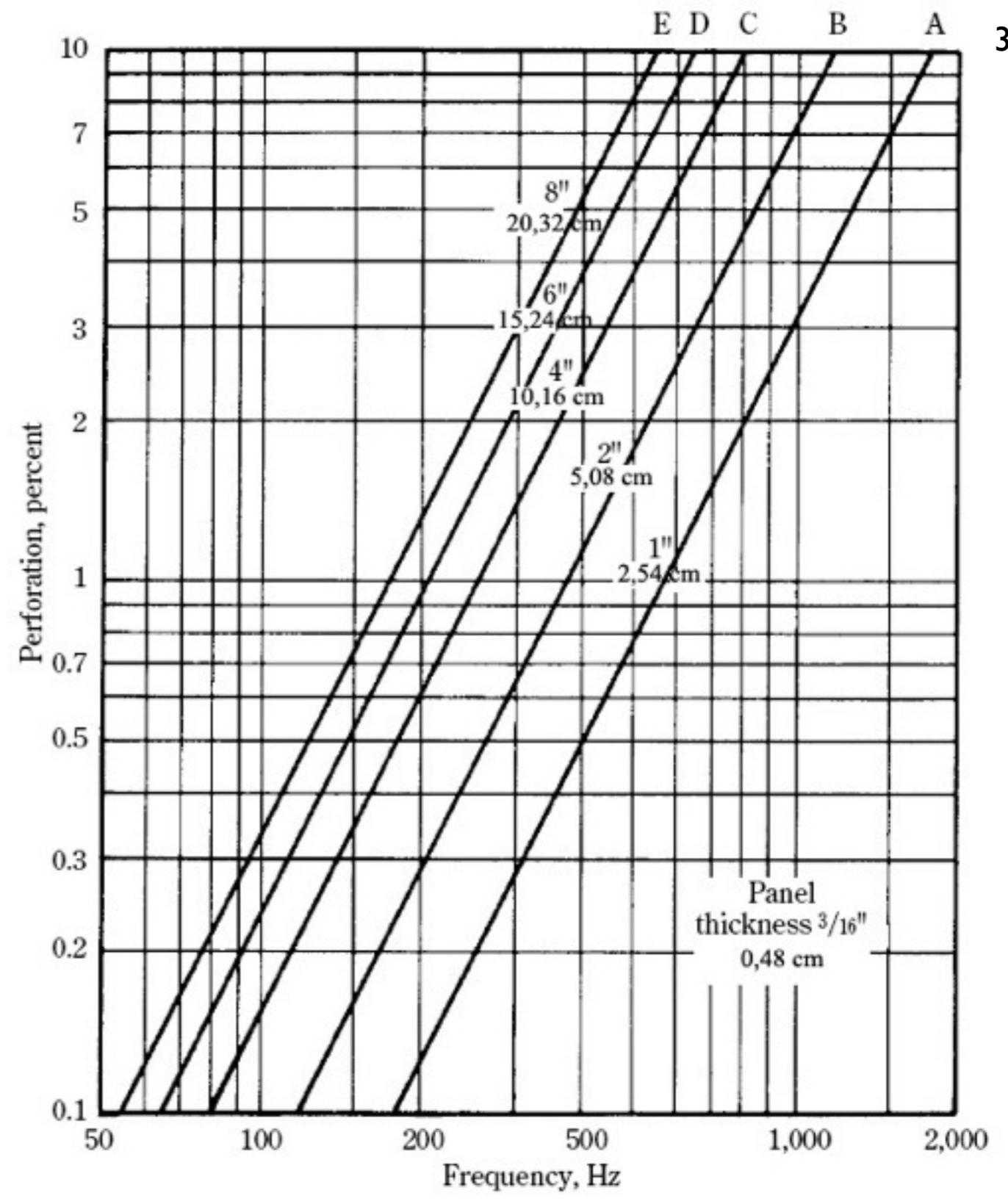
$t$  [cm] = lunghezza effettiva dei buchi, con fattore di correzione applicato (spessore pannello + 0.8 x diametro buco)

$l$  [cm] = profondità della camera d'aria



$PERF \% = 78.5 \left(\frac{d}{S}\right)^2$

$PERF \% = 90.6 \left(\frac{d}{S}\right)^2$



# Assorbitori a Stecche

La massa dell'aria negli slot tra tra le stecche reagisce con l'aria nella cavità per formare un sistema risonante.

Si introduce solitamente fibra di vetro dietro agli slot per fare resistenza e allargare quindi il picco d'assorbimento

Più sono stretti gli slot e più sono profonde le cavità, più è bassa la frequenza di assorbimento massimo.

$$f_{Hs} = 5469 \sqrt{\frac{r}{1.2[dD(r+w)]}}$$

$r$  = slot width [cm]

$d$  = slat thickness [cm]

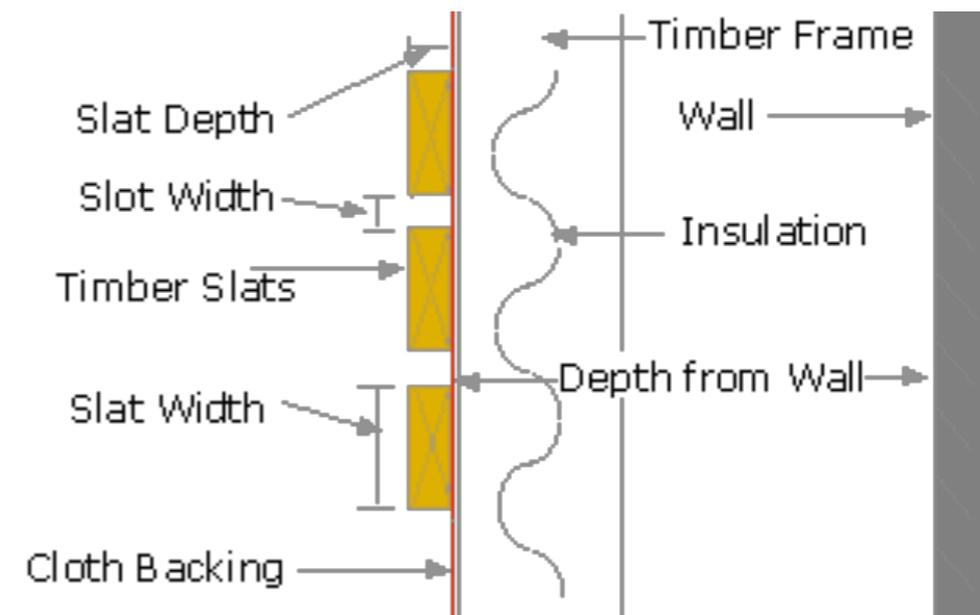
1.2 = mouth correction [cm]

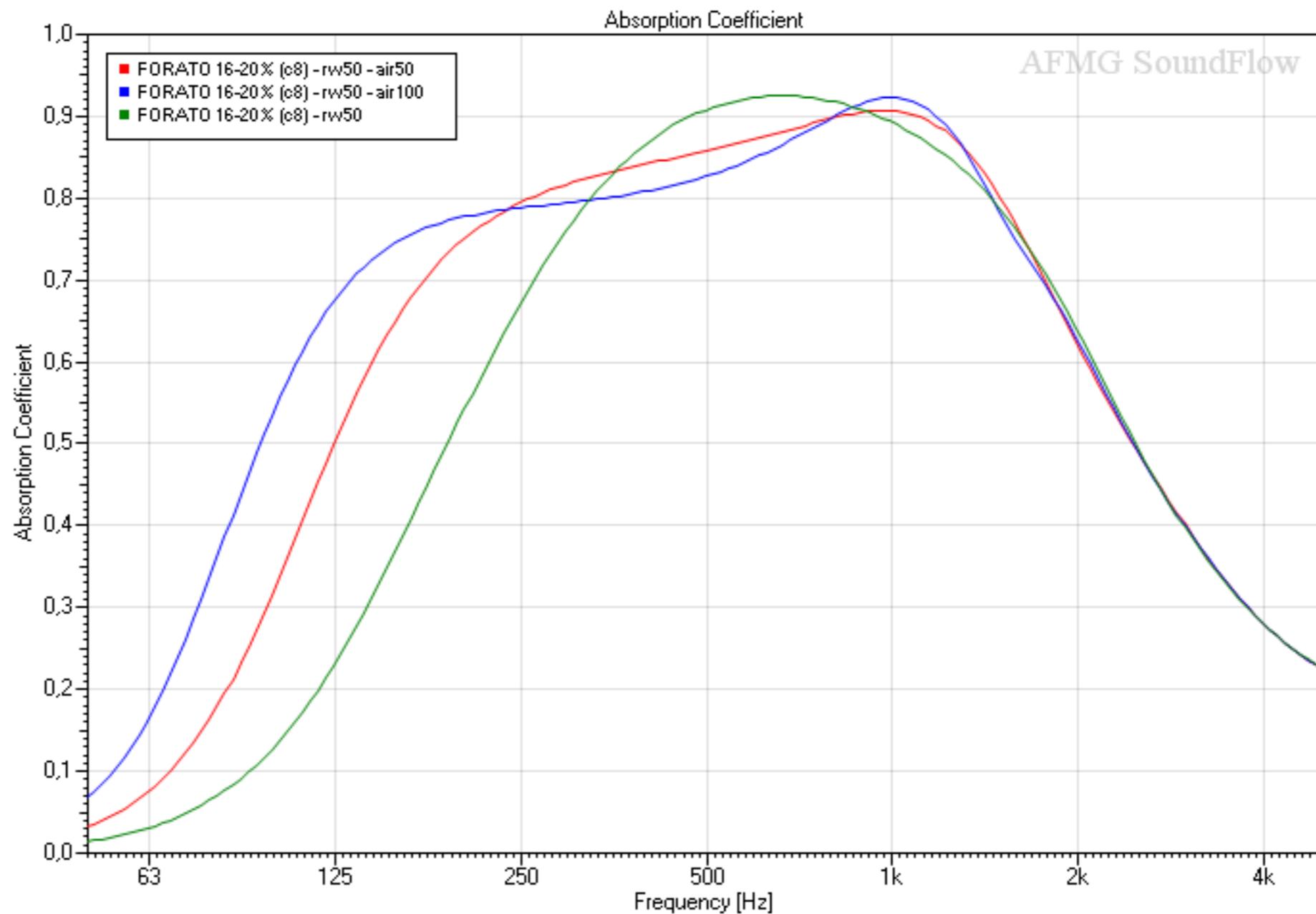
$D$  = cavity depth [cm]

$w$  = slat width [cm]

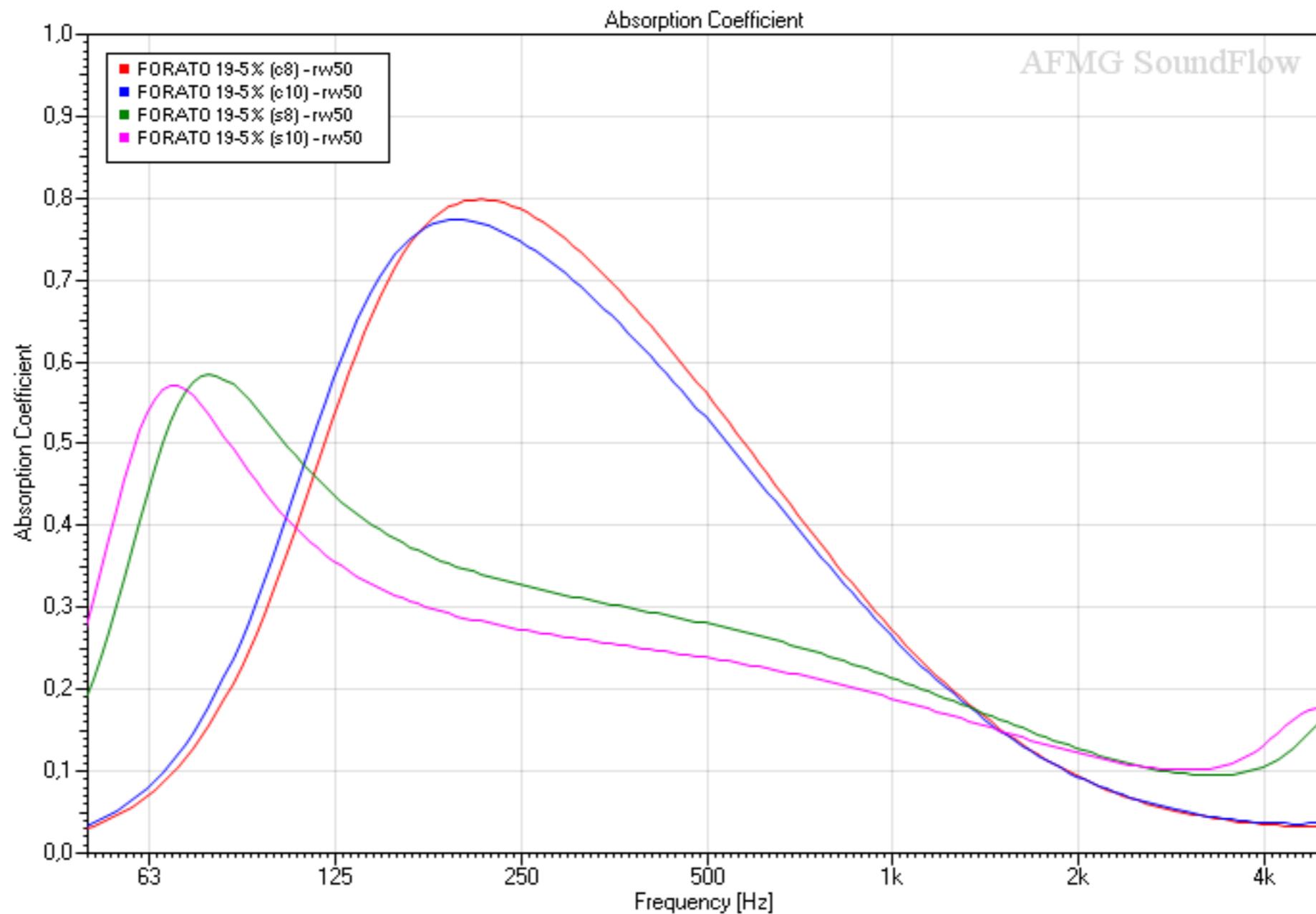
5469 =  $c/(2*\pi)$

$c$  = speed of sound [cm/sec] (circa 34300)

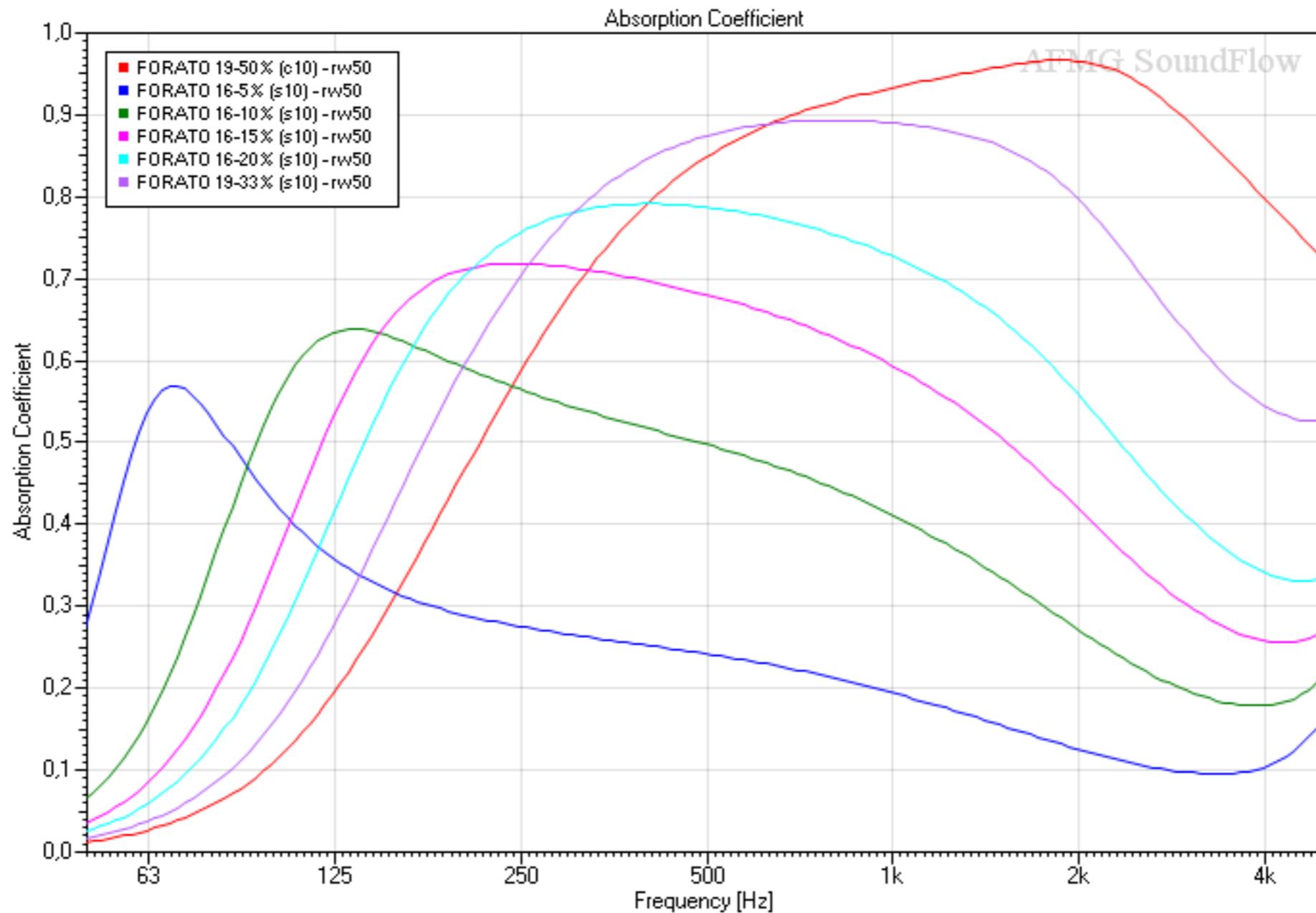




Tre diversi pannelli forati risonanti di stesso spessore (16 mm) e % e tipo di foratura (20% a stecche), montaggio diverso: la sigla rw indica la lana di roccia e il suo spessore e la sigla air indica la camera d'aria e il suo spessore.

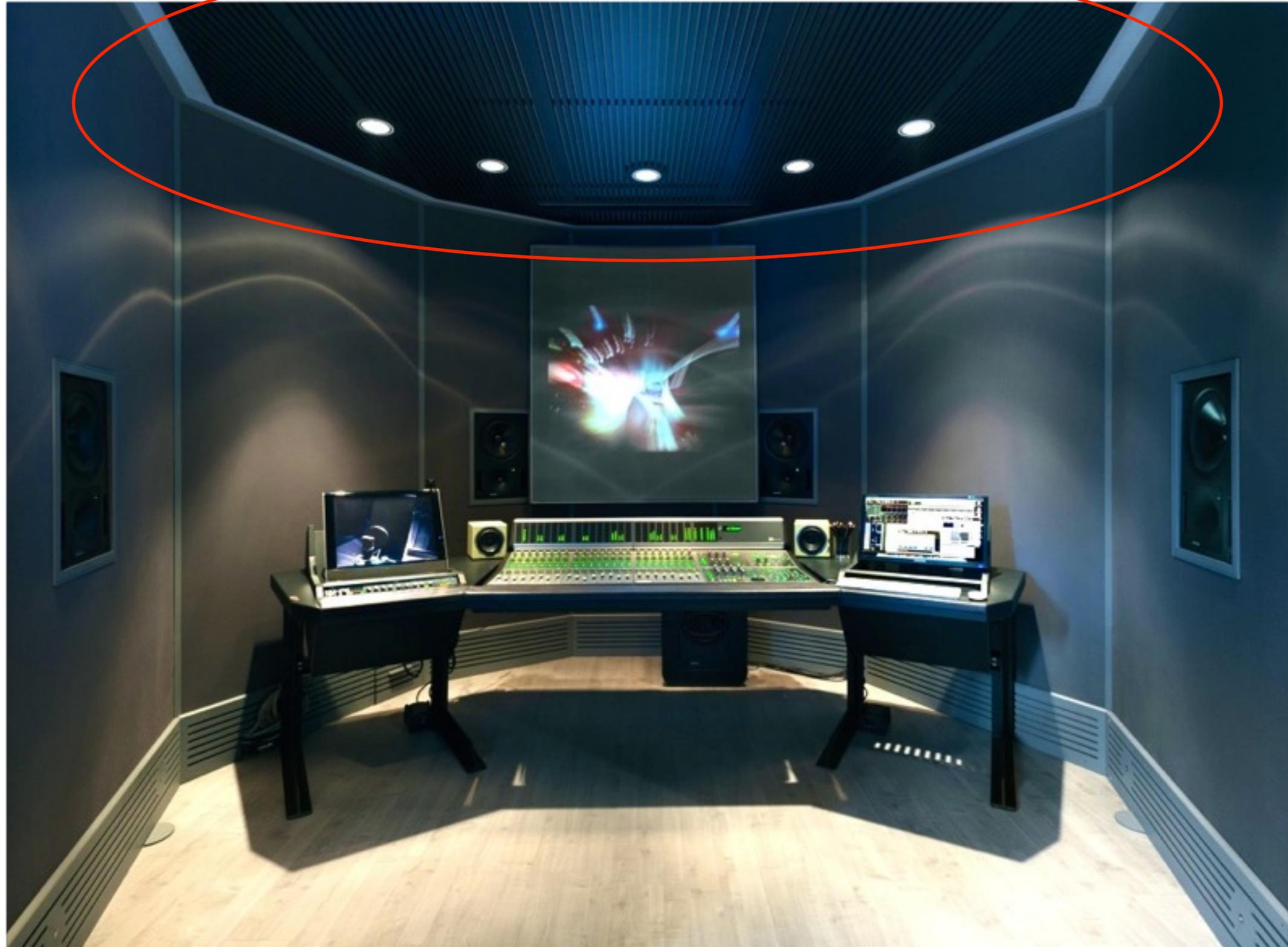


Pannelli forati risonanti (stesso spessore e percentuale foratura, ma di tipo diverso: c = circolare, s = a stecche): nella legenda il primo numero indica lo spessore in mm del pannello, poi c'è la percentuale di foratura (5%), la sigla rw indica la lana di roccia e il suo spessore (50 mm).

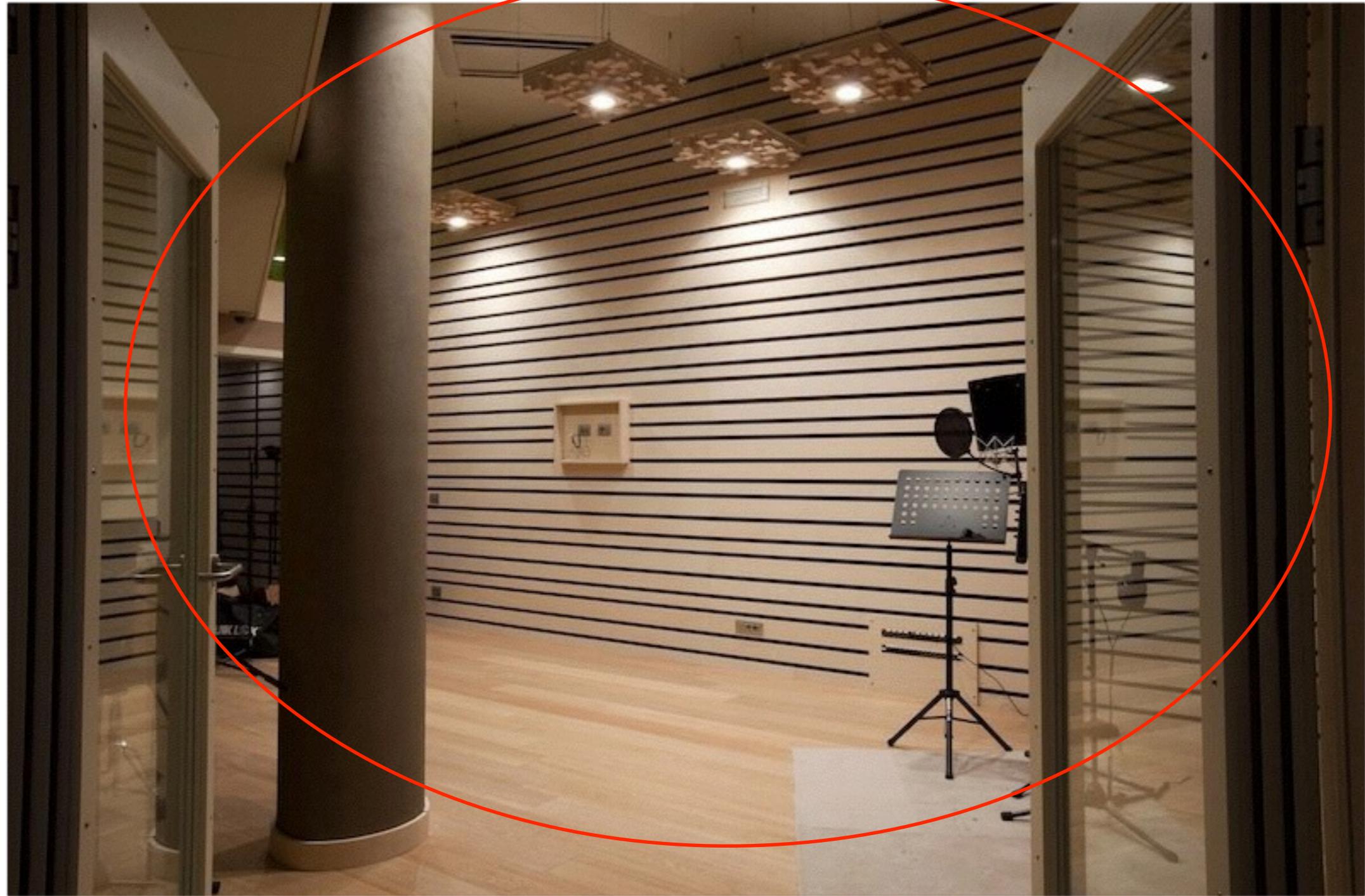


Pannelli forati risonanti [stesso montaggio e materiale fonoassorbente (lana di roccia 50 mm), cambia la percentuale di foratura, il tipo (c = circolare, s = a stecche) e lo spessore del pannello]: nella legenda il primo numero indica lo spessore in mm del pannello, poi c'è la percentuale di foratura e il tipo di foratura.

