

STUDIO  
SOUND  
SERVICE

Innova

Lunedì 26/02/2013 - Frosinone

dott. Donato Masci  
[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.

Donato Masci - Fabrizio Giovannozzi

## 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

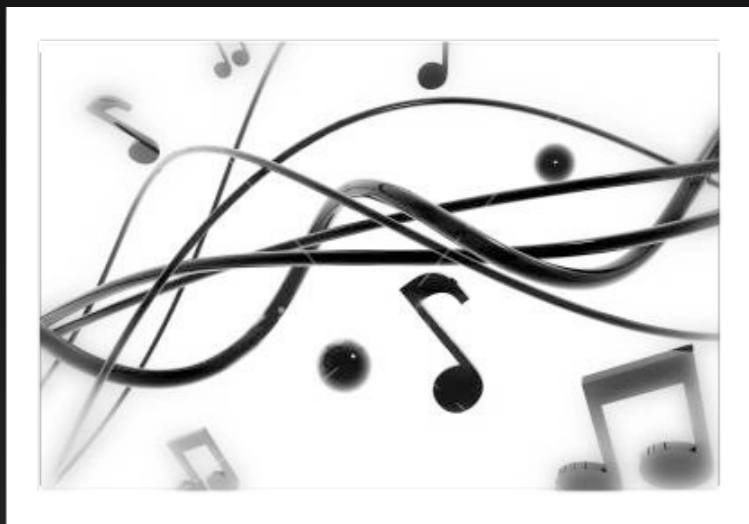
- Santuario di Maria Theotokos di Loppiano (FI) (più teatro/auditorium annesso)
- Chiesa di Santa Maria Nuova di Terranuova Bracciolini (AR) (arch. Mario Botta)
- Chiesa di San Gerardo a Monza
- Chiesa di Castiglioncello del Trinoro, Sarteano

## 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

Mezzo

Ascoltatore

*(zona di trasmissione)*

1

2

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.

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

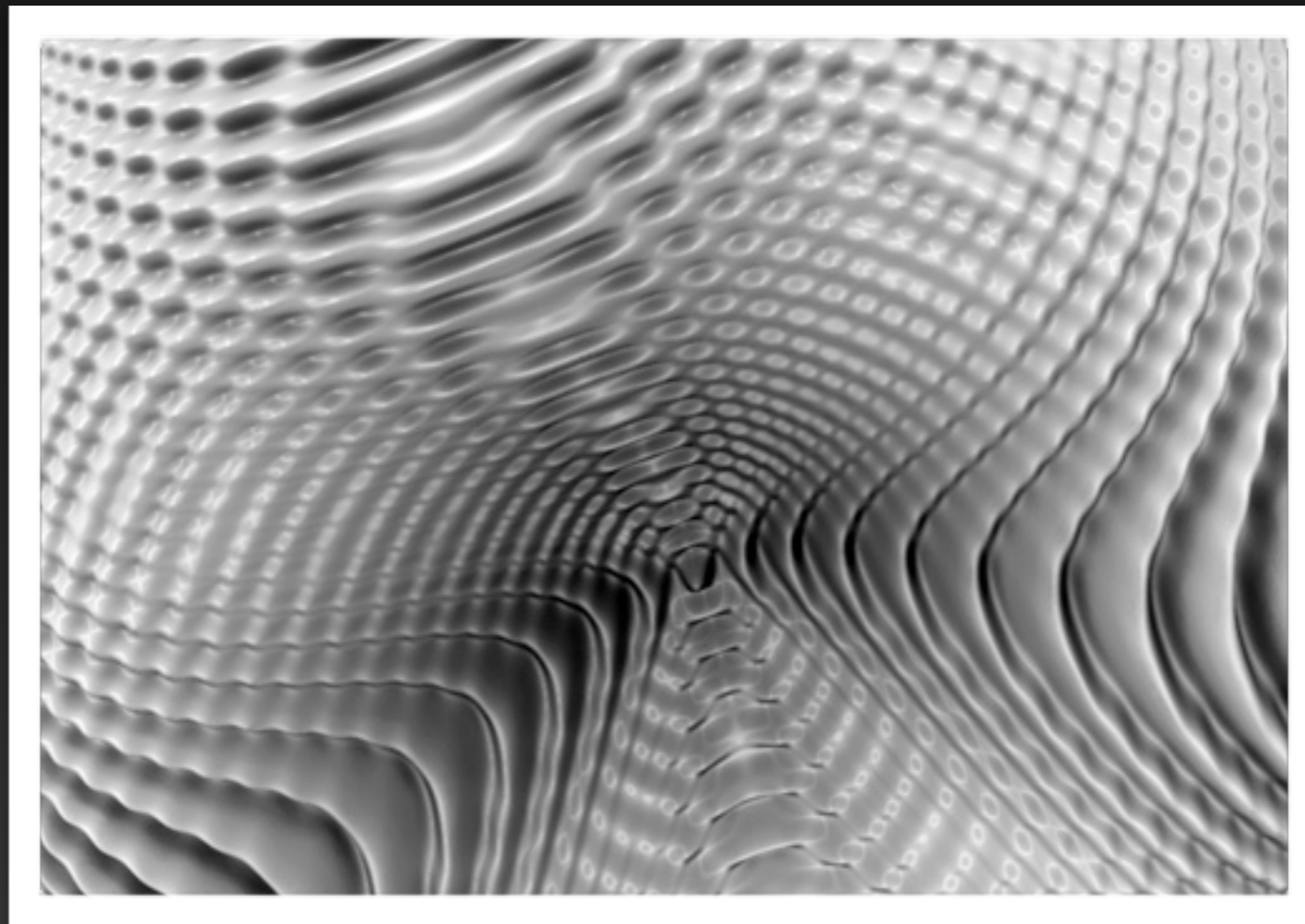


# Velocità del suono

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