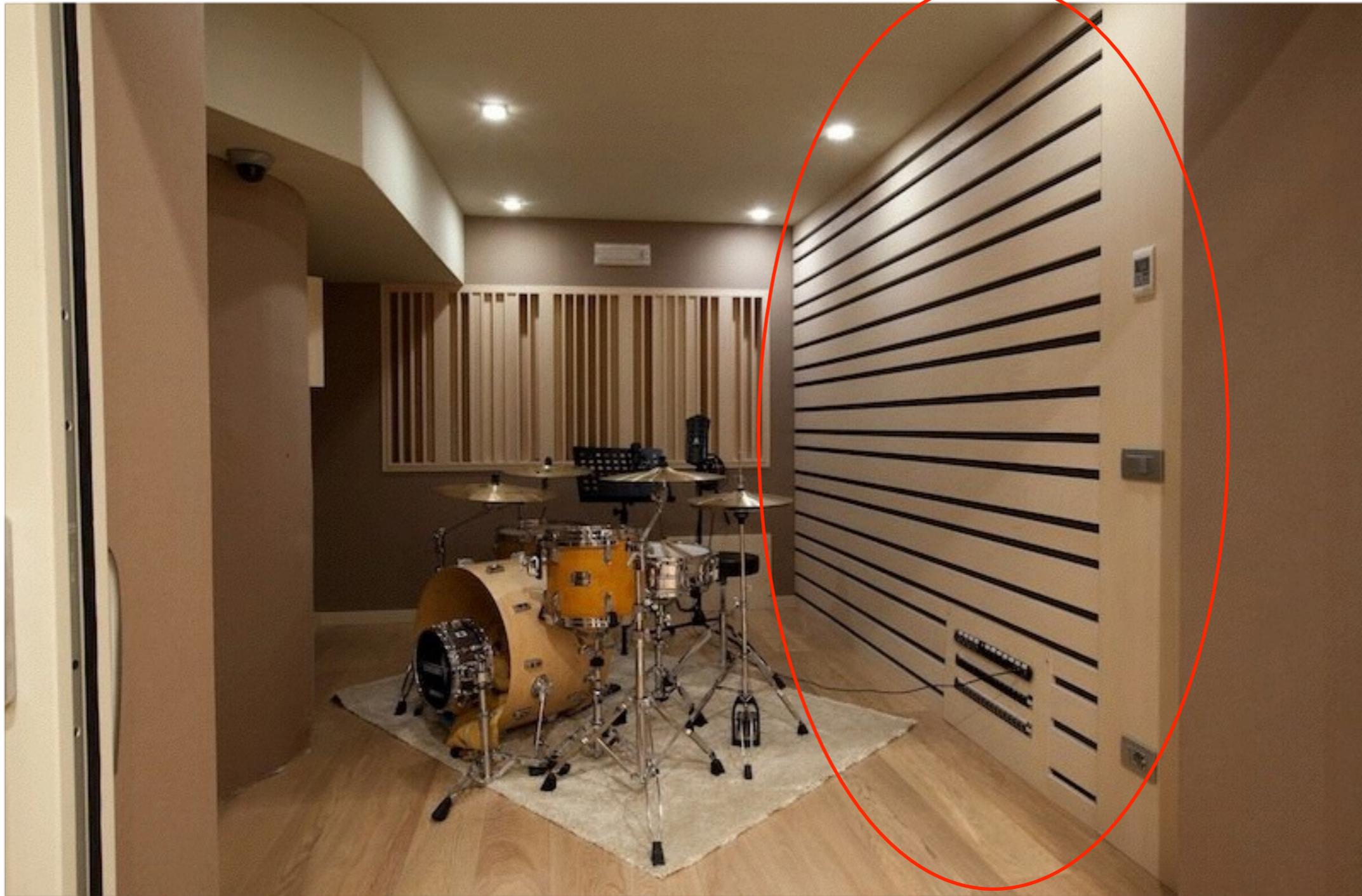
# Esempi di assorbitori forati e a stecche:



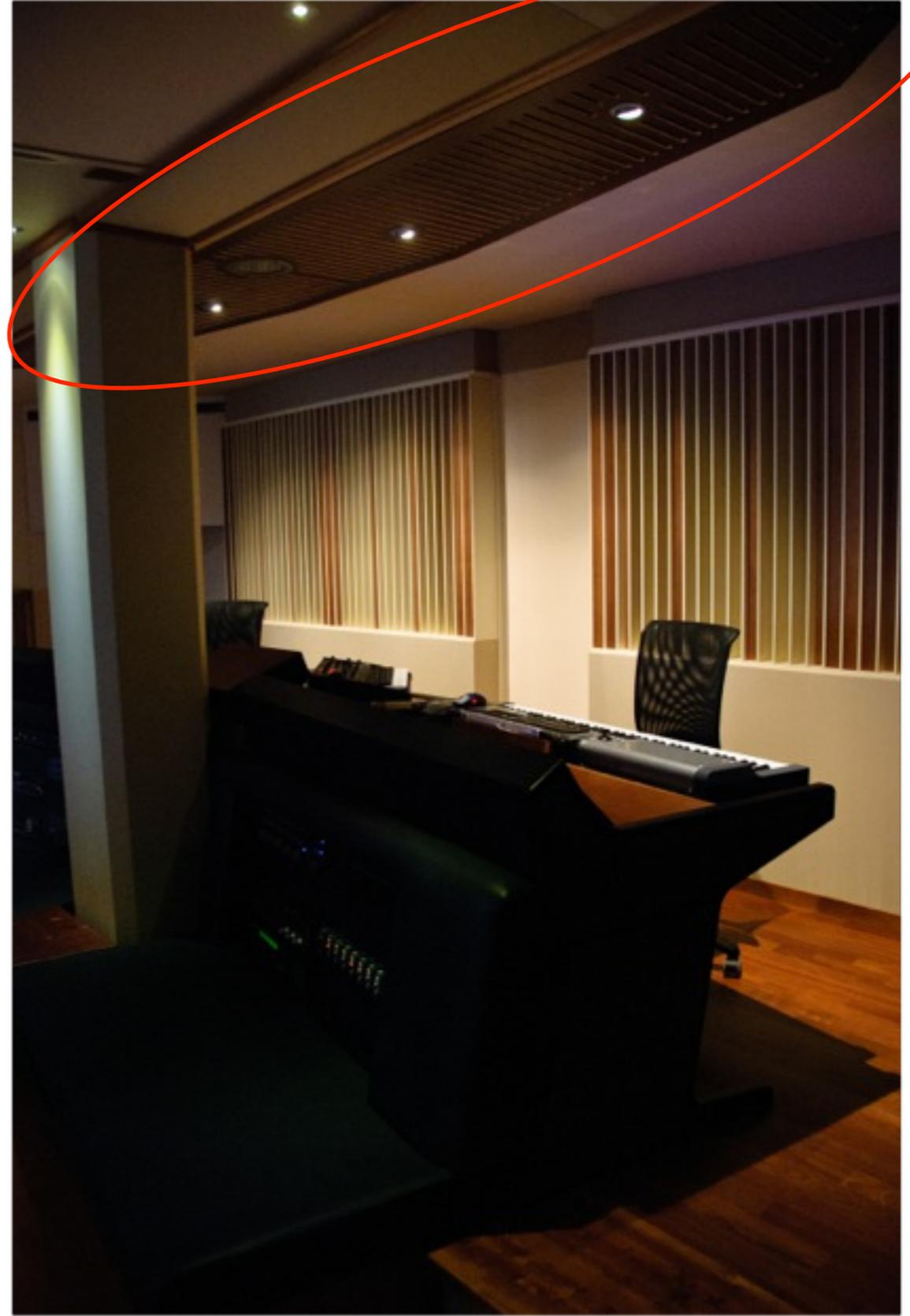
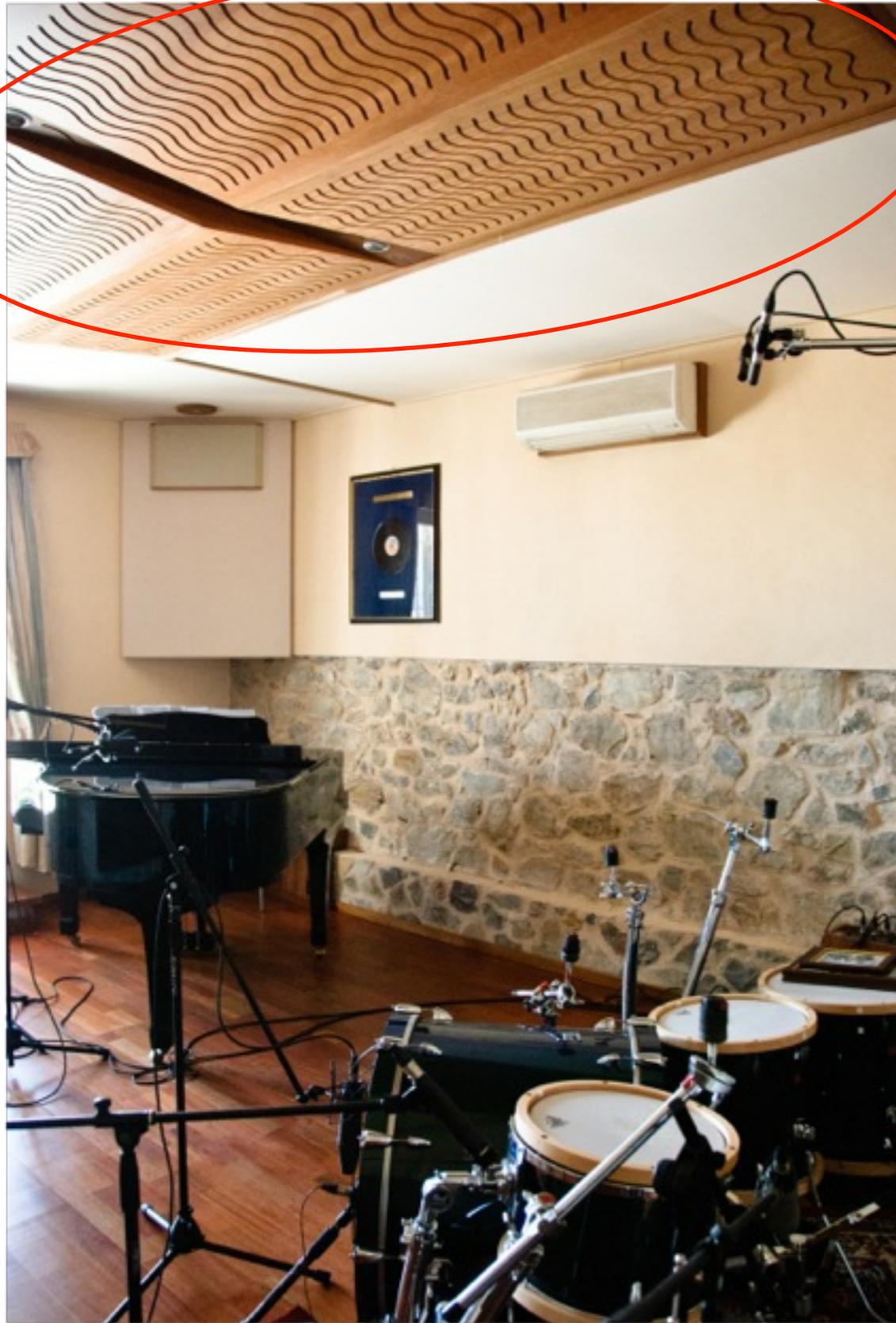
# Esempi di assorbitori a stecche:



# Esempi di assorbitori a stecche:



# Esempi di assorbitori forati e a stecche:

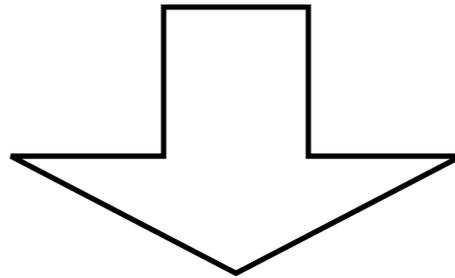


# Esempi di assorbitori forati e a stecche:



# Onde Acustiche

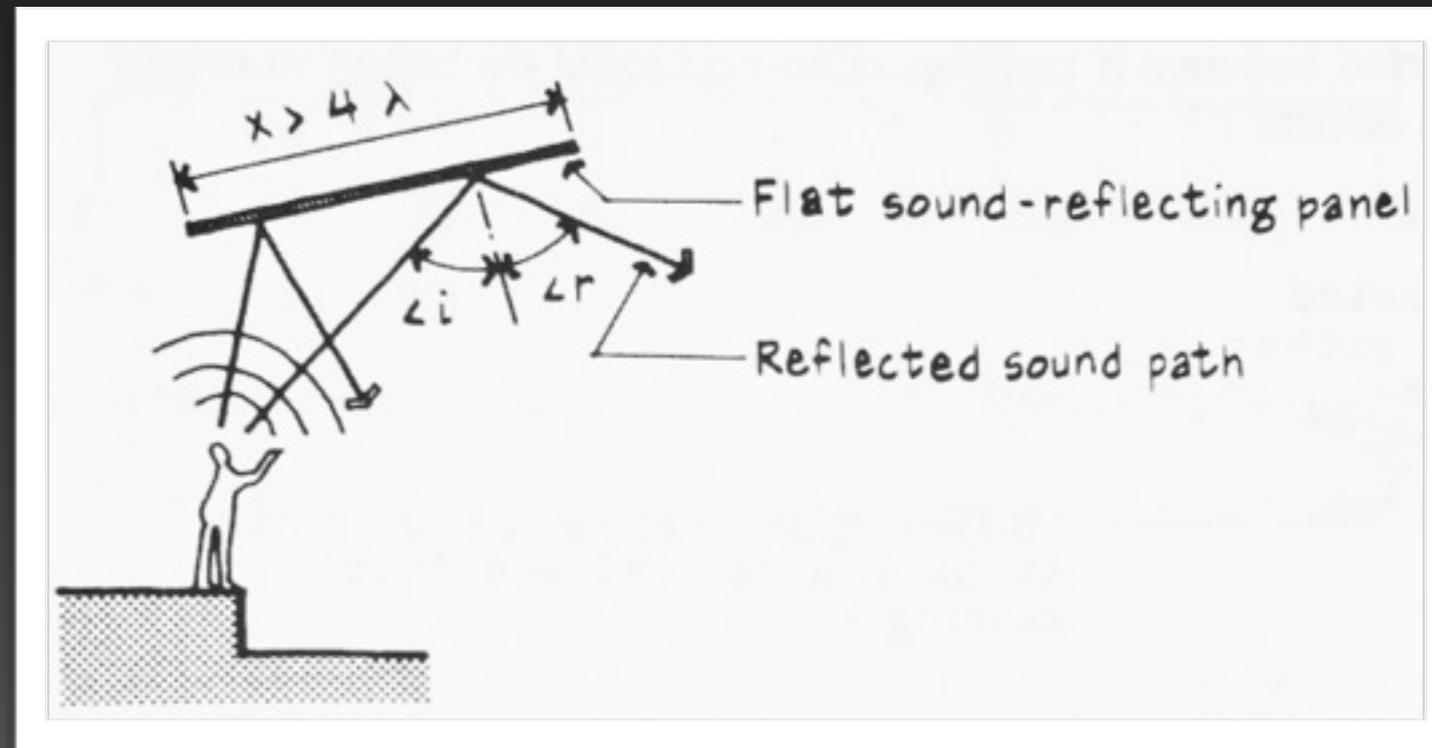
Il suono è un fenomeno di tipo ondulatorio



è soggetto ai tipici comportamenti ondulatori:

Riflessione  
Rifrazione  
Diffrazione  
Interferenza

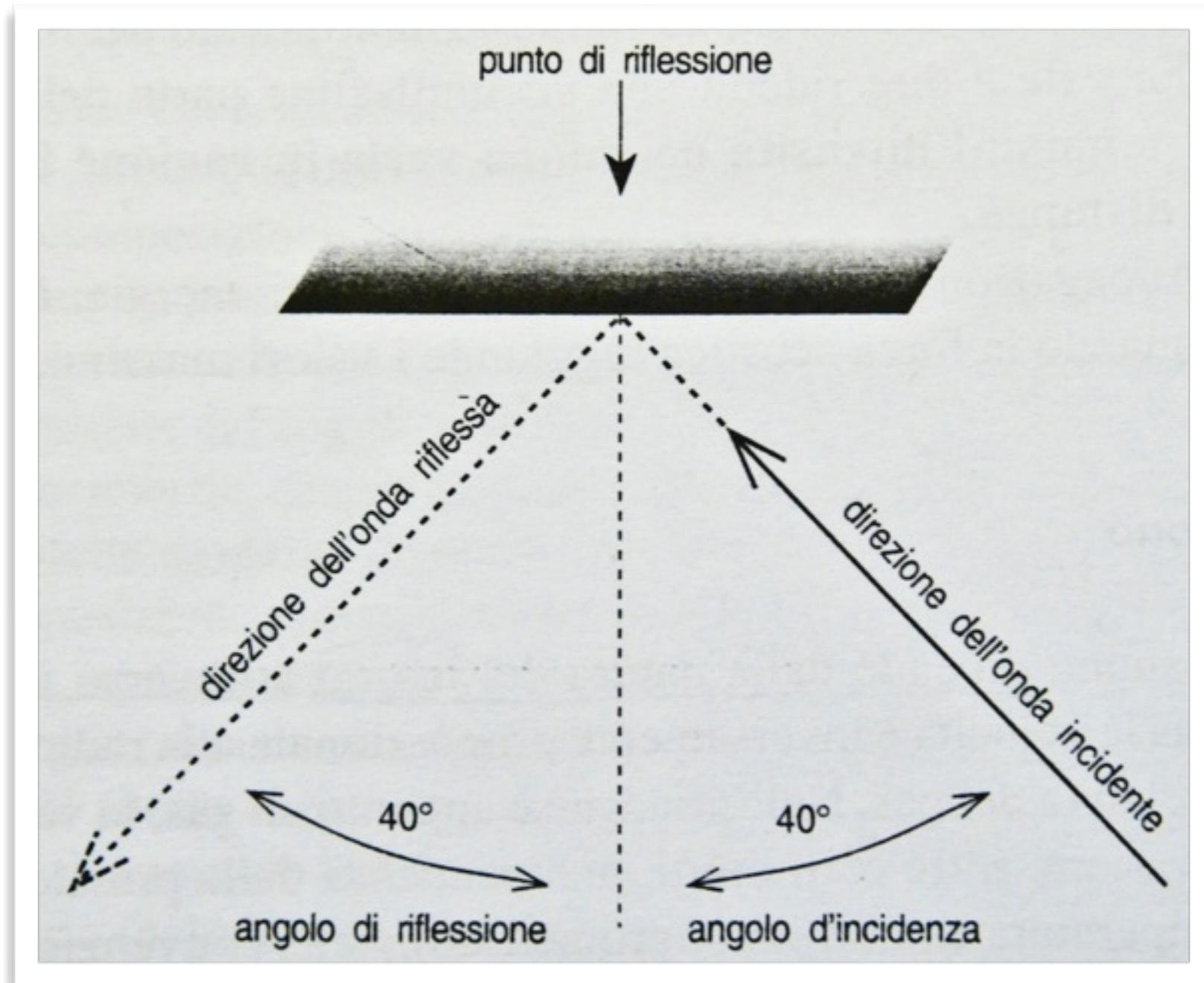
# Riflessione acustica



Se la dimensione della superficie  $x$  è circa 2÷4 volte la lunghezza d'onda incidente  $\lambda$ , allora l'angolo di incidenza  $i$  è uguale all'angolo di riflessione  $r$ .

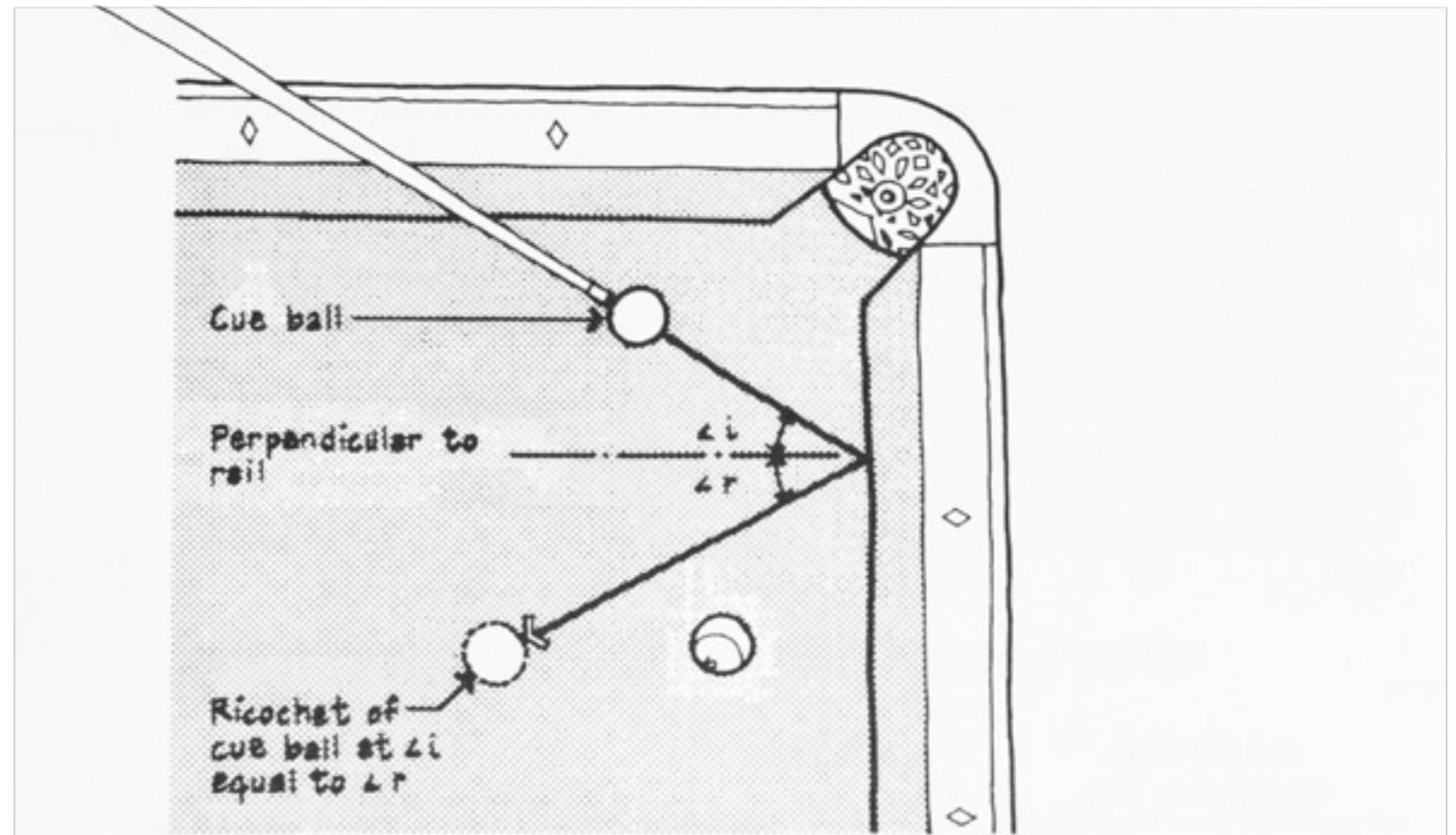
Ad esempio, essendo 0,343 m la lunghezza d'onda di un'onda acustica di 1000 Hz, una superficie di  $4\lambda \times 0,343 \text{ m} = 1,372 \text{ m}$  rifletterà onde con frequenze di 1000 Hz e superiori.

Quando un sistema di onde sonore incontra un corpo incapace di vibrare le onde riflettono con una norma che è comune a tutti i fenomeni del genere e secondo la quale l'angolo d'incidenza è uguale a quello di riflessione:

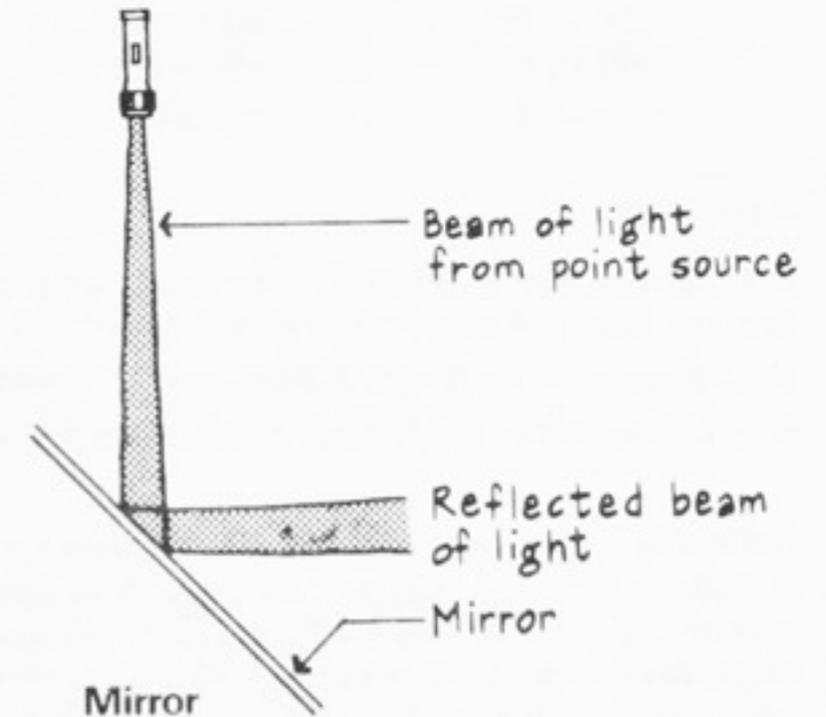


Dalle caratteristiche della superficie riflettente, dipende l'intensità e la qualità della riflessione. In ogni caso, la parte di energia che non viene riflessa è assorbita oppure rifratta.

La riflessione speculare è quella che calcoliamo giocando a biliardo oppure guardando ad uno specchio.



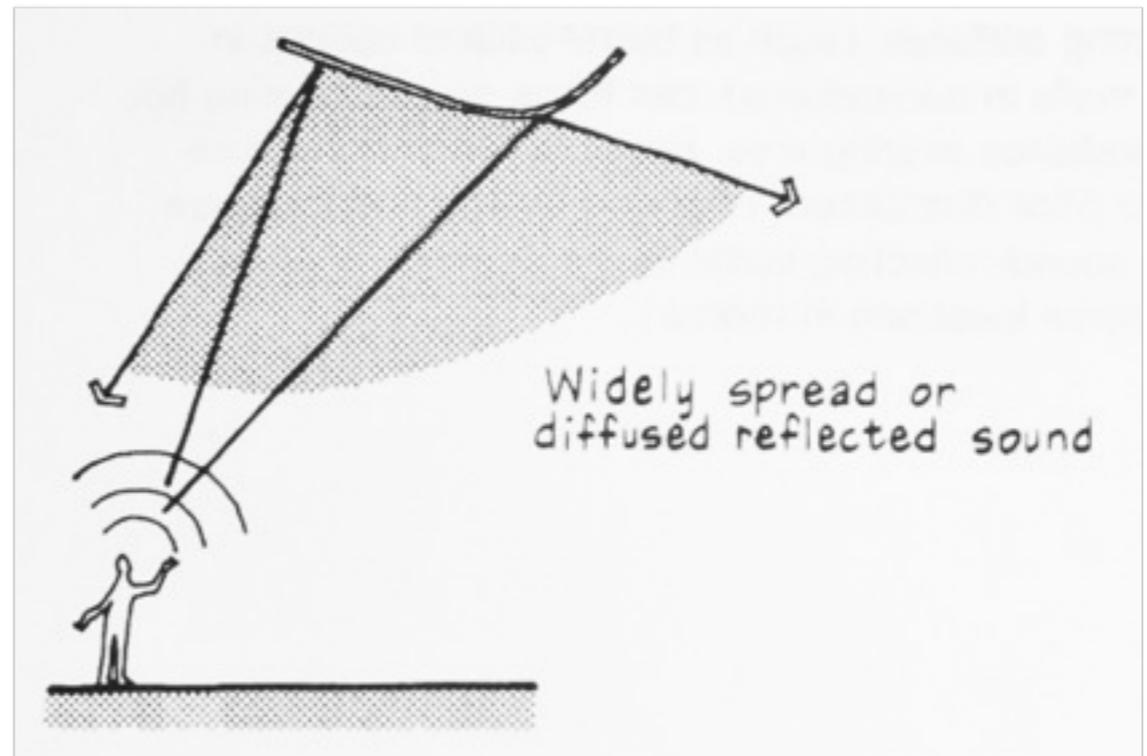
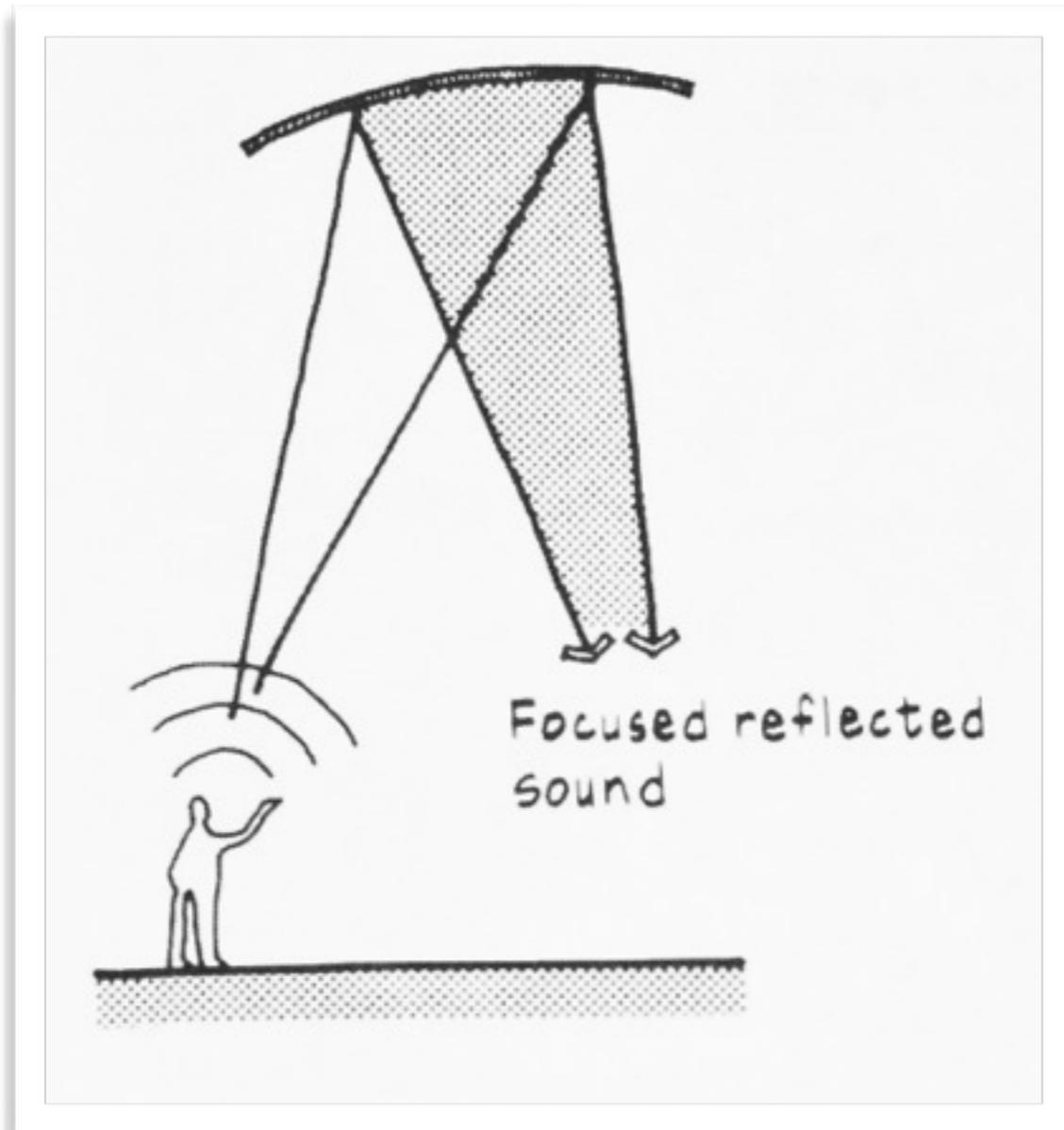
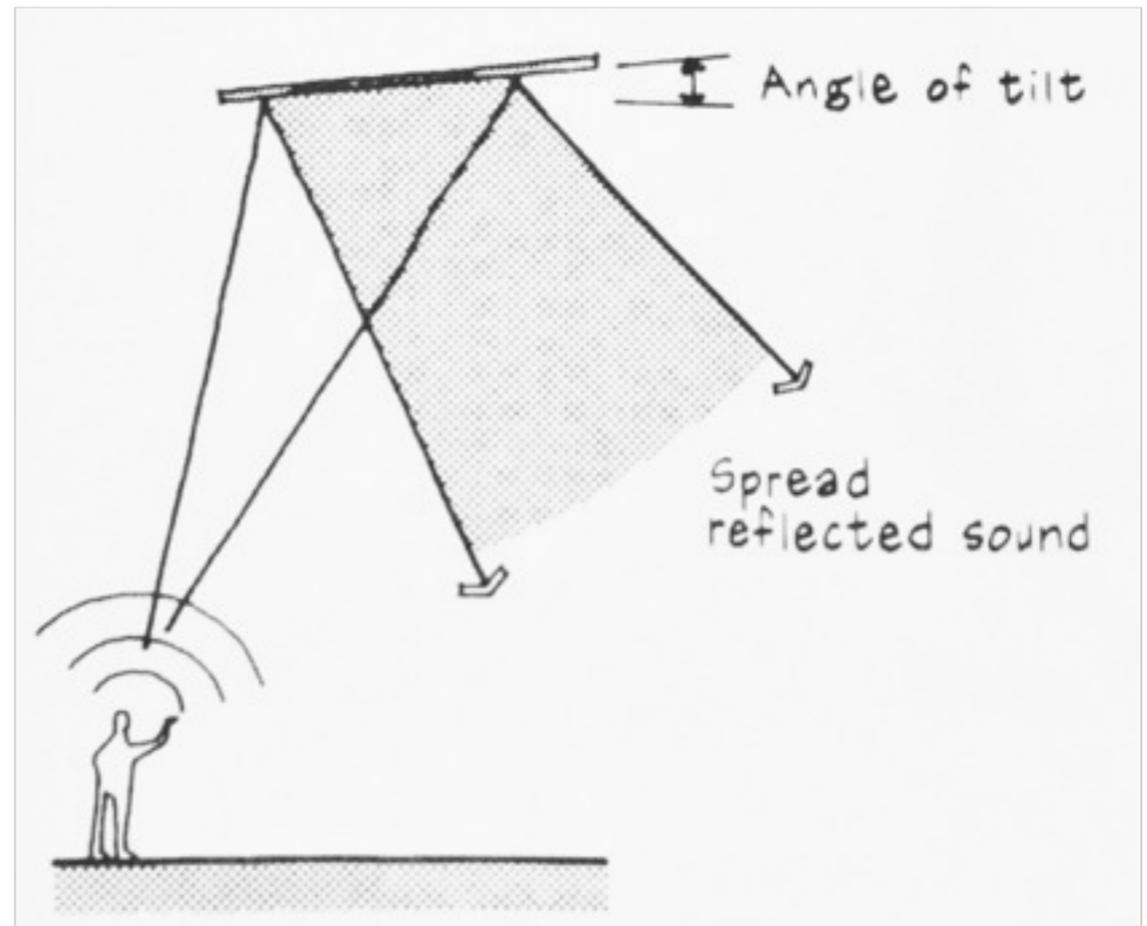
Billiard Table



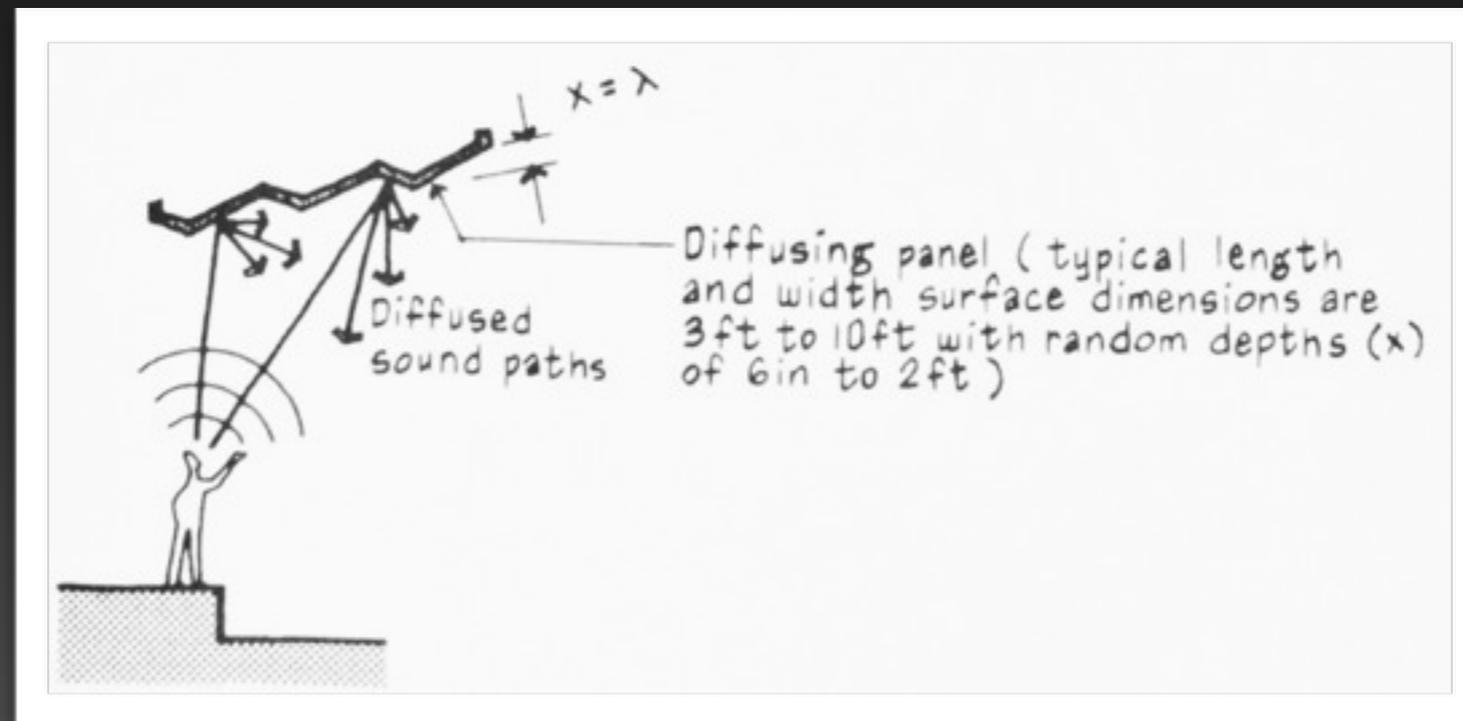
La riflessione speculare è molto utile per indirizzare le riflessioni dove vogliamo noi.

Sicuramente è più efficiente della riflessione focalizzata da una superficie concava.

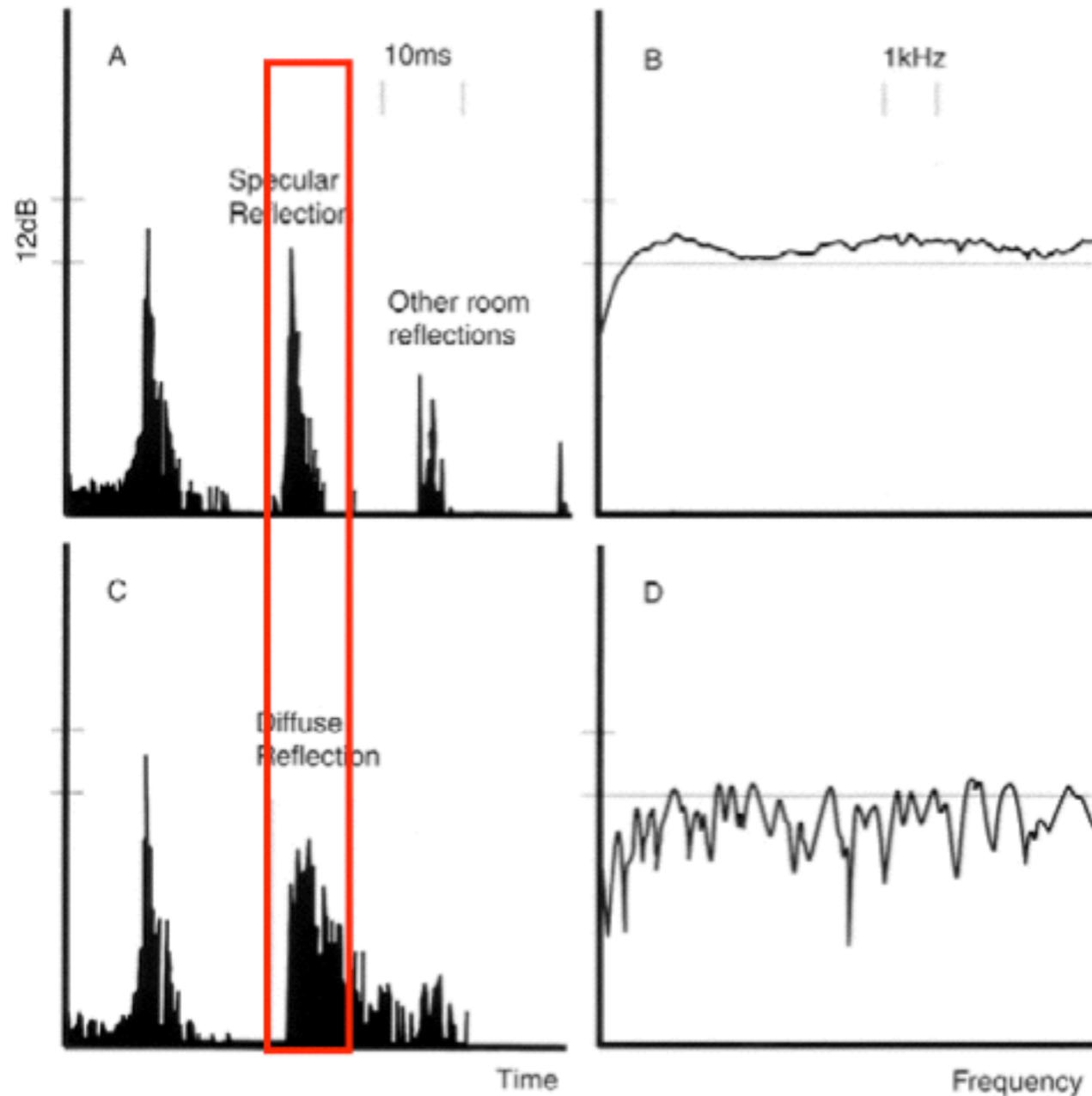
Le superfici convesse possono invece allargare l'angolo di diffusione.



# Diffusione acustica



La diffusione acustica è la redistribuzione random (o “scattering”) di un’onda sonora da una superficie. Avviene quando la superficie solida ha delle profondità di spessore comparabile alle lunghezze d’onda dell’onda incidente. In questo caso non si ha riflessione speculare ma il suono viene sparpagliato in tutte le direzioni.



Interazione tra suono diretto e riflesso (“colorazione”): risposta all’impulso e risposta in frequenza del suono riflesso da una superficie piana (sopra) e da un diffusore (sotto).

La diffusione del suono in un ambiente chiuso crea una “coda” naturale nel decadimento sonoro che viene molto apprezzata soprattutto in ambito musicale.

# Diffusione acustica

Superfici convesse (poly), triangolari etc

Diffusione di Schroeder: QRD, Skyline etc

Diffusione a linee curve elaborate con simulazioni di calcolo numerico

Binary Amplitude Diffusers

Qualsiasi tipo di superficie random o pseudo-random con discrepanze.

# Diffusione di Schroeder: QRD Quadratic Residue Diffusers

Dispositivo basato su buche e spessori consequenziali determinati dalla sequenza dei residui quadratici

Lo spessore più alto è determinato dalla lunghezza d'onda più lunga che dev'essere diffusa

La larghezza delle buche è circa mezza lunghezza d'onda della più corta lunghezza d'onda che dev'essere diffusa

$$d = n^2 \pmod{p}$$

$d$  : profondità di ogni buca

$n$  : numero naturale (intero tra 0 e infinito)

$p$  : numero primo

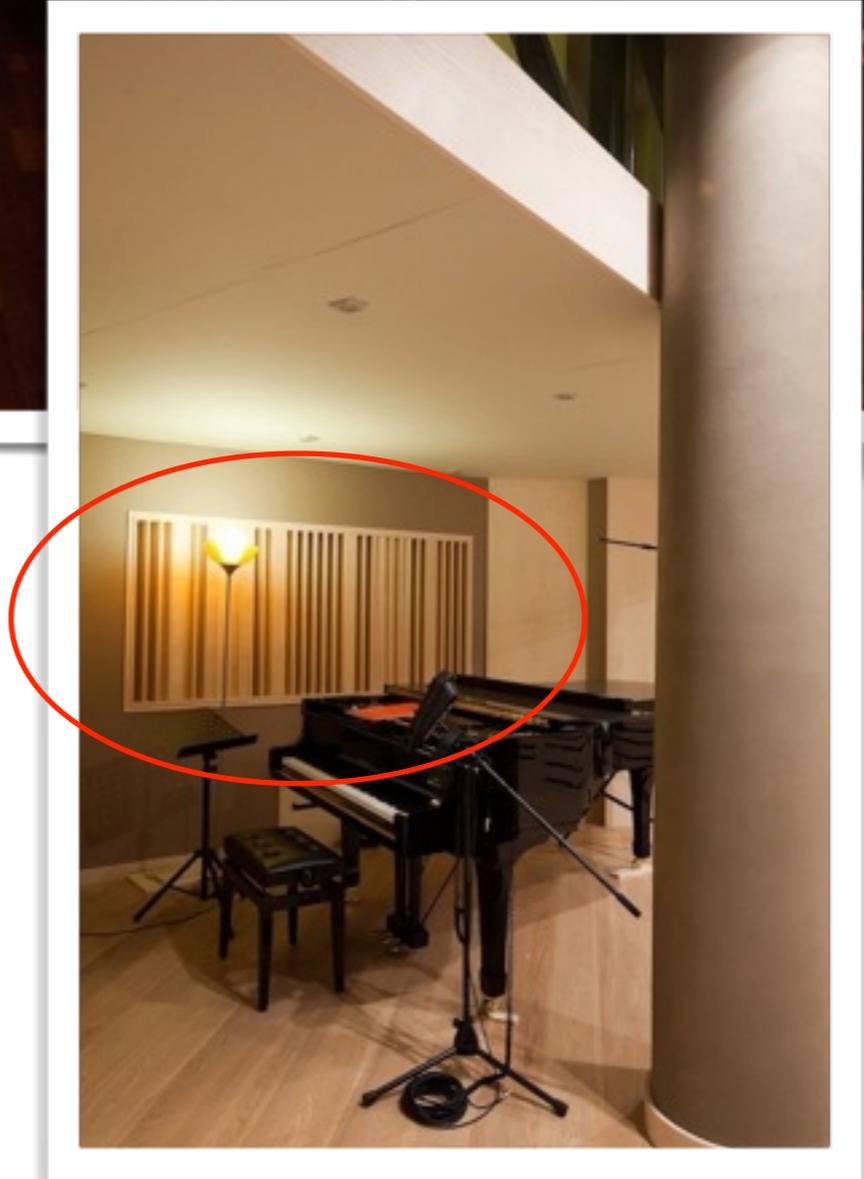
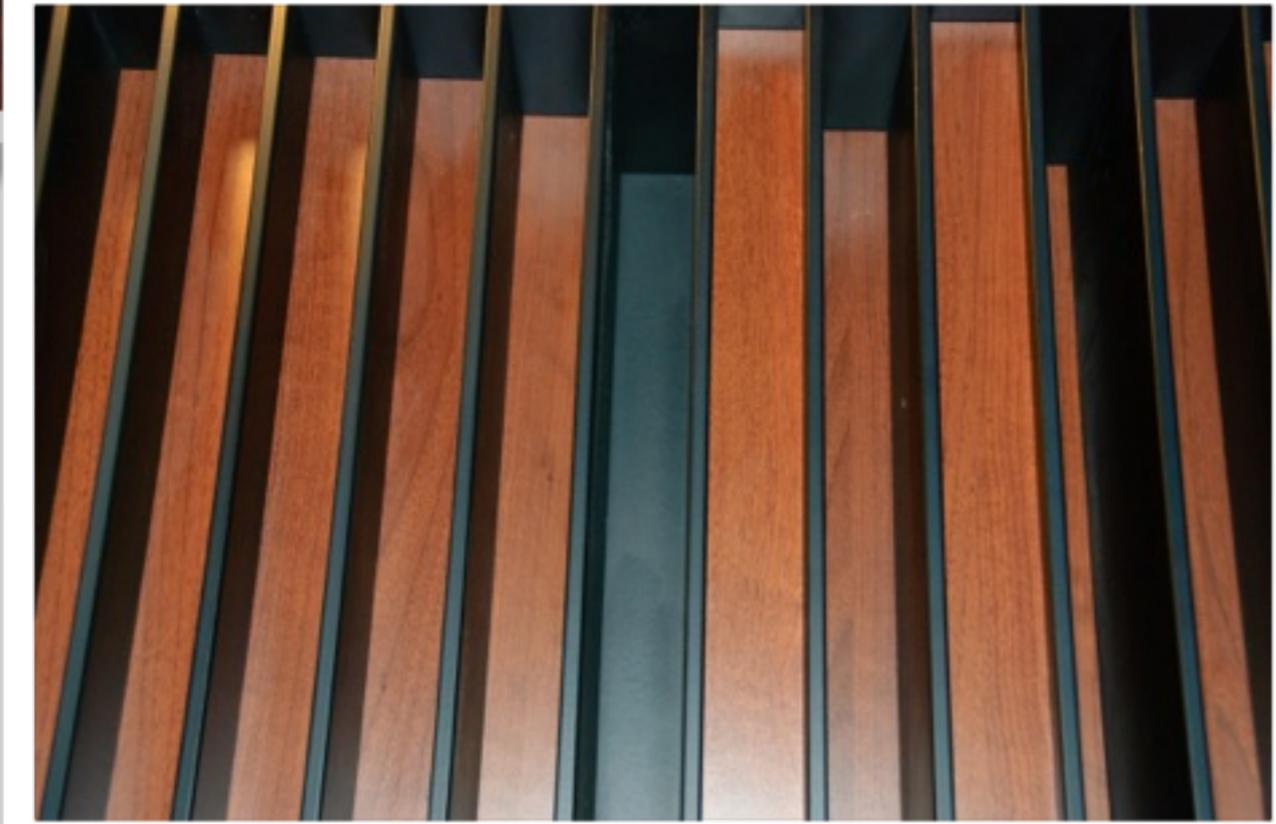
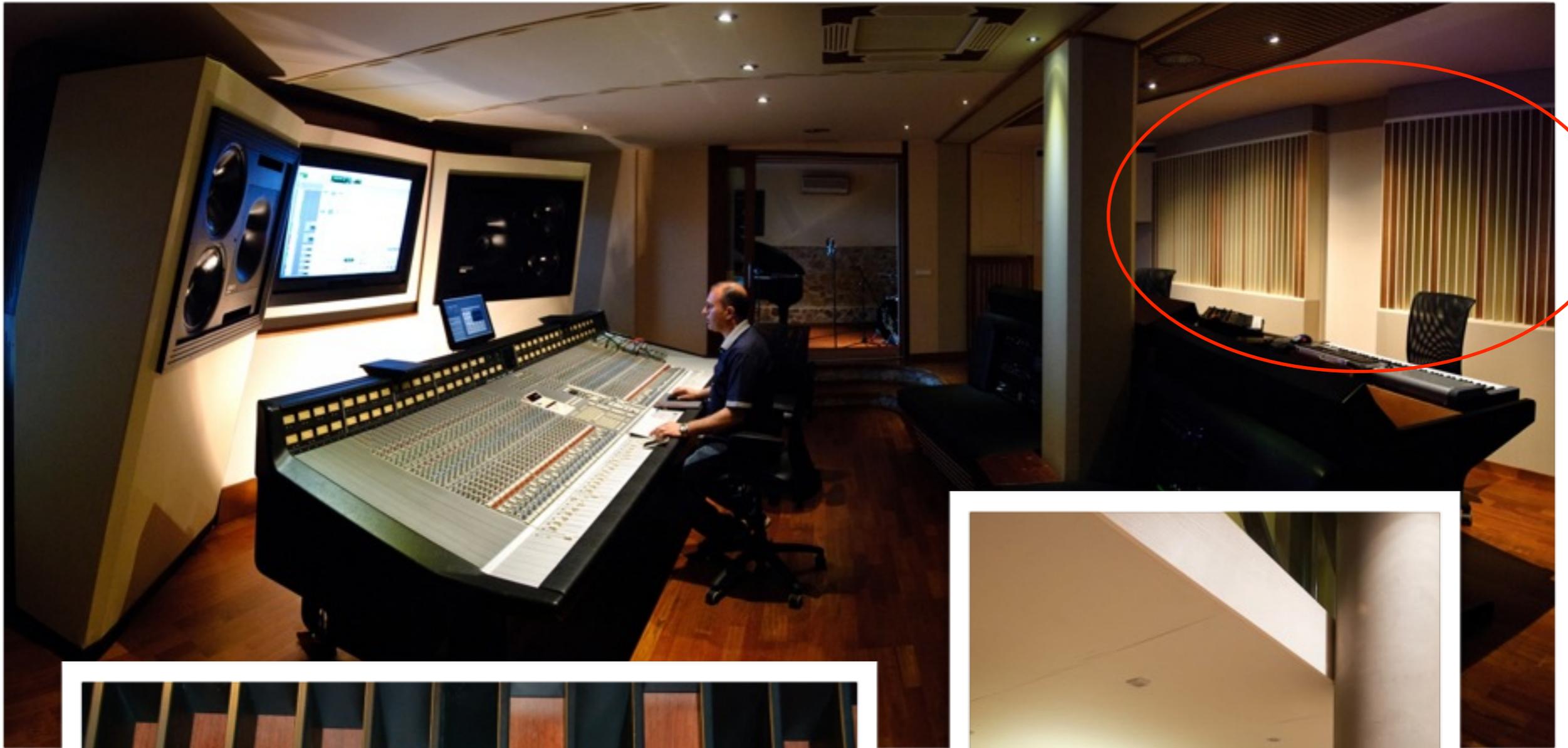
Quadratic-residue sequences

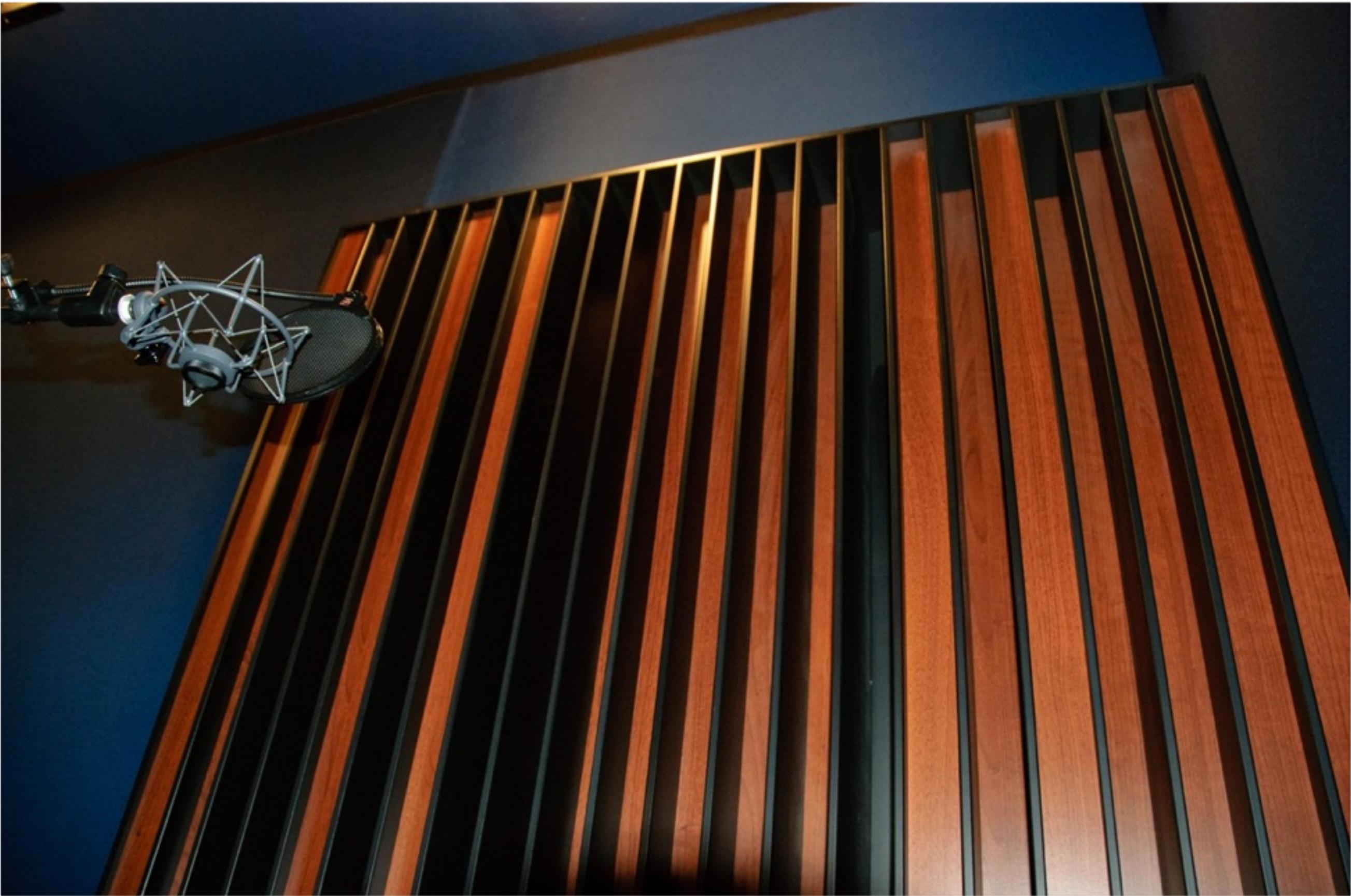
| $n$ | $p$ |   |    |    |    |    |    |
|-----|-----|---|----|----|----|----|----|
|     | 5   | 7 | 11 | 13 | 17 | 19 | 23 |
| 0   | 0   | 0 | 0  | 0  | 0  | 0  | 0  |
| 1   | 1   | 1 | 1  | 1  | 1  | 1  | 1  |
| 2   | 4   | 4 | 4  | 4  | 4  | 4  | 4  |
| 3   | 4   | 2 | 9  | 9  | 9  | 9  | 9  |
| 4   | 1   | 2 | 5  | 3  | 16 | 16 | 16 |
| 5   | 0   | 4 | 3  | 12 | 8  | 6  | 2  |
| 6   |     | 1 | 3  | 10 | 2  | 17 | 13 |
| 7   |     | 0 | 5  | 10 | 15 | 11 | 3  |
| 8   |     |   | 9  | 12 | 13 | 7  | 18 |
| 9   |     |   | 4  | 3  | 13 | 5  | 12 |
| 10  |     |   | 1  | 9  | 15 | 5  | 8  |
| 11  |     |   | 0  | 4  | 2  | 7  | 6  |
| 12  |     |   |    | 1  | 8  | 11 | 6  |
| 13  |     |   |    | 0  | 16 | 17 | 8  |
| 14  |     |   |    |    | 9  | 6  | 12 |
| 15  |     |   |    |    | 4  | 16 | 18 |
| 16  |     |   |    |    | 1  | 9  | 3  |
| 17  |     |   |    |    | 0  | 4  | 13 |
| 18  |     |   |    |    |    | 1  | 2  |
| 19  |     |   |    |    |    | 0  | 16 |
| 20  |     |   |    |    |    |    | 9  |
| 21  |     |   |    |    |    |    | 4  |
| 22  |     |   |    |    |    |    | 1  |
| 23  |     |   |    |    |    |    | 0  |

Well depth or proportionality =  $n^2$  modulo  $p$

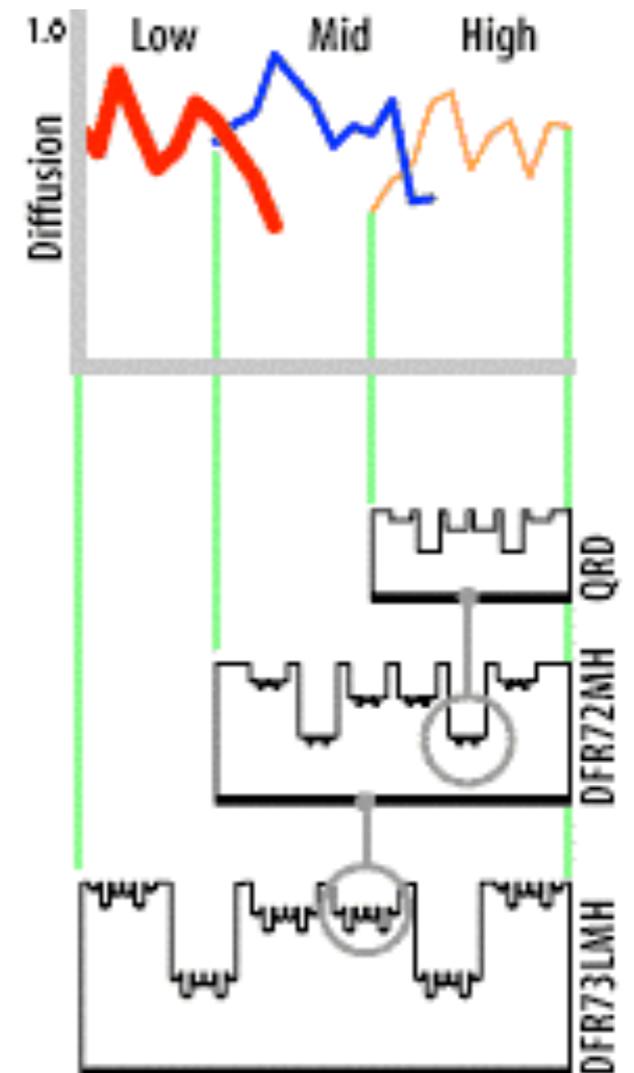
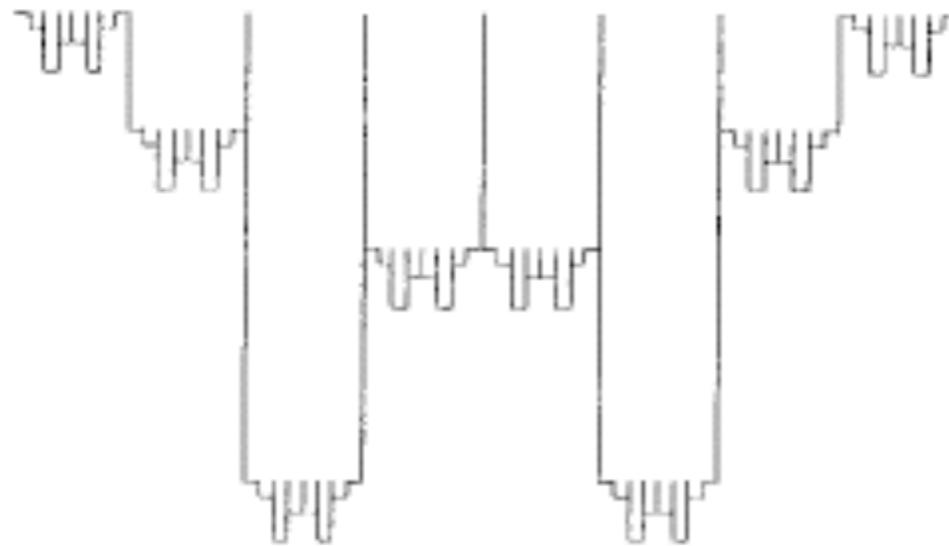
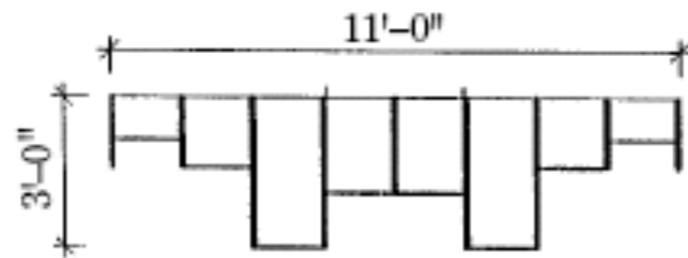
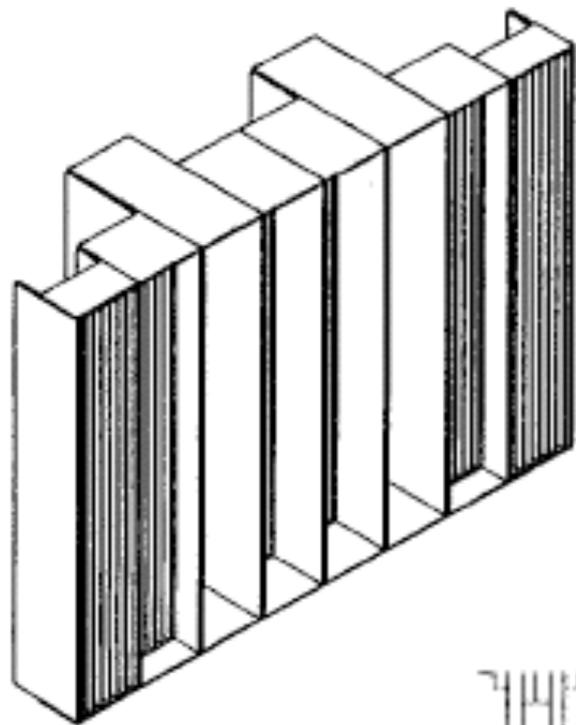
$n$  = integer

$p$  = prime number





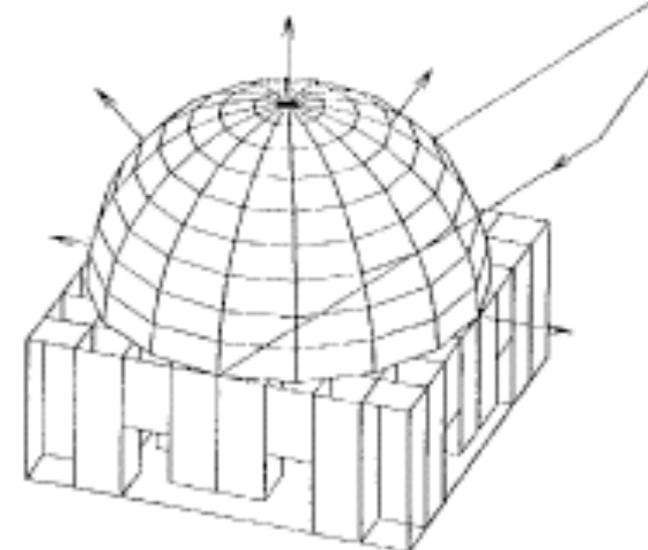
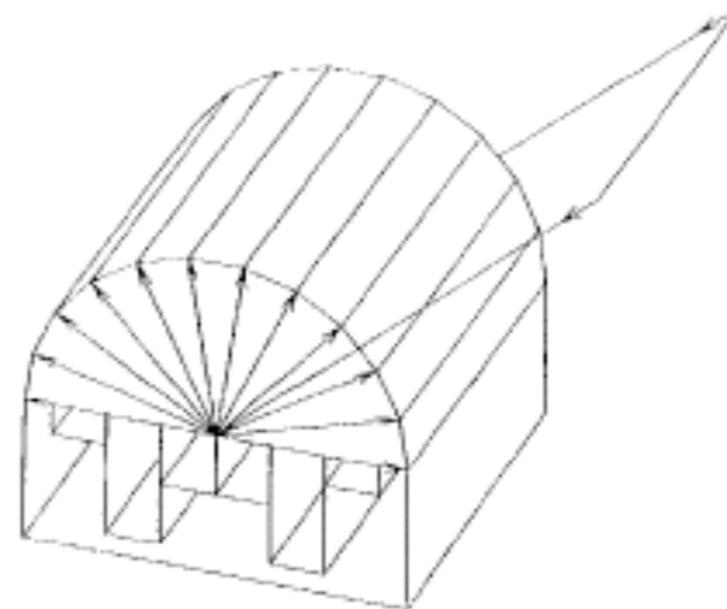
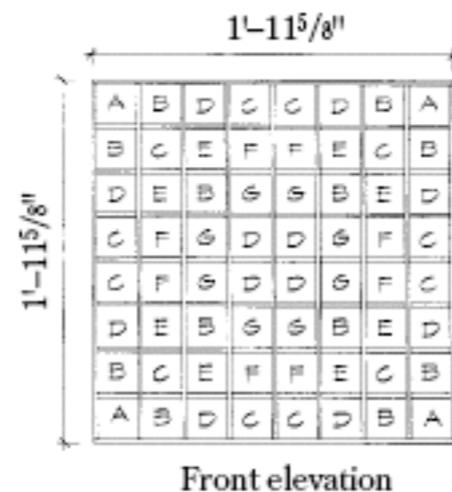
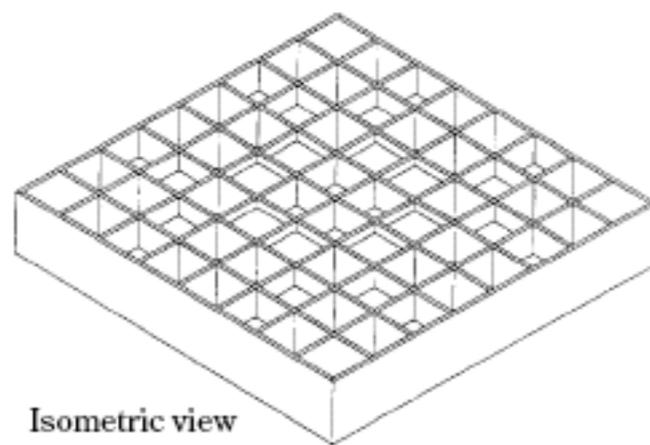
È molto importante capire la frequenza sulla quale agisce il diffusore. Per questo motivo, sulla falsariga della costruzione delle casse a più vie, si costruiscono diffusori a banda larga (Diffractal) che sono tipo dei frattali, ossia in ogni elemento c'è una serie di elementi sempre più piccoli per le frequenze più grandi etc.





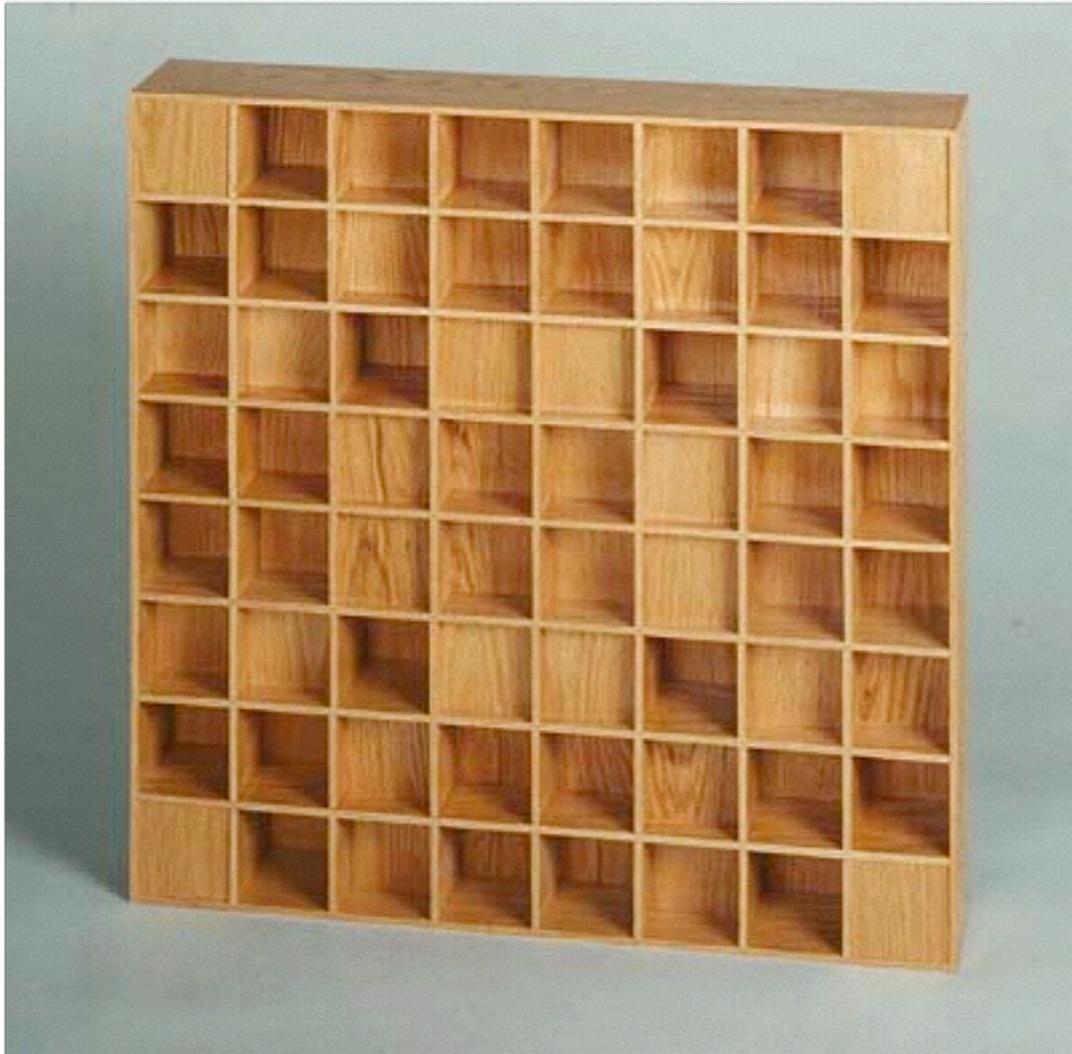
# Diffusori in 2d

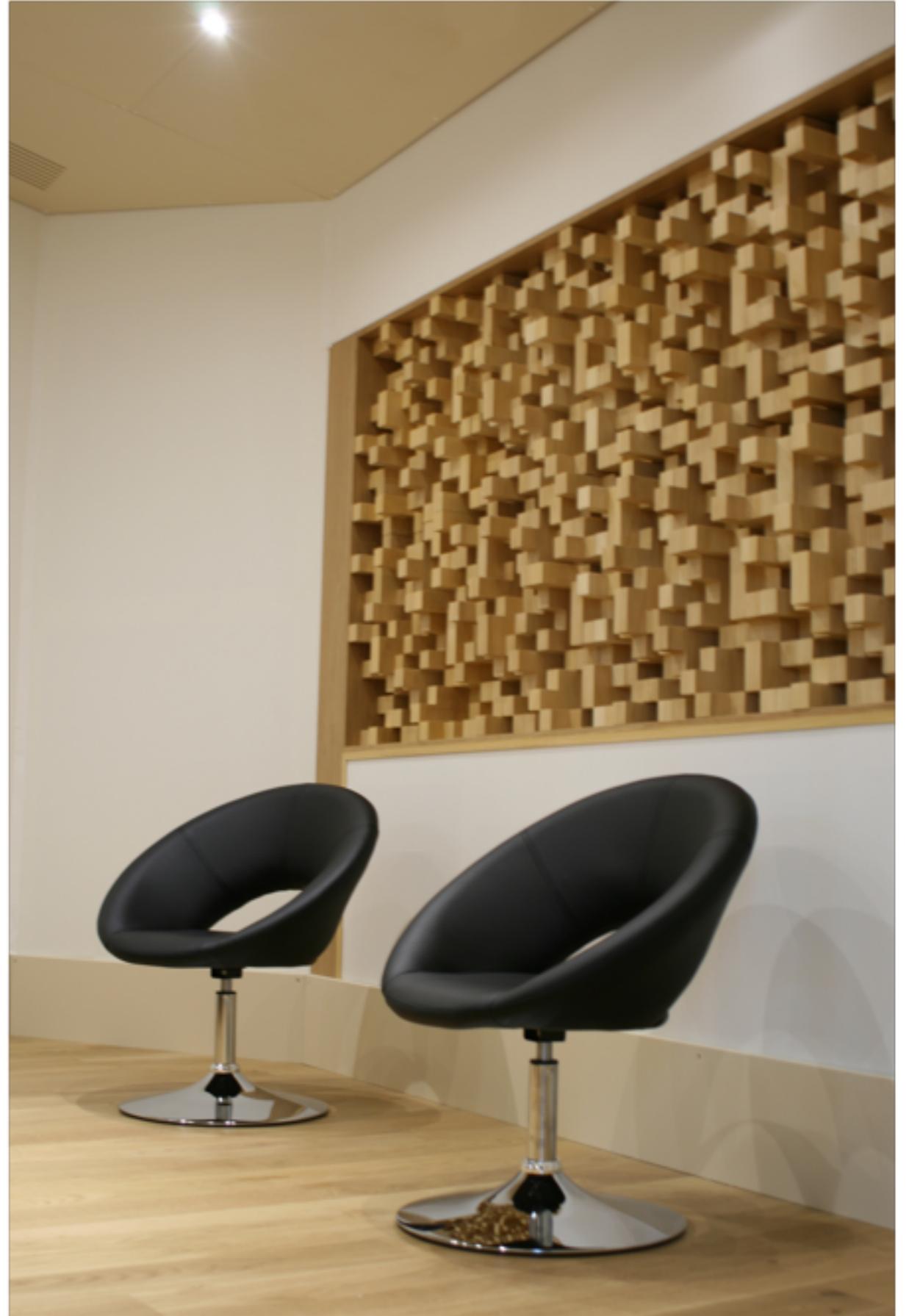
La distribuzione spaziale delle riflessioni provocate da questo tipo di diffusori è a semicerchio ossia in due dimensioni. Per avere una distribuzione sferica bisognerà utilizzare diffusori in tre dimensioni come l'Omniffusor RPG.



Schema dell'omniffusor

differenza tra QRD/  
primitive-root  
e Omniffusor in 2d









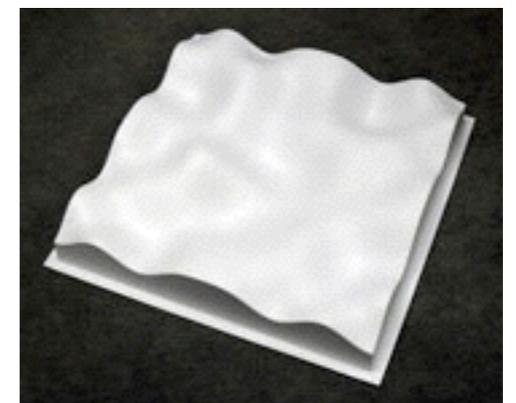
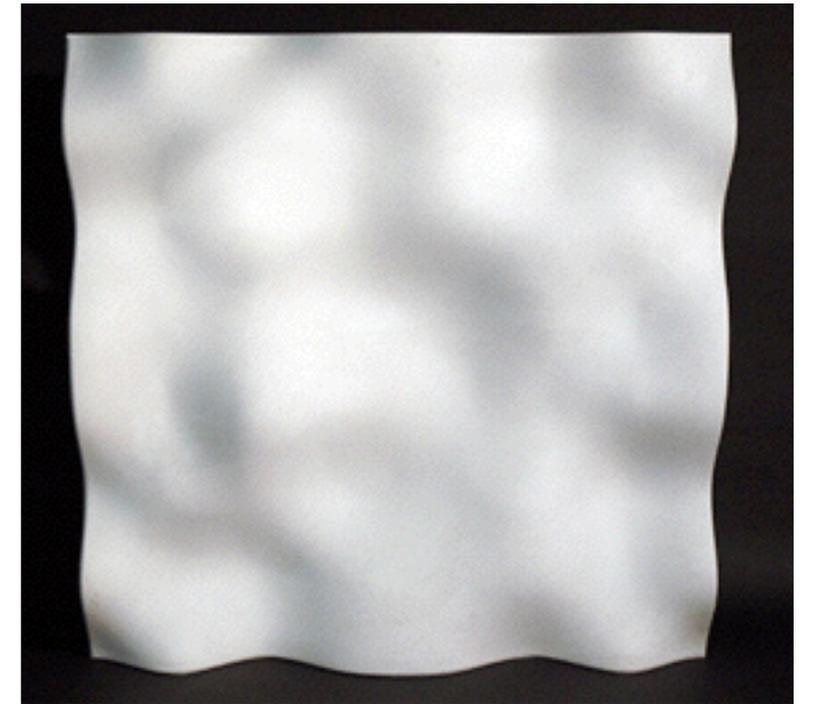
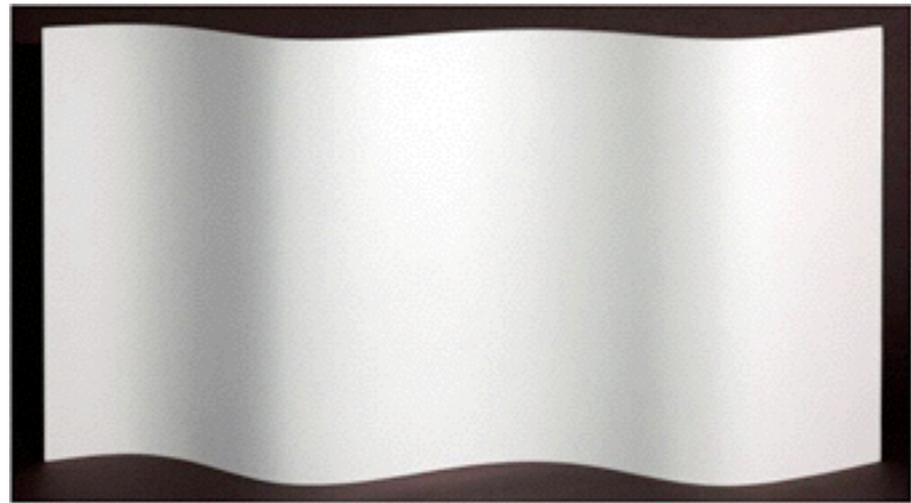
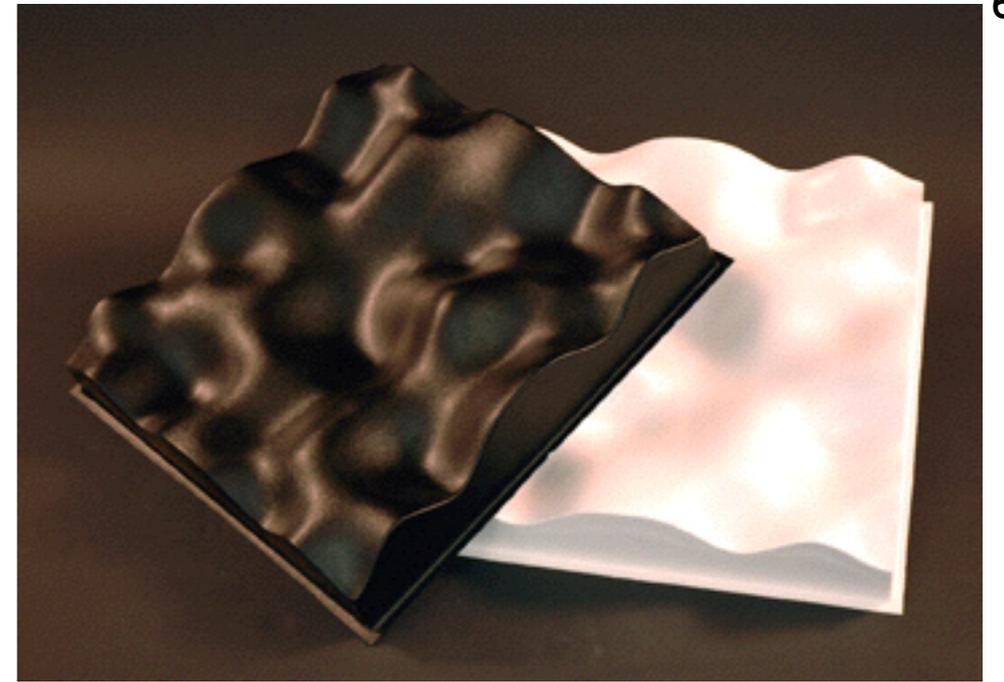
# Diffusori a linee curve

Quando si progetta un diffusore bisogna considerare sia le sue proprietà acustiche che quelle estetiche, e spesso queste sono in conflitto.

Nel design degli ultimi anni sono tornate di moda le linee curve, e si sono trovate nuove soluzioni estetiche per diffondere il suono, sul retro di uno studio o un soffitto di un teatro.

Con simulazioni al computer basate sul calcolo numerico si possono trovare forme curve ottimizzate per la diffusione.

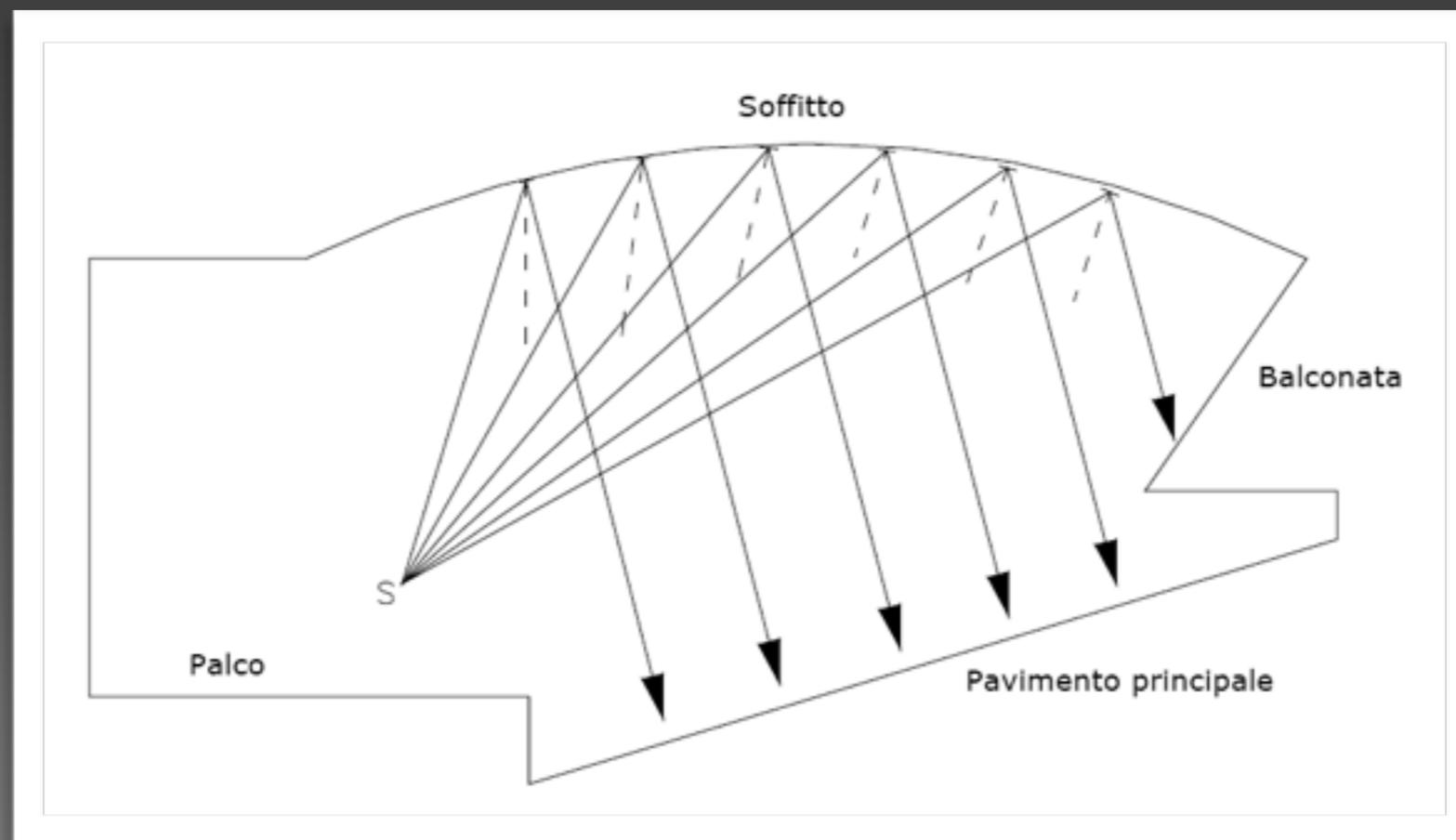




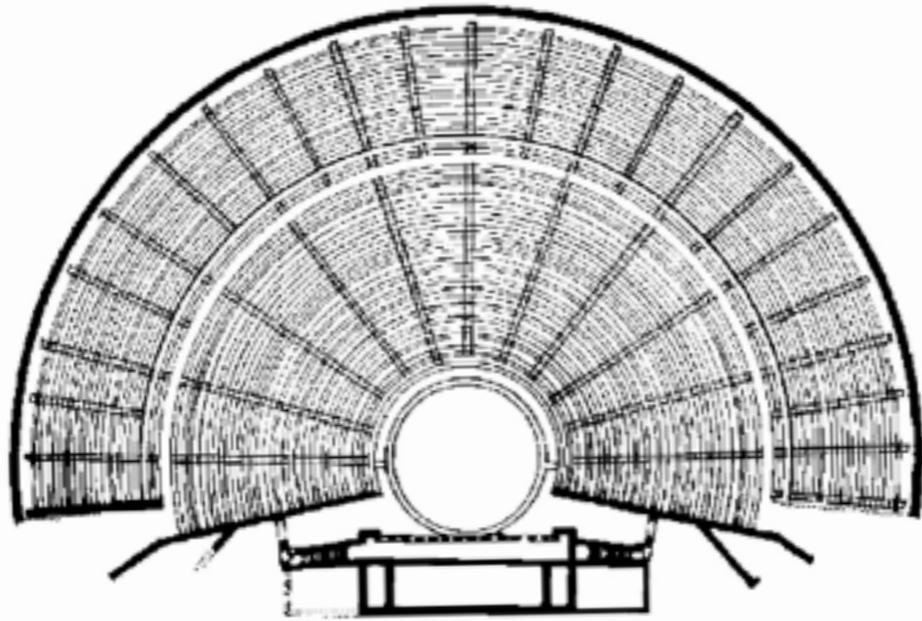
# Room Acoustics:

## Acustica negli ambienti chiusi

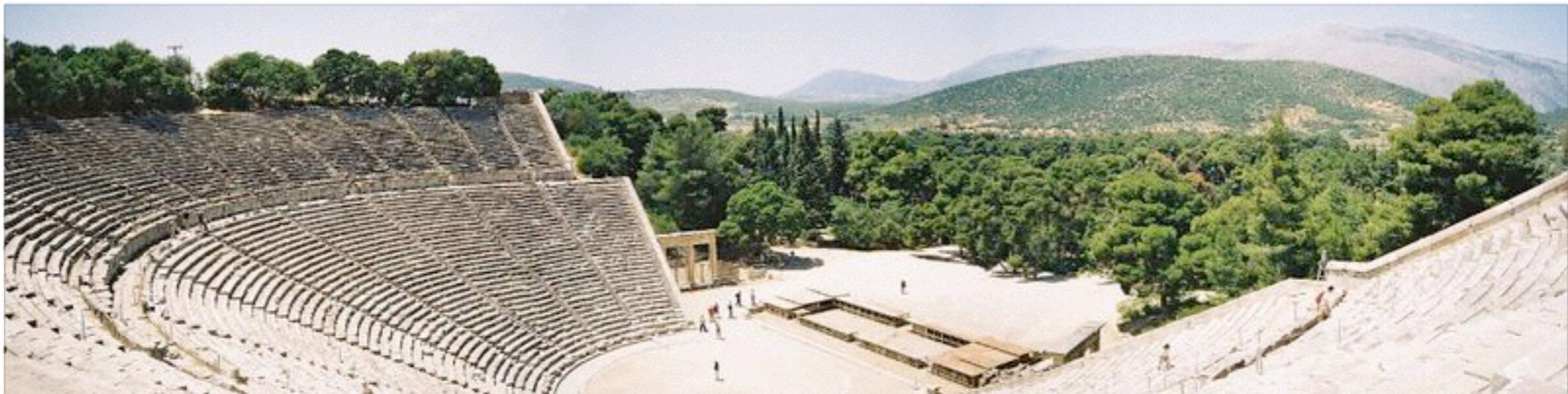
Scienza che studia la propagazione del suono in locali chiusi o comunque in presenza di oggetti capaci di causare effetti significativi di assorbimento e riflessione.



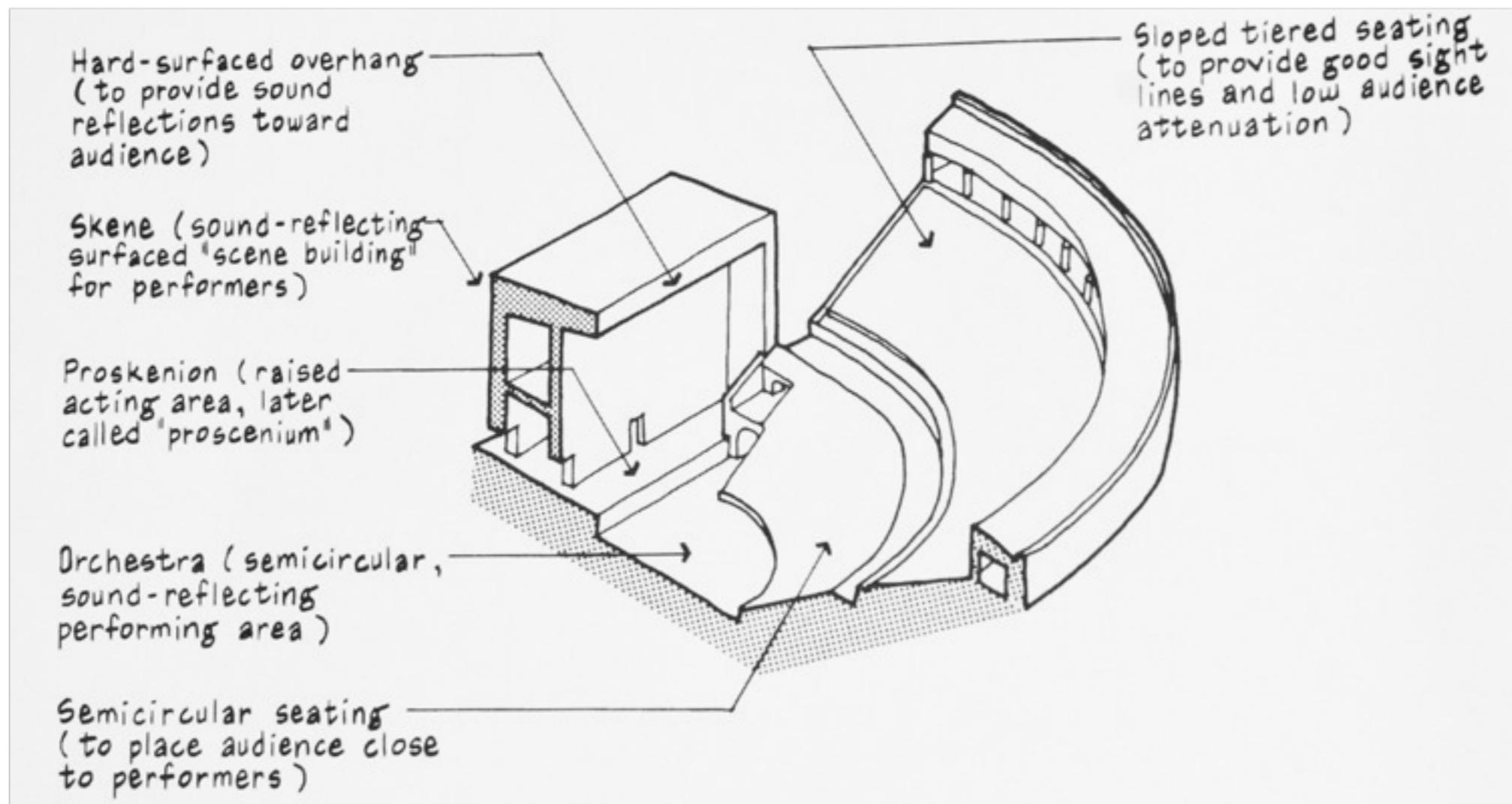
# Nell'antichità: i primi teatri



teatro di Epidauro, grecia



# Il teatro greco-romano



# Dopo i greci e i romani?

Ci furono pochissimi miglioramenti nell'acustica, a causa della mancanza dell'elettroacustica e quindi di tutti gli strumenti per misurare le grandezze fisiche legate a questa scienza.

**Nel 1857 Henry per la prima volta tirò fuori il concetto di impulso, utilizzato spessissimo nella scienza moderna.**

“Un singolo impulso di un dente di un ingranaggio è un rumore; da una serie di denti in successione si ha un suono continuo; e se tutti i denti sono ugualmente spazati, e la velocità della ruota dentata è uniforme, allora si ha una nota musicale”.

In seguito suggerì alcuni fattori che potevano essere legati alla buona acustica:

1. la grandezza di una stanza;
2. il livello del suono o l'intensità dell'impulso;
3. la posizione delle superfici riflettenti;
4. la natura del materiale delle superfici riflettenti.

*(È interessante notare come questi fattori siano fortemente legati a quelli descritti da Yoichi Ando ossia Listening Level, Initial time delay, IACC e  $\tau_{IACC}$ )*

# Wallace Clement Sabine

1868 - 1919

Professore all'Università di Harvard  
fu il primo fisico a studiare in modo  
scientifico l'acustica.

Legge di Sabine



# Sabine: correzione del Fogg Art Museum ad Harvard

Nella nuova “Lecture Hall” del Fogg Art Museum (Harvard University) il suono persisteva per circa 5.5 s per le multiple riflessioni sulle superfici intonacate della sala. Dato che molte persone che parlano inglese potrebbero completare 15 sillabe in 5.5 s, non c’era praticamente intelligibilità del parlato da nessuna parte nella sala.

Sabine capì che il problema della persistenza dell’energia sonora era dovuta alla grandezza della sala e ai suoi arredi, incluse le persone.

Effettuò molteplici test utilizzando canne da organo come sorgenti e altre strumentazioni. La canna da organo aveva un livello iniziale nella sala di circa 60 dB sopra il livello di percezione di un giovane ascoltatore alla frequenza di 512 Hz.

Sabine utilizzò il suo udito disciplinato per giudicare quando la sorgente della canna d’organo cessava di essere udibile: ne misurò il tempo di decadimento con un cronografo e lo definì come *Tempo di Riverberazione*.

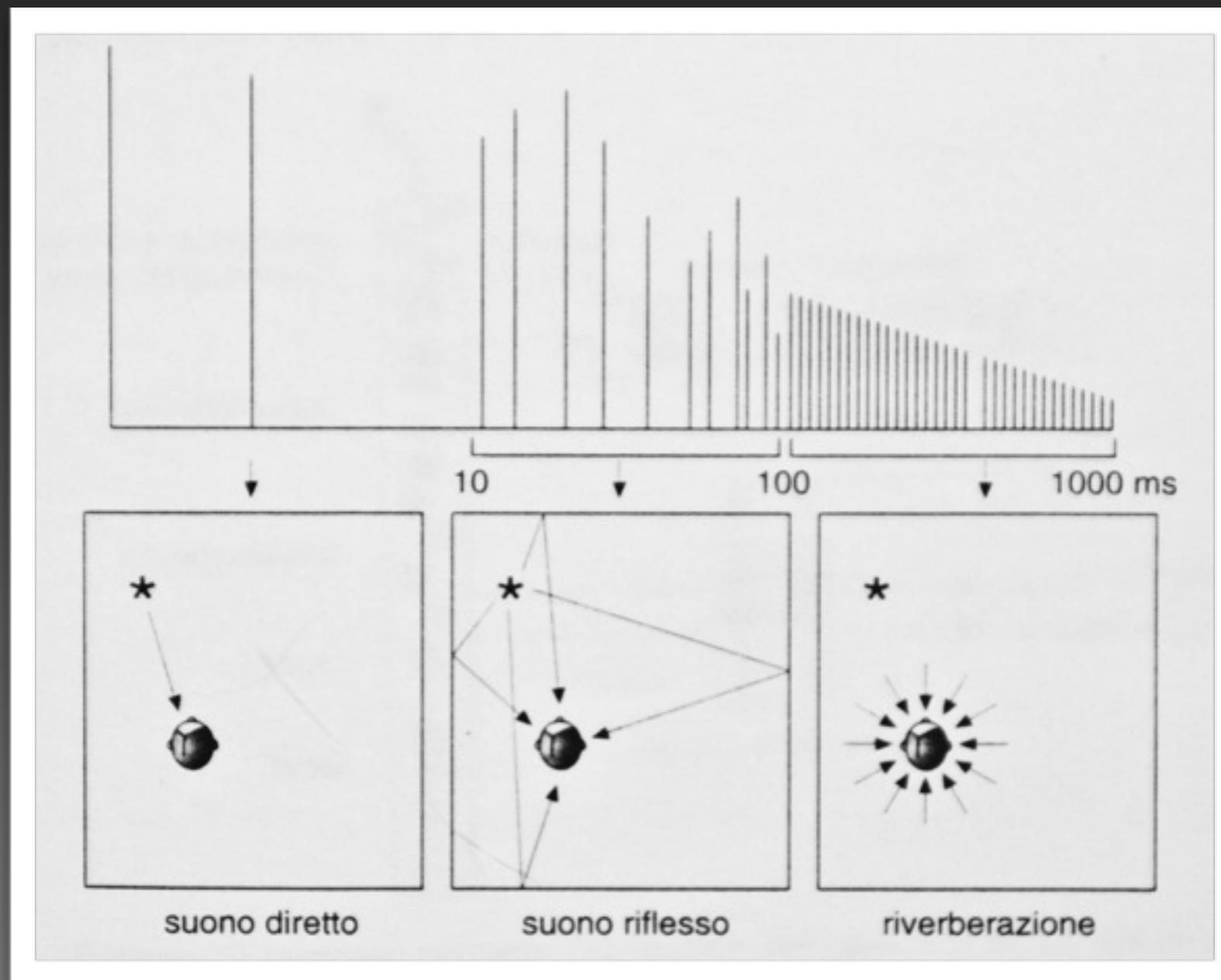
Coprì le sedute di materiale poroso fonoassorbente e misurò di quanto diminuiva il tempo di riverberazione nella sala.

# Tempo di Riverberazione RT60

tempo necessario affinché la densità di energia sonora decresca di 60 dB dal valore originario dopo che la sorgente abbia cessato di vibrare

Legge di Sabine: 
$$RT60 [s] = 0.161 \frac{V [m^3]}{A [m^2]}$$

# Suono in un ambiente chiuso

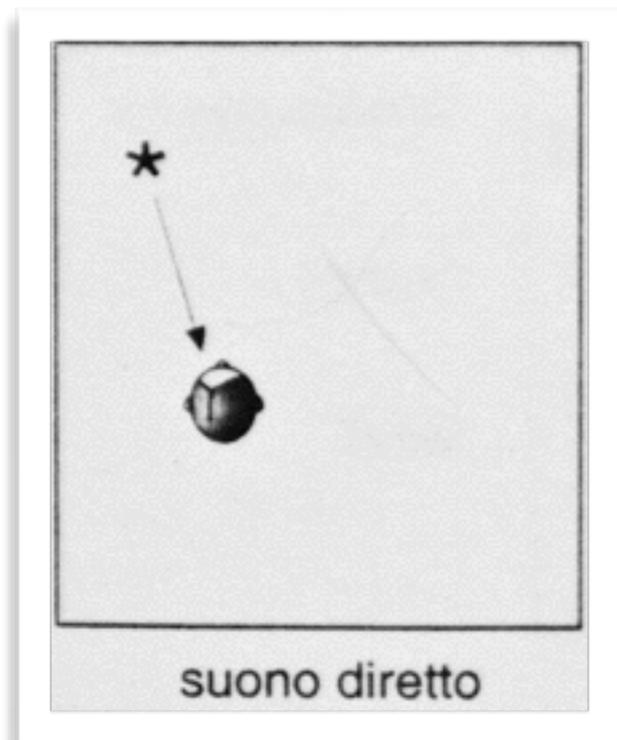


# Suono diretto

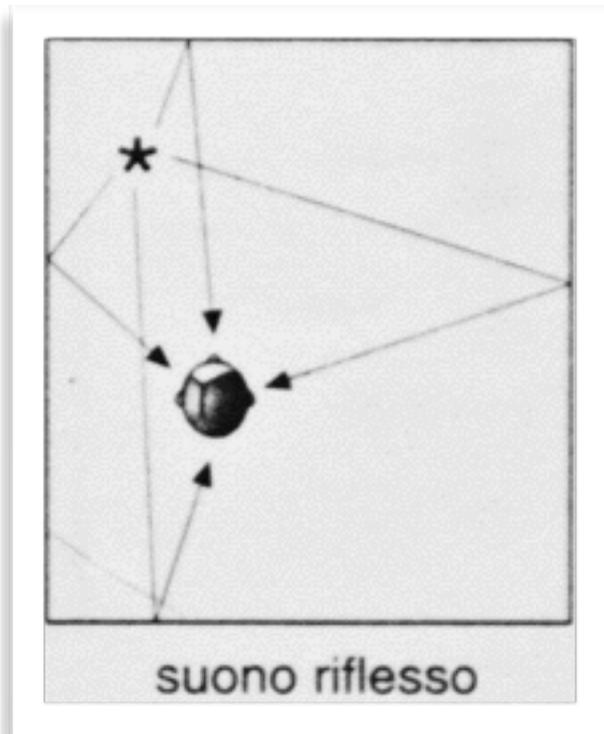
Il **Suono diretto** trasmette informazioni relative a:

1. posizione della sorgente;
2. dimensione della sorgente;
3. vero timbro della sorgente.

L'ammontare di assorbimento che si verifica quando il suono viene riflesso da una superficie non è uguale a tutte le frequenze; perciò il timbro del suono riflesso è influenzato dalle caratteristiche della superficie che ha incontrato.



# Prime Riflessioni



Le **Prime riflessioni** raggiungono l'orecchio entro 30÷80 millisecondi dal suono diretto: queste riflessioni sono il risultato di onde che hanno incontrato poche superfici prima di arrivare all'ascoltatore, e possono giungere da direzioni diverse rispetto al suono diretto.

**L'intervallo di tempo** che intercorre fra l'ascolto del suono diretto e l'inizio delle prime riflessioni fornisce informazioni sulla dimensione della stanza in cui si verifica l'evento sonoro: più lontane sono le superfici rispetto all'ascoltatore, maggiore sarà il tempo che il suono impiega per raggiungerle e per venire poi riflesso verso l'ascoltatore stesso.



# ...dopo le prime riflessioni

I suoni che raggiungono l'ascoltatore in un istante successivo a 30÷80 ms dopo il suono diretto, sono stati riflessi da un numero tale di superfici diverse che cominciano a raggiungere l'ascoltatore in un flusso virtualmente continuo e da tutte le direzioni.

Queste onde ravvicinate sono dette **riverberazione**: la riverberazione è caratterizzata da una diminuzione graduale di ampiezza e dal fatto che conferisce calore e corposità al suono; inoltre contribuisce anche alla sua intensità.

A causa delle molte riflessioni, il timbro della riverberazione è molto diverso rispetto al suono diretto, e la differenza principale è un taglio delle alte frequenze e una conseguente enfaticizzazione delle basse.

# Riverberazione

Persistenza del suono dopo che la sorgente sonora ha cessato di vibrare.

È causata dalla riflessione continuata delle onde sonore sulle superfici dell'ambiente in cui si propagano.



in ogni riflessione l'intensità del suono viene ridotta di un fattore  $x < 1$ , dopo  $N$  riflessioni risulterà ridotta di un fattore  $x^N$ :

$$I = I_0 x^{t/\Delta T} = I_0 e^{-t/\tau}$$

**andamento esponenziale decrescente**

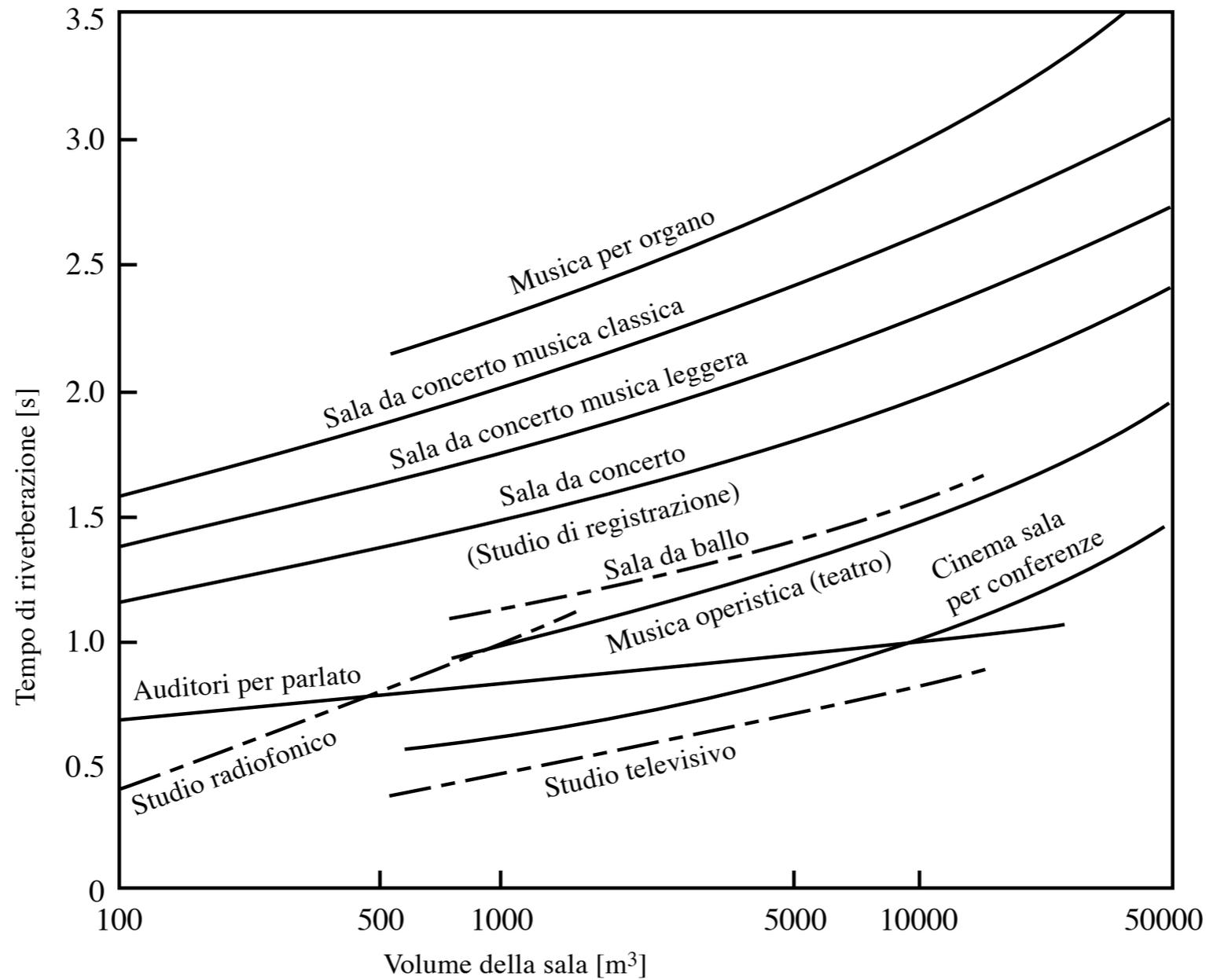
# Tempo di riverberazione ottimale

Per la migliore intelligibilità si deve avere nel punto di ascolto un'intensità sonora sufficiente ed una dispersione temporale non eccessiva del suono emesso dalla sorgente

**RIVERBERAZIONE: ruolo duplice**

- (+) innalza l'intensità sonora rispetto a quella del suono diretto;
- (-) aumenta la dispersione temporale, incidendo negativamente sulla comprensione delle note e dei fonemi.

**Il tempo di riverberazione deve assumere un valore ottimale in modo da offrire il miglior compromesso possibile.**



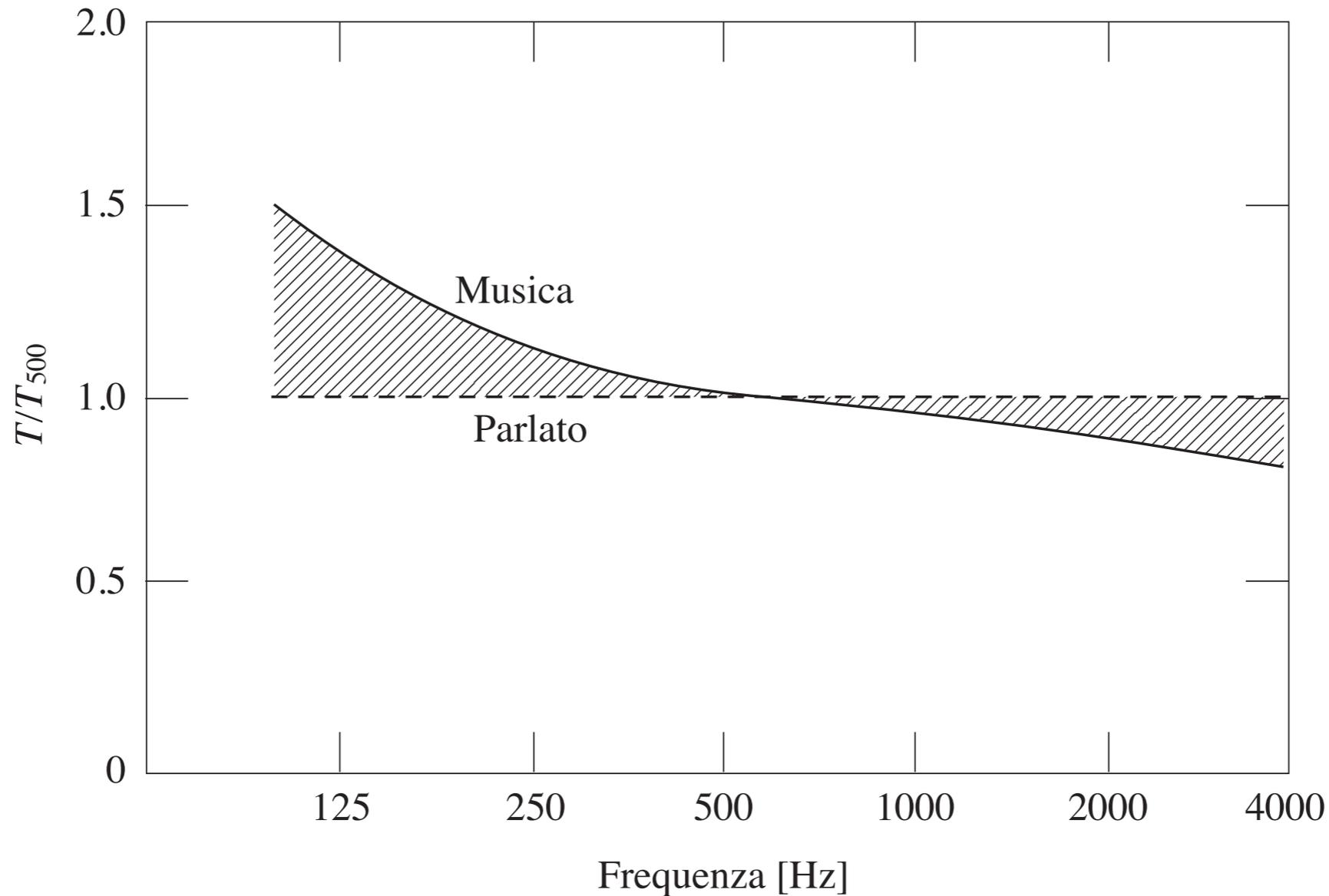
il valore ottimale cresce all'aumentare del volume della sala per una determinata destinazione d'uso:

formule empiriche  
( $V$  in  $m^3$ )

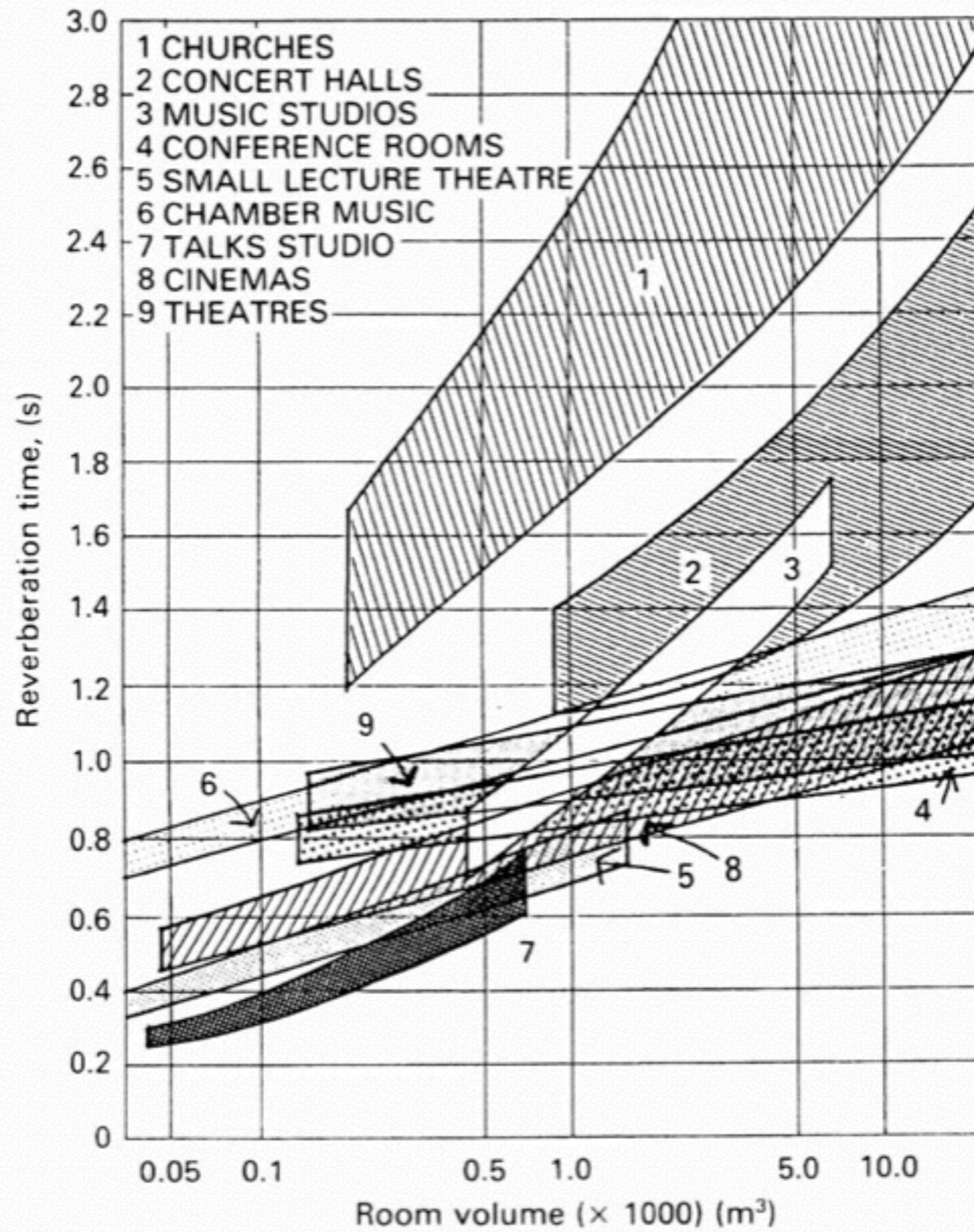
$$RT60_{parlato} = 0.1 V^{1/3}$$

$$RT60_{musica} = 0.5 + 10^{-4} V$$

# andamento del tempo di riverberazione ottimale in funzione della frequenza:



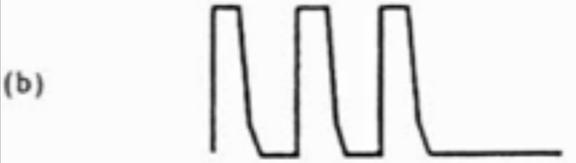
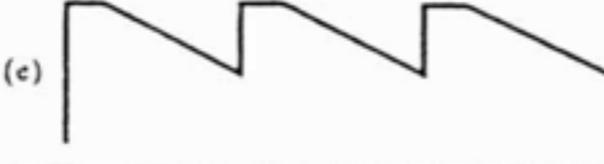
il tempo di riverberazione ottimale alle frequenze più basse può quasi raddoppiare rispetto al valore corrispondente a 500 Hz



# Valori di RT60 relativi a importanti sale acusticamente efficienti

| Sala                                 | $V/10^3$<br>[m <sup>3</sup> ] | $S/10^3$<br>[m <sup>2</sup> ] | Tempo di riverber. [s]<br>a varie frequenze [Hz] |      |      |      |      |      | Prima riflessione<br>[ms] | Posti |
|--------------------------------------|-------------------------------|-------------------------------|--|------|------|------|------|------|---------------------------|-------|
|                                      |                               |                               | _____  |      |      |      |      |      |                           |       |
|                                      |                               |                               | 125  | 250  | 500  | 1000 | 2000 | 4000 |                           |       |
| Gerusalemme, Binyanei Ha'oomah       | 24.7                          | 2.4                           | 2.2  | 2.0  | 1.75 | 1.75 | 1.65 | 1.5  | 13-26                     | 3100  |
| New York, Carnegie Hall (pre-rest.)  | 24.3                          | 2.0                           | 1.8  | 1.8  | 1.8  | 1.6  | 1.6  | 1.4  | 16-23                     | 2800  |
| Boston, Symphony Hall                | 18.7                          | 1.6                           | 2.2  | 2.0  | 1.8  | 1.8  | 1.7  | 1.5  | 7-15                      | 2600  |
| Amsterdam, Concertgebouw             | 18.7                          | 1.3                           | 2.2  | 2.2  | 2.1  | 1.9  | 1.8  | 1.6  | 9-21                      | 2200  |
| Glasgow, St. Andrew's Hall           | 16.1                          | 1.4                           | 1.8  | 1.8  | 1.9  | 1.9  | 1.8  | 1.5  | 8-20                      | 2100  |
| Philadelphia, Academy of Music       | 15.7                          | 1.7                           | 1.4  | 1.7  | 1.45 | 1.35 | 1.25 | 1.15 | 10-19                     | 3000  |
| Bristol, Colston Hall                | 13.5                          | 1.3                           | 1.85   | 1.7  | 1.7  | 1.7  | 1.6  | 1.35 | 6-14                      | 2200  |
| Bruxelles, Palais des Beaux Arts     | 12.5                          | 1.5                           | 1.9  | 1.75 | 1.5  | 1.35 | 1.25 | 1.1  | 4-23                      | 2200  |
| Göteborg, Konzerthus                 | 11.9                          | 1.0                           | 1.9  | 1.7  | 1.7  | 1.7  | 1.55 | 1.45 | 22-23                     | 1400  |
| Lipsia, Neues Gewandhaus             | 10.6                          | 1.0                           | 1.5  | 1.6  | 1.55 | 1.55 | 1.35 | 1.2  | 6-8                       | 1600  |
| Basilea, Stadt-Casino                | 10.5                          | 0.9                           | 2.2  | 2.0  | 1.8  | 1.6  | 1.5  | 1.4  | 6-16                      | 1400  |
| Cambridge (Mass.), Kresge Auditorium | 10.0                          | 1.0                           | 1.65   | 1.55 | 1.5  | 1.45 | 1.35 | 1.25 | 10-15                     | 1200  |
| Buenos Aires, Teatro Colon           | 20.6                          | 2.1                           | —  | —    | 1.7  | —    | —    | —    | 13-19                     | 2800  |
| New York, Metropolitan Opera         | 19.5                          | 2.6                           | 1.8  | 1.5  | 1.3  | 1.1  | 1.0  | 0.9  | 18-22                     | 2800  |
| Milano, Teatro alla Scala            | 11.2                          | 1.6                           | 1.5  | 1.4  | 1.3  | 1.2  | 1.0  | 0.9  | 12-15                     | 2500  |

Fig. 1.3. Tempi di riverberazione alle varie frequenze di alcune sale da concerto (da KINSLER, *Fundamentals of Acoustics* 4<sup>a</sup> ed.).

|                           | Condizioni acustiche    |   | Note suonate lentamente  |  | Note suonate velocemente  |  |
|---------------------------|-------------------------|---|--|--|---|--|
|                           | Tempo di riverberazione | Rapporto tra Loudness: suono diretto vs. suono riverberante | Risultato acustico-musicale  | definizione e pienezza dei toni                      | Risultato acustico-musicale   | definizione e pienezza dei toni                      |
| Toni alla stessa loudness | corto                   | grande  | (a)    | Alta definizione<br>irrilevante<br>pienezza dei toni | (b)    | Alta definizione<br>irrilevante<br>pienezza dei toni |
|                           | lungo                   | medio   | (c)   | Alta definizione<br>una piccola<br>pienezza dei toni | (d)   | Alta definizione<br>una piccola<br>pienezza dei toni |
|                           | lungo                   | piccolo   | (e)  | Media<br>definizione<br>alta pienezza dei toni       | (f)  | Bassa<br>definizione<br>alta pienezza dei toni       |
| Toni a diverse loudness   | lungo                   | medio   | (g)  | Alta definizione<br>una piccola<br>pienezza dei toni | (h)  | Alta definizione<br>una piccola<br>pienezza dei toni |
|                           | lungo                   | piccolo   | (i)  | Bassa<br>definizione<br>alta pienezza dei toni       | (j)  | Molto bassa<br>definizione<br>alta pienezza dei toni |

# Leo Beranek

1962: *Music, Acoustics and Architecture*

Analisi di 100 tra le più importanti *concert halls*.

Tentativo di classificazione delle sale da concerto utilizzando parametri oggettivi.



Il tempo di riverberazione è un parametro fondamentale, ma non è l'unico adatto a valutare l'acustica di un ambiente.

Introduzione di nuovi parametri per l'acustica ambientale

# Spazialità

Lo studio di Beranek chiarì la maggior parte dei fattori temporali, ma non studiò la parte spaziale e quindi binaurale.

Dagli anni '70 circa si cominciarono ad investigare gli aspetti spaziali del suono con:

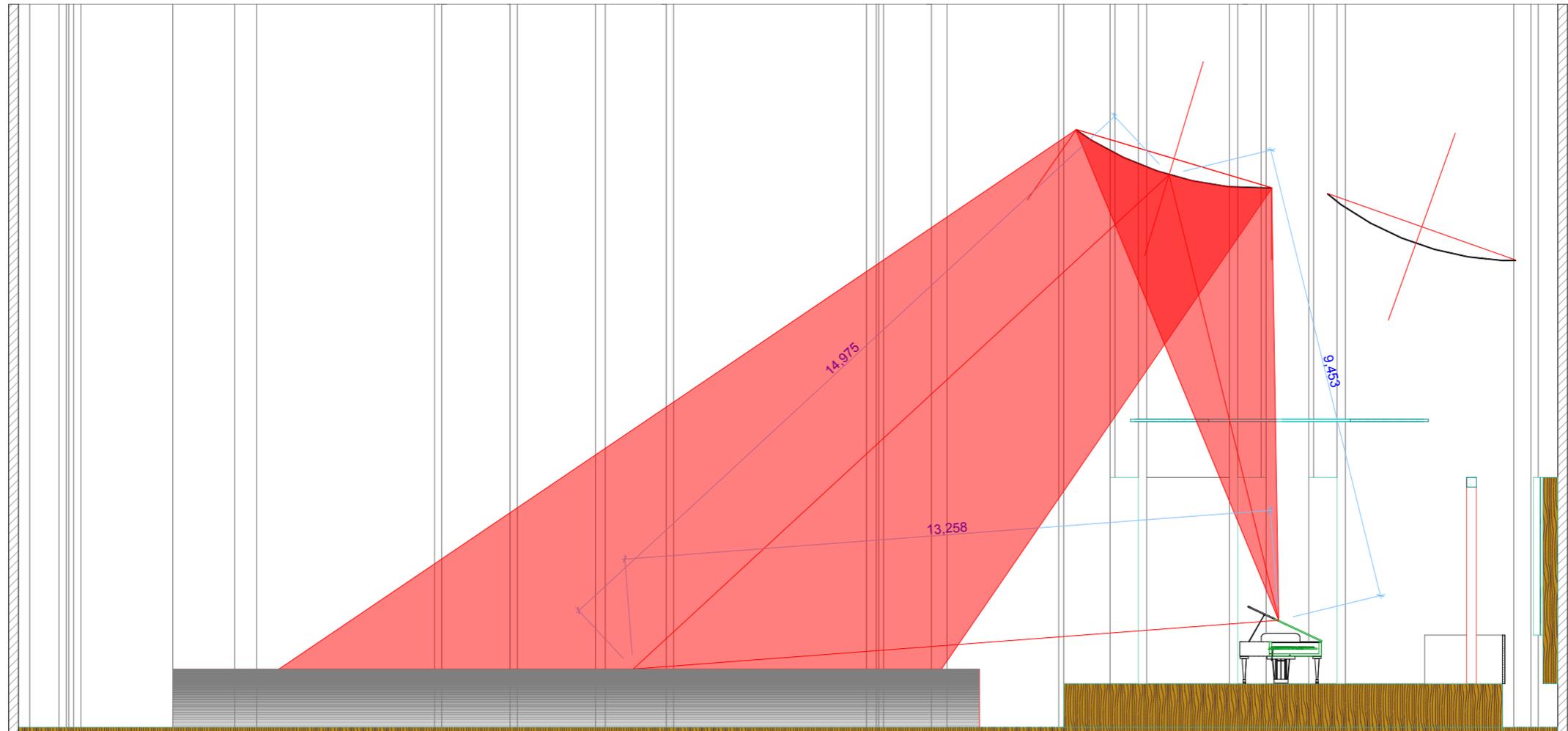
1. Barron (1971): investigò la “sensazione spaziale” o la sensazione di “involuppo” del campo sonoro in relazione al coefficiente IACC (Inter Aural Cross Correlation);
2. Damaske e Ando (1972): proposero un metodo per calcolare l'IACC per i campi acustici;
3. Ando e Kageyama (1977): investigarono le preferenze soggettive in relazione a fattori fisici, che furono calcolati dalle espressioni matematiche per il suono che arriva ad entrambe le orecchie;
4. Ando (1983): pubblicò una teoria di preferenza soggettiva in relazione ai quattro fattori “ortogonali” di un campo acustico, permettendo il calcolo di una scala di valori per ogni posto;
5. Cocchi, Farina e Rocco (1990): confermarono la teoria di Ando per una sala esistente.
6. Sato Mori e Ando (1997): riconfermarono la teoria più chiaramente grazie a giudizi di ascolto comparato in una sala esistente, scambiando le sorgenti sul palco invece che cambiando seduta. Introdussero il  $\tau_{IACC}$ , ossia l'*interaural delay* del IACC, per l'*image shift* della sorgente sonora.

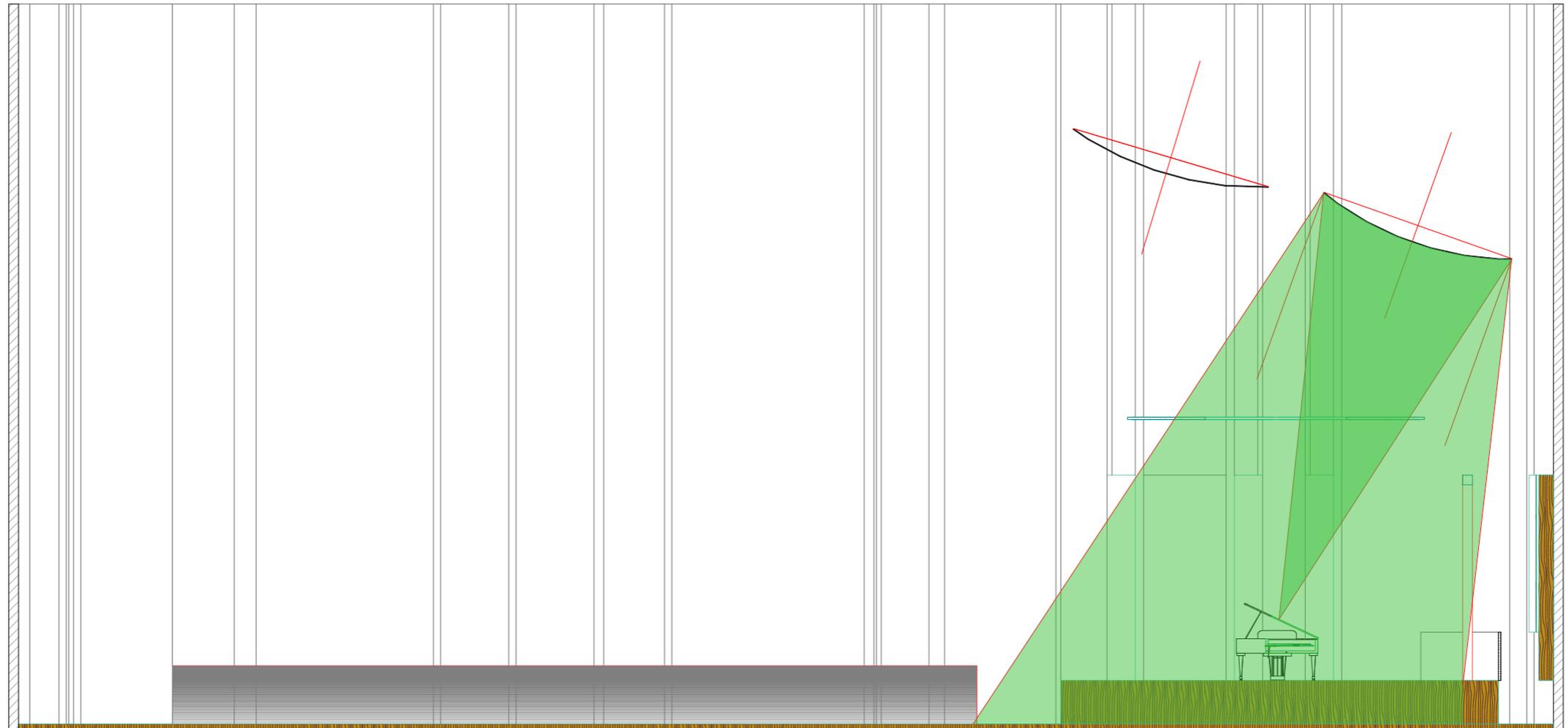
# Altri parametri acustici

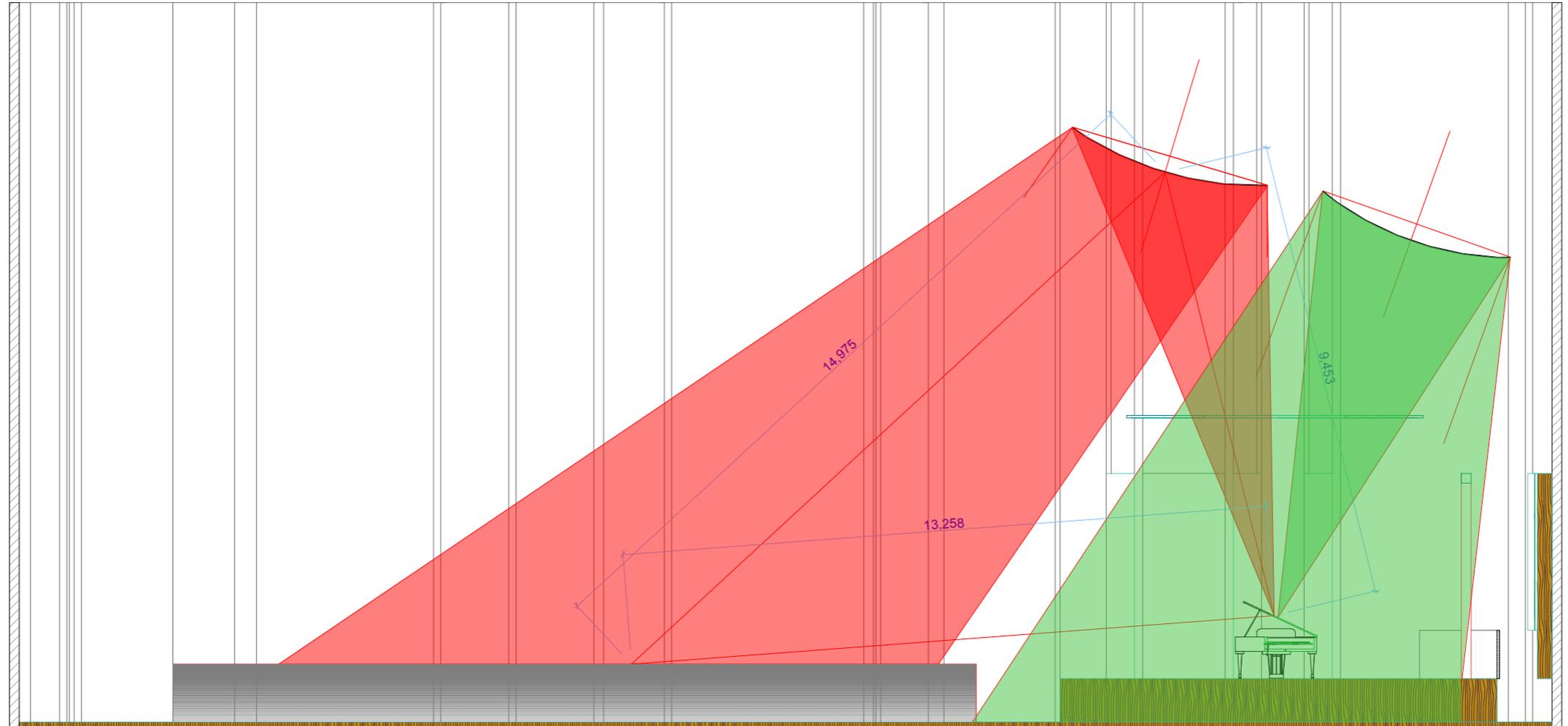
G<sub>ts</sub> TIACC Clarity R<sub>a</sub> STIC  
L<sub>f</sub> LIACC C50 BR DirSPL C80  
D<sub>efinition</sub> ITD  
W<sub>IACC</sub> D<sub>50</sub> G  
TotSPL

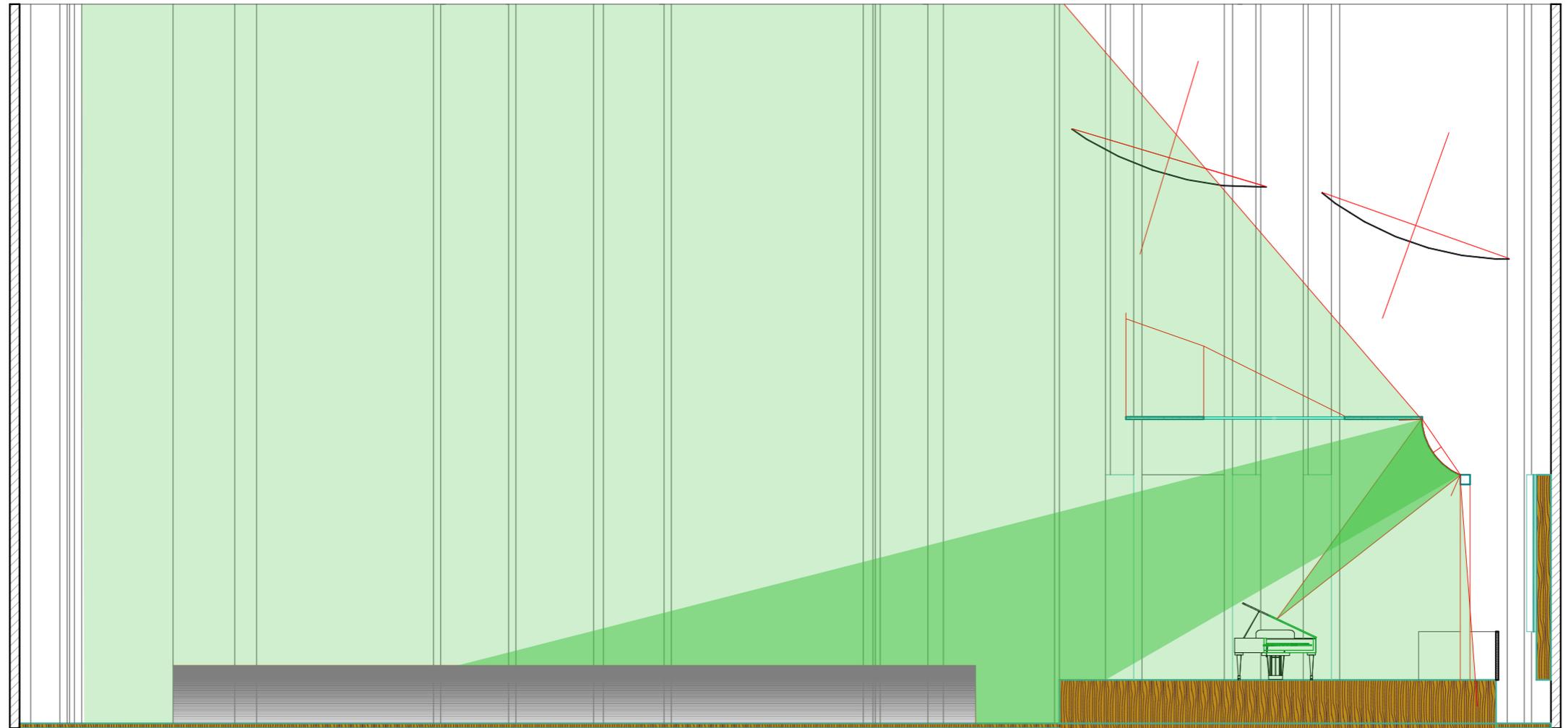
AI<sub>cons</sub> STI

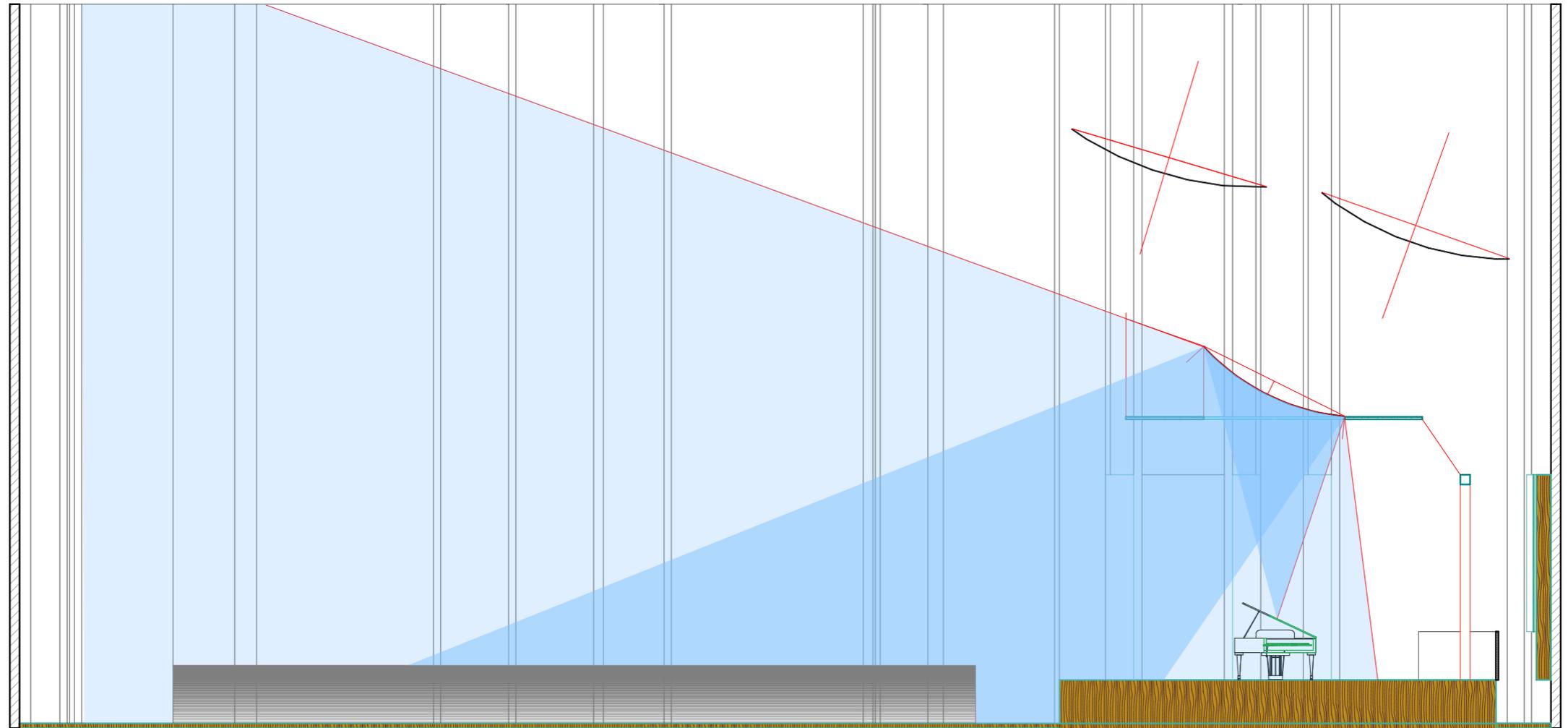
| Attributo Soggettivo             | Criterio di misura oggettiva                                  | Parametri utilizzati  |
|----------------------------------|---|---|
| Chiarezza e trasparenza armonica | Rapporto tra energia vicina e lontana dal suono diretto       | Criteri energetici (C80, C50, D50, t                            |
| Riverberazione                   | Decadimento dell'energia sonora                               | Tempi di riveberazione (T30, T20, T10, EDT)                     |
| Spazialità del campo acustico    | Energia Laterale, dissimilarità dei segnali alle due orecchie | Spazialità mono e binaurale<br>$w$                              |
| Intimità                         | Distanza, ritardo della prima riflessione e livello sonoro    | Tempo di ritardo iniziale (ITDG)                                |
| Loudness                         | Livello sonoro  | Livelli sonori e rinforzo sonoro (G, DirSPL, TotSPL, D/R ratio) |
| Calore                           | Relazione tra riverberazione alle frequenze gravi e medie     | Bass Ratio (BR)   |
| Intelligibilità                  | Intelligibilità e comprensione del parlato                    | Parametri di intelligibilità (STI, RaSTI, ALcons)               |

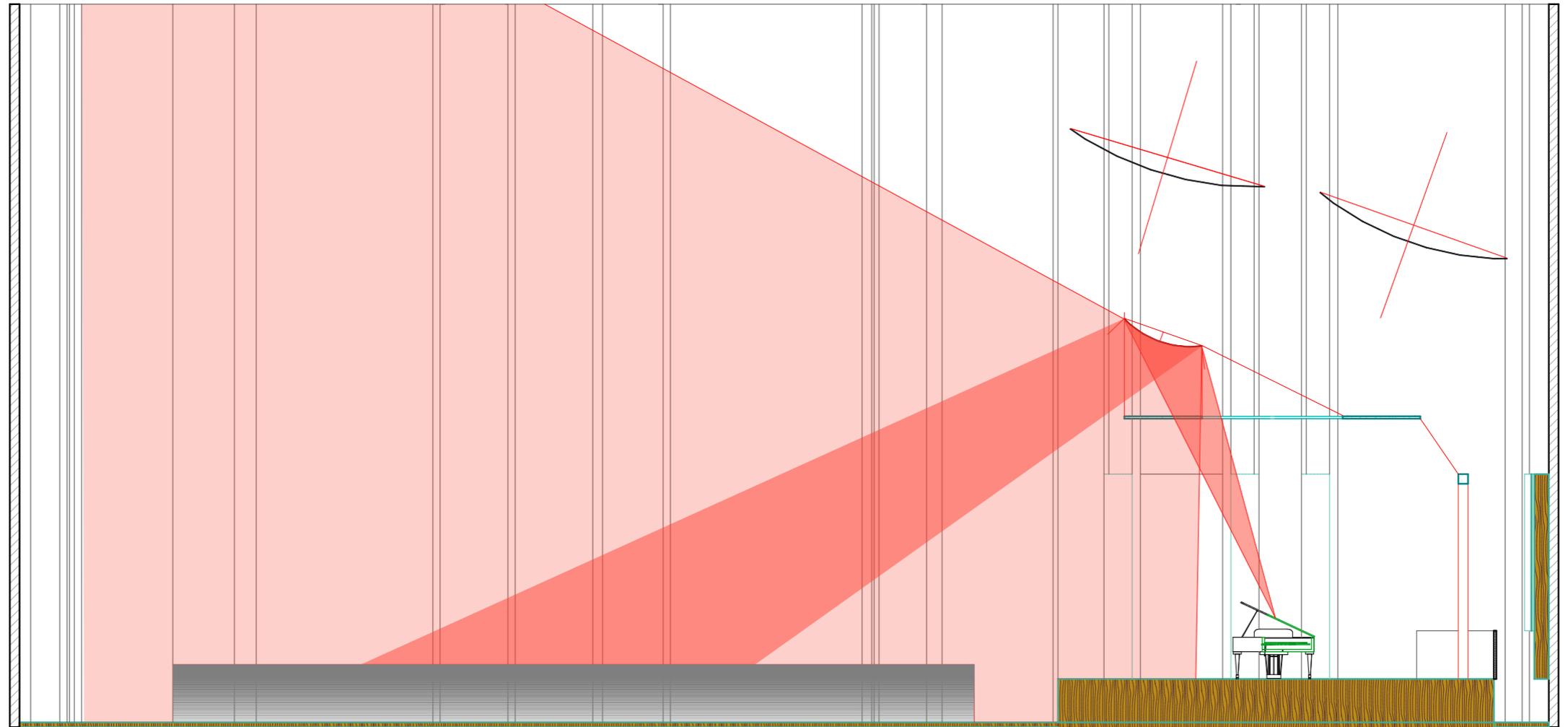


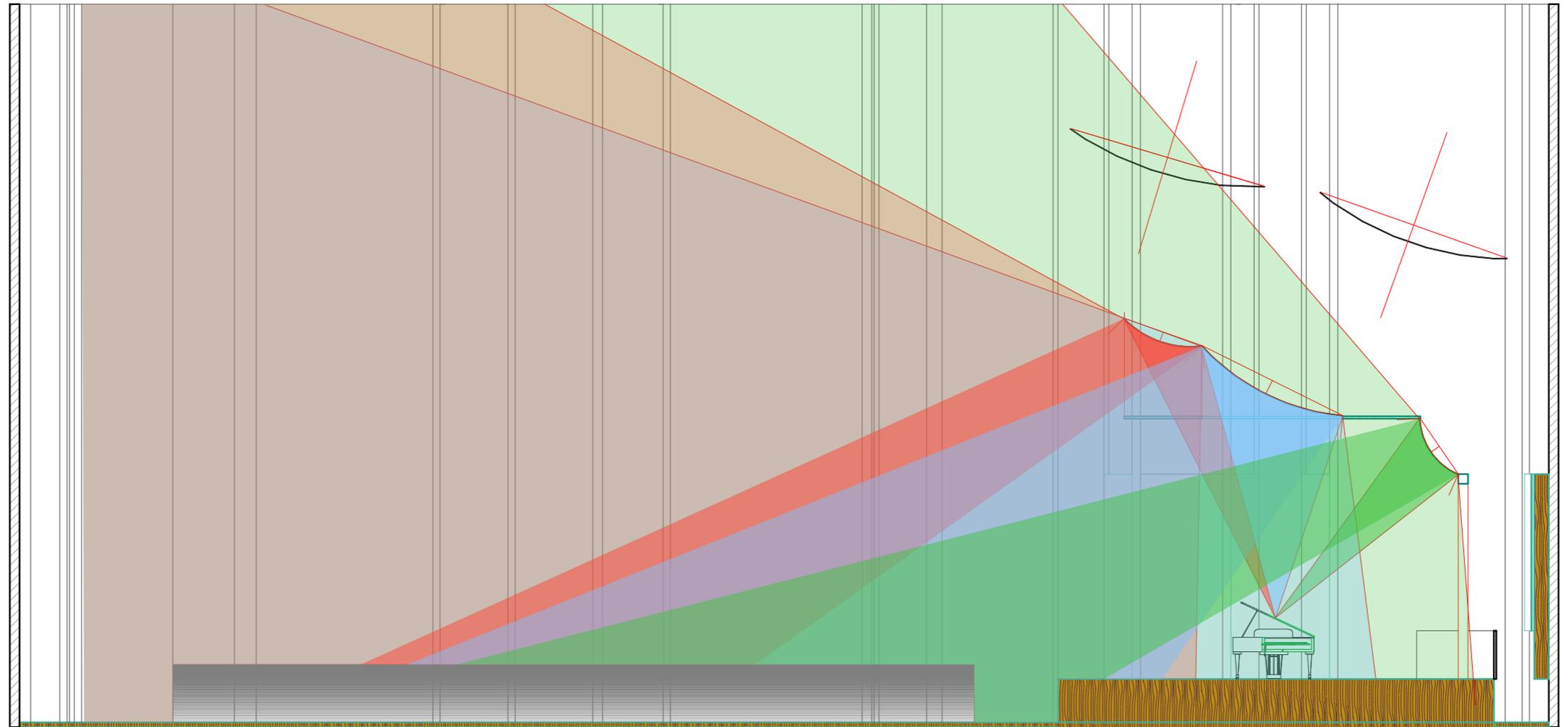


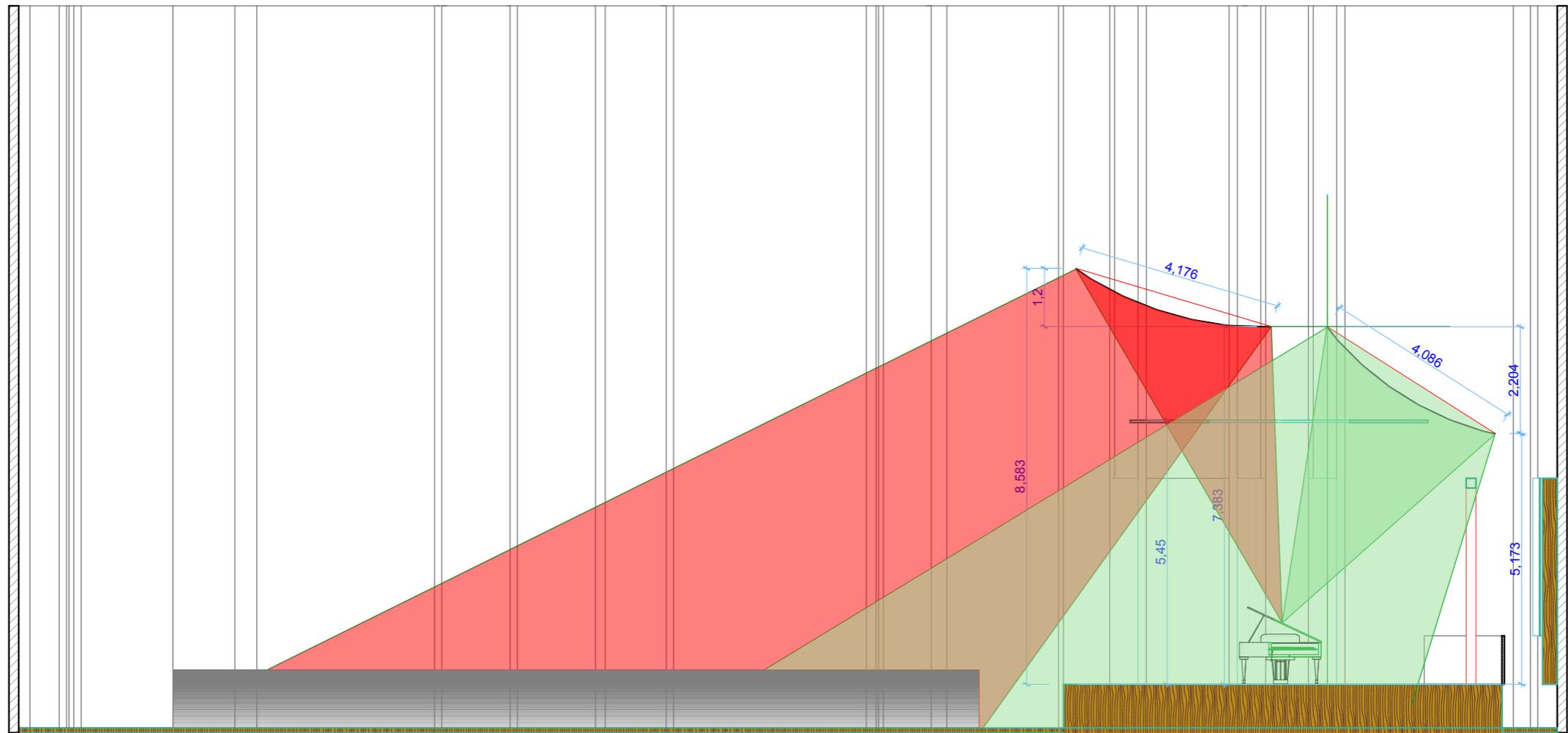


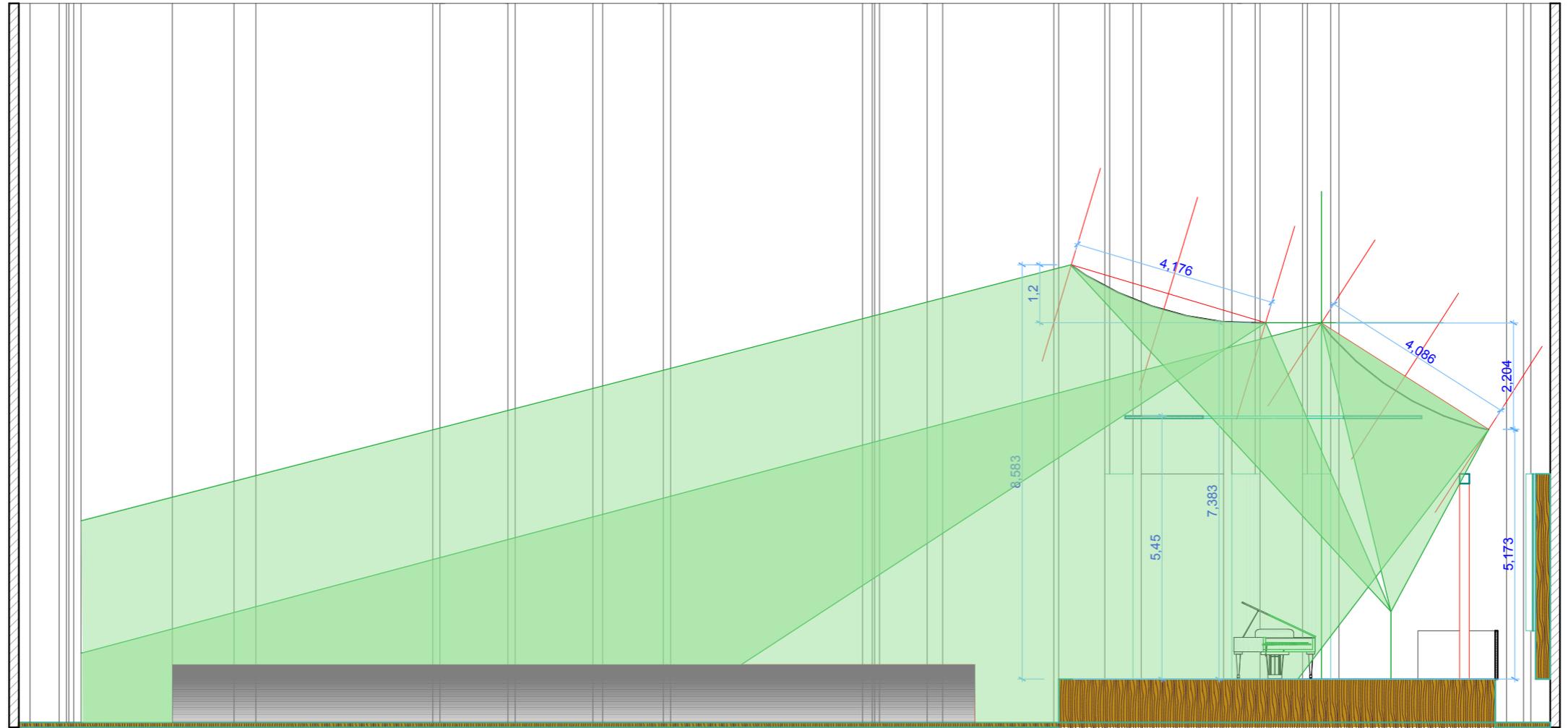






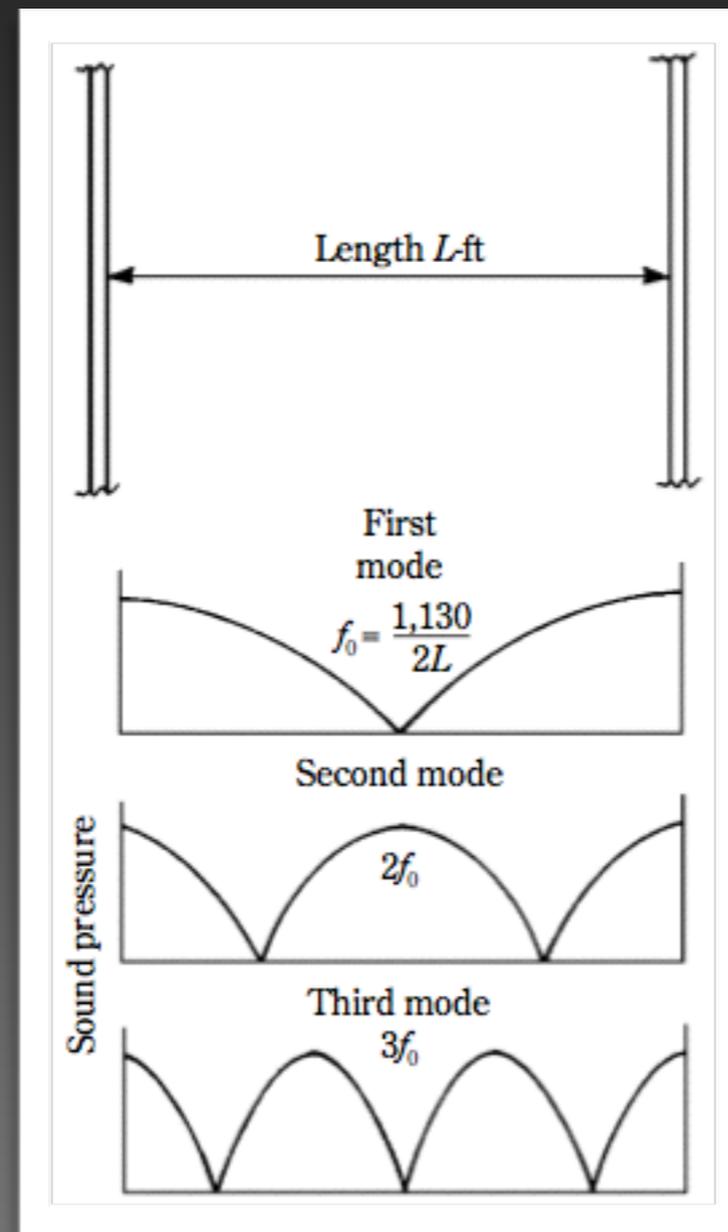






|  | Pannello frontale |       | Pannello sul retro |       |
|--|-------------------|-------|--------------------|-------|
|  | Cima              | Fondo | Cima               | Fondo |
| <b>Percorso [m]</b><br>vecchia posizione | 10,2              | 14    | 15,3               | 13,7  |
| <b>ITDG [ms]</b><br>vecchia posizione    | 30                | 38    | 45                 | 40    |
| <b>Percorso [m]</b><br>nuova posizione   | 6                 | 9,5   | 9,1                | 7,7   |
| <b>ITDG [ms]</b><br>nuova posizione      | 17,5              | 27    | 26                 | 22,5  |

# Risonanze modali e onde stazionarie



Un' onda stazionaria è una perturbazione periodica di un mezzo materiale, le cui oscillazioni sono limitate nello spazio. In pratica non c'è propagazione nello spazio.

Le onde stazionarie sono il risultato dell'interferenza tra onde progressive e regressive sinusoidali, aventi la stessa frequenza.

Una caratteristica delle onde stazionarie è che ad esse non è associato alcun trasporto di energia.



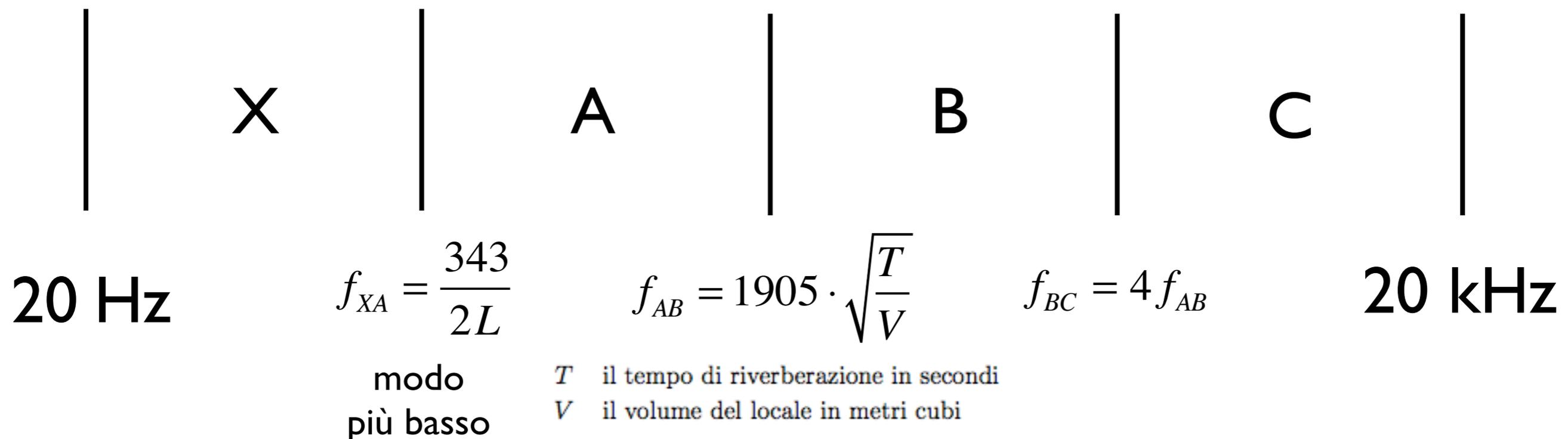
# Divisione spettro udibile

REGIONE X: non c'è rinforzo modale

REGIONE A: modi normali (onde acustiche - *wave acoustics*)

REGIONE B: fenomeni di diffrazione e diffusione (regione transizione)

REGIONE C: riflessione speculare (raggi acustici - *ray acoustics*)



# Esempio stanza

L 6.7 x W 5.5 x H 4.3 m

T = 0.5 s

Regione X : da 0 a 26 Hz

Regione A : da 26 a 107 Hz

Regione B : da 107 a 428 Hz

Regione C : da 428 a 20000 Hz.

$$f_{XA} = \frac{c}{2\lambda} = \frac{343 \text{ [m/s]}}{6.7 \cdot 2 \text{ [m]}} \approx 26 \text{ Hz}$$

$$f_{AB} = 1905 \cdot \sqrt{\frac{T}{V}} = 1905 \cdot \sqrt{\frac{0.5}{6.7 \times 5.5 \times 4.3}} \approx 107 \text{ Hz}$$

$$f_{BC} = 4 f_{AB} = 107 \times 4 = 428 \text{ Hz}$$

...ricordarsi...

$$f = \frac{c}{\lambda} = \frac{343}{\lambda}$$

# Effetto della misura del locale

riducendo il volume del locale, aumenta il limite inferiore della regione A e quindi si impoverisce la risposta dell'ambiente alle basse frequenze

più il locale è piccolo, più è ampia la porzione dello spettro udibile dominata dalle risonanze modali

in tal caso le frequenze di risonanza risulteranno sempre più spaziate causando irregolarità nella risposta della stanza ed un aumento della colorazione del suono

# Wave Acoustics

Ogni locale può essere modellizzato come un risonatore acustico complesso, avente un infinito numero di modi di vibrazione, ciascuno con una ben precisa frequenza di risonanza: ogniqualvolta una di queste frequenze viene prodotta all'interno del locale, ne risulterà una corrispondente onda stazionaria.

È dimostrabile che l'aria racchiusa in una stanza rettangolare possiede un infinito numero di modi normali di vibrazione. Le frequenze alle quali occorrono sono date dall'equazione:

$$f = \frac{c}{2} \sqrt{\left(\frac{p}{L}\right)^2 + \left(\frac{q}{W}\right)^2 + \left(\frac{r}{H}\right)^2}$$

|           |                                  |
|-----------|----------------------------------|
| $c$       | la velocità del suono, 344 m/s   |
| $L$       | la lunghezza del locale in metri |
| $W$       | la larghezza del locale in metri |
| $H$       | l'altezza del locale in metri    |
| $p, q, r$ | gli interi 0, 1, 2, 3... $n$     |

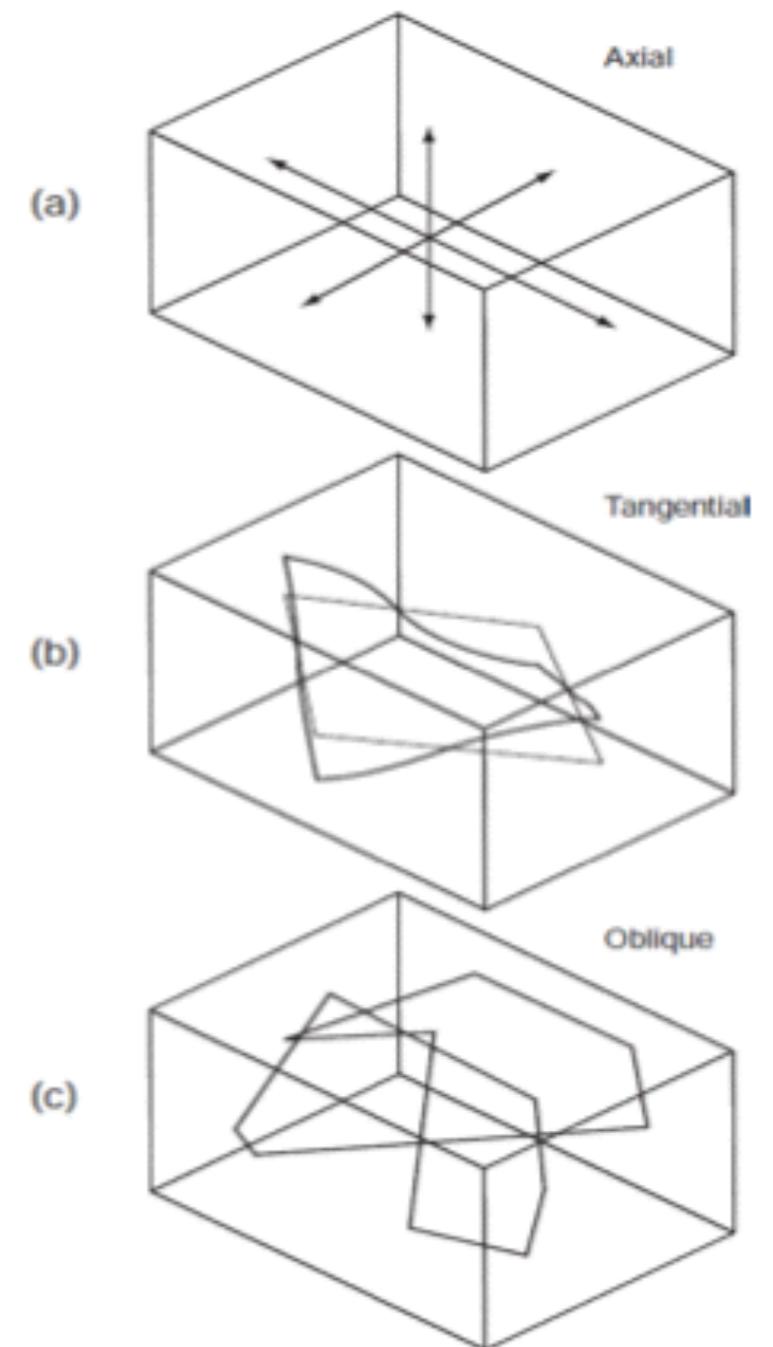
# Analisi Modale

Si calcolano le frequenze modali basandoci sulle dimensioni delle pareti rigide del locale

Uso di un programma di calcolo che sostituisca valori crescenti agli indici  $p, q, r$ , in sequenza

ordini i risultati dalla frequenza più piccola alla più grande

numeri i modi e ne descriva il tipo contando il numero di zeri presenti negli indici  $p, q, r$



Calcolo delle Risonanze Modali in stanze rettangolari

DIMENSIONI DEL LOCALE IN METRI

Lunghezza : 9.1

Larghezza : 7.6

Altezza : 5.9

=====> Volume 408.04 [m^3]

Proporzioni 1:1.29:1.54

Indici Modali da valutare: 0..4

=====> Modi : 125

| Modo | Frequenza | Angoli xyz     | Rifl. | p | q | r | Tipo |
|------|-----------|----------------|-------|---|---|---|------|
| 1    | 18.901    | 0.0 90.0 90.0  | 90.0  | 1 | 0 | 0 | A    |
| 2    | 22.632    | 90.0 0.0 90.0  | 90.0  | 0 | 1 | 0 | A    |
| 3    | 29.153    | 90.0 90.0 0.0  | 0.0   | 0 | 0 | 1 | A    |
| 4    | 29.486    | 50.1 39.9 90.0 | 90.0  | 1 | 1 | 0 | T    |
| 5    | 34.744    | 57.0 90.0 33.0 | 33.0  | 1 | 0 | 1 | T    |
| 6    | 36.906    | 90.0 52.2 37.8 | 37.8  | 0 | 1 | 1 | T    |
| 7    | 37.802    | 0.0 90.0 90.0  | 90.0  | 2 | 0 | 0 | A    |
| 8    | 41.465    | 62.9 56.9 45.3 | 45.3  | 1 | 1 | 1 | O    |
| 9    | 44.059    | 30.9 59.1 90.0 | 90.0  | 2 | 1 | 0 | T    |
| 10   | 45.263    | 90.0 0.0 90.0  | 90.0  | 0 | 2 | 0 | A    |
| 11   | 47.738    | 37.6 90.0 52.4 | 52.4  | 2 | 0 | 1 | T    |
| 12   | 49.051    | 67.3 22.7 90.0 | 90.0  | 1 | 2 | 0 | T    |
| 13   | 52.831    | 44.3 64.6 56.5 | 56.5  | 2 | 1 | 1 | O    |
| 14   | 53.839    | 90.0 32.8 57.2 | 57.2  | 0 | 2 | 1 | T    |
| 15   | 56.703    | 0.0 90.0 90.0  | 90.0  | 3 | 0 | 0 | A    |
| 16   | 57.060    | 70.7 37.5 59.3 | 59.3  | 1 | 2 | 1 | O    |
| 17   | 58.305    | 90.0 90.0 0.0  | 0.0   | 0 | 0 | 2 | A    |
| 18   | 58.973    | 50.1 39.9 90.0 | 90.0  | 2 | 2 | 0 | T    |
| 19   | 61.053    | 21.8 68.2 90.0 | 90.0  | 3 | 1 | 0 | T    |
| 20   | 61.292    | 72.0 90.0 18.0 | 18.0  | 1 | 0 | 2 | T    |
| 21   | 62.543    | 90.0 68.8 21.2 | 21.2  | 0 | 1 | 2 | T    |
| 22   | 63.758    | 27.2 90.0 62.8 | 62.8  | 3 | 0 | 1 | T    |
| 23   | 65.337    | 73.2 69.7 26.8 | 26.8  | 1 | 1 | 2 | O    |
| 24   | 65.785    | 54.9 46.5 63.7 | 63.7  | 2 | 2 | 1 | O    |
| 25   | 67.656    | 33.1 70.5 64.5 | 64.5  | 3 | 1 | 1 | O    |
| 26   | 67.895    | 90.0 0.0 90.0  | 90.0  | 0 | 3 | 0 | A    |

| Modo | Frequenza | Angoli xyz     | Rifl. | p | q | r | Tipo |
|------|-----------|----------------|-------|---|---|---|------|
| 27   | 69.487    | 57.0 90.0 33.0 | 33.0  | 2 | 0 | 2 | T    |
| 28   | 70.477    | 74.4 15.6 90.0 | 90.0  | 1 | 3 | 0 | T    |
| 29   | 72.554    | 38.6 51.4 90.0 | 90.0  | 3 | 2 | 0 | T    |
| 30   | 73.080    | 58.9 72.0 37.1 | 37.1  | 2 | 1 | 2 | O    |
| 31   | 73.812    | 90.0 52.2 37.8 | 37.8  | 0 | 2 | 2 | T    |
| 32   | 73.889    | 90.0 23.2 66.8 | 66.8  | 0 | 3 | 1 | T    |
| 33   | 75.604    | 0.0 90.0 90.0  | 90.0  | 4 | 0 | 0 | A    |
| 34   | 76.194    | 75.6 53.6 40.1 | 40.1  | 1 | 2 | 2 | O    |
| 35   | 76.268    | 75.7 27.1 67.5 | 67.5  | 1 | 3 | 1 | O    |
| 36   | 77.709    | 60.9 29.1 90.0 | 90.0  | 2 | 3 | 0 | T    |
| 37   | 78.191    | 43.5 54.6 68.1 | 68.1  | 3 | 2 | 1 | O    |
| 38   | 78.919    | 16.7 73.3 90.0 | 90.0  | 4 | 1 | 0 | T    |
| 39   | 81.030    | 21.1 90.0 68.9 | 68.9  | 4 | 0 | 1 | T    |
| 40   | 81.331    | 45.8 90.0 44.2 | 44.2  | 3 | 0 | 2 | T    |
| 41   | 82.929    | 62.9 56.9 45.3 | 45.3  | 2 | 2 | 2 | O    |
| 42   | 82.997    | 62.9 35.1 69.4 | 69.4  | 2 | 3 | 1 | O    |
| 43   | 84.131    | 26.0 74.4 69.7 | 69.7  | 4 | 1 | 1 | O    |
| 44   | 84.421    | 47.8 74.5 46.3 | 46.3  | 3 | 1 | 2 | O    |
| 45   | 87.458    | 90.0 90.0 0.0  | 0.0   | 0 | 0 | 3 | A    |
| 46   | 88.118    | 30.9 59.1 90.0 | 90.0  | 4 | 2 | 0 | T    |
| 47   | 88.459    | 50.1 39.9 90.0 | 90.0  | 3 | 3 | 0 | T    |
| 48   | 89.477    | 77.8 90.0 12.2 | 12.2  | 1 | 0 | 3 | T    |
| 49   | 89.494    | 90.0 40.7 49.3 | 49.3  | 0 | 3 | 2 | T    |
| 50   | 90.338    | 90.0 75.5 14.5 | 14.5  | 0 | 1 | 3 | T    |
| 51   | 90.526    | 90.0 0.0 90.0  | 90.0  | 0 | 4 | 0 | A    |
| 52   | 91.468    | 78.1 42.1 50.4 | 50.4  | 1 | 3 | 2 | O    |
| 53   | 92.295    | 78.2 75.8 18.6 | 18.6  | 1 | 1 | 3 | O    |
| 54   | 92.478    | 78.2 11.8 90.0 | 90.0  | 1 | 4 | 0 | T    |
| 55   | 92.815    | 35.5 60.8 71.7 | 71.7  | 4 | 2 | 1 | O    |
| 56   | 93.078    | 52.5 60.9 51.2 | 51.2  | 3 | 2 | 2 | O    |
| 57   | 93.139    | 52.5 43.2 71.8 | 71.8  | 3 | 3 | 1 | O    |
| 58   | 95.105    | 90.0 17.9 72.1 | 72.1  | 0 | 4 | 1 | T    |
| 59   | 95.278    | 66.6 90.0 23.4 | 23.4  | 2 | 0 | 3 | T    |
| 60   | 95.475    | 37.6 90.0 52.4 | 52.4  | 4 | 0 | 2 | T    |
| 61   | 96.965    | 78.8 21.0 72.5 | 72.5  | 1 | 4 | 1 | O    |
| 62   | 97.150    | 67.1 45.7 53.1 | 53.1  | 2 | 3 | 2 | O    |
| 63   | 97.929    | 67.3 76.6 26.7 | 26.7  | 2 | 1 | 3 | O    |
| 64   | 98.102    | 67.3 22.7 90.0 | 90.0  | 2 | 4 | 0 | T    |
| 65   | 98.121    | 39.6 76.7 53.5 | 53.5  | 4 | 1 | 2 | O    |
| 66   | 98.476    | 90.0 62.6 27.4 | 27.4  | 0 | 2 | 3 | T    |
| 67   | 100.274   | 79.1 63.2 29.3 | 29.3  | 1 | 2 | 3 | O    |
| 68   | 101.616   | 41.9 48.1 90.0 | 90.0  | 4 | 3 | 0 | T    |
| 69   | 102.342   | 68.3 27.8 73.4 | 73.4  | 2 | 4 | 1 | O    |
| 70   | 104.231   | 57.0 90.0 33.0 | 33.0  | 3 | 0 | 3 | T    |
| 71   | 105.483   | 69.0 64.6 34.0 | 34.0  | 2 | 2 | 3 | O    |
| 72   | 105.661   | 44.3 64.6 56.5 | 56.5  | 4 | 2 | 2 | O    |

# Plot del numero dei modi nelle diverse bande di frequenza

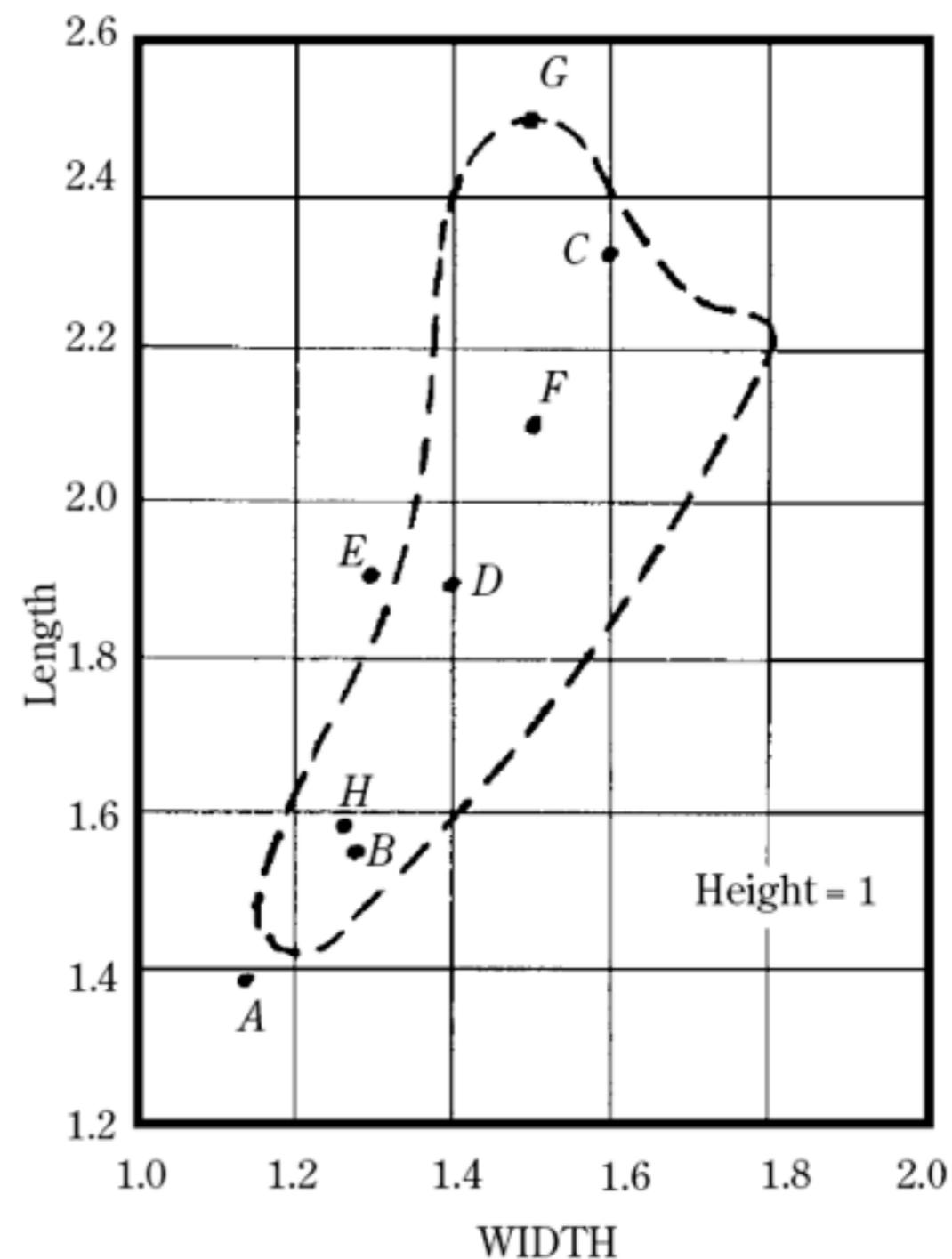
Lo step successivo è quello di studiare le dimensioni degli ambienti sulla base della distribuzione modale e quindi trovare le proporzioni migliori e degli standards

| Banda [Hz] | Modi |       |
|------------|------|-------|
| 10... 13   | 0    |       |
| 13... 16   | 0    |       |
| 16... 20   | 1    | *     |
| 20... 25   | 1    | *     |
| 25... 32   | 2    | **    |
| 32... 40   | 3    | ***   |
| 40... 50   | 5    | ***** |
| 50... 63   | 9    | ***** |
| 63... 80   | 17   | ***** |
| 80... 100  | 28   | ***** |
| 100... 125 | 32   | ***** |
| 125... 160 | 25   | ***** |
| 160... 200 | 1    | *     |

# Proporzioni per locali rettangolari

|   | Altezza | Larghezza | Lunghezza |
|---|---------|-----------|-----------|
| A | 1.00    | 1.14      | 1.39      |
| B | 1.00    | 1.29      | 1.54      |
| C | 1.00    | 1.60      | 2.33      |

Area di Bolt



# Modi per locali non rettangolari

Alle frequenze superiori, la densità modale è così elevata che le variazioni di pressione sonora rispetto ad un locale rettangolare sono piccole. L'unico vantaggio conseguito è l'eliminazione delle fluttuazioni sonore dovute ad effetti di eco.

Un locale non rettangolare non dà una distribuzione modale più regolare di quella fornita da un locale rettangolare che rispetti le proporzioni ottimali. (Ma solitamente non è così facile rispettarle...)

# Bibliografia e testi di riferimento

Donato Masci: "Parametri Fisici dell'Acustica Ambientale" tesi di Laurea in Fisica;

Angelo Farina: "La caratterizzazione acustica delle sale da spettacolo con particolare attenzione alle esigenze di ascolto della musica sinfonica" Tesi di Dottorato di Ricerca in Fisica Tecnica;

Angelo Farina: "Simultaneous measurement of impulse response and distortion with a swept-sine technique", 110th AES Convention, February 2000;

David Griesinger: "Beyond MLS - Occupied Hall Measurement With FFT Techniques" - 101st AES Convention, Nov 1996;

Alton Everest: "The Master Handbook of Acoustics" 4th ed.;

David Egan: "Architectural Acoustics";

Leo Beranek: "Concert Halls and Opera Houses - Music, Acoustics, and Architecture" 2nd ed.;

L.E. Kinsler: "Fundamentals of Acoustics" 4th ed.;

Yoichi Ando: "Architectural Acoustics";

T.J. Cox, P. D'Antonio: "Acoustic Absorbers and Diffusers - Theory, design and application" 2nd ed.;

Marshall Long: "Architectural Acoustics";

Carmine Ianniello: "L'acustica degli auditorî: arte, scienza o mito? I tempi dei teatri greci e romani";

Acustica delle Sale: dalla progettazione alla verifica (Scuola di Acustica di Ferrara, Università di Ferrara);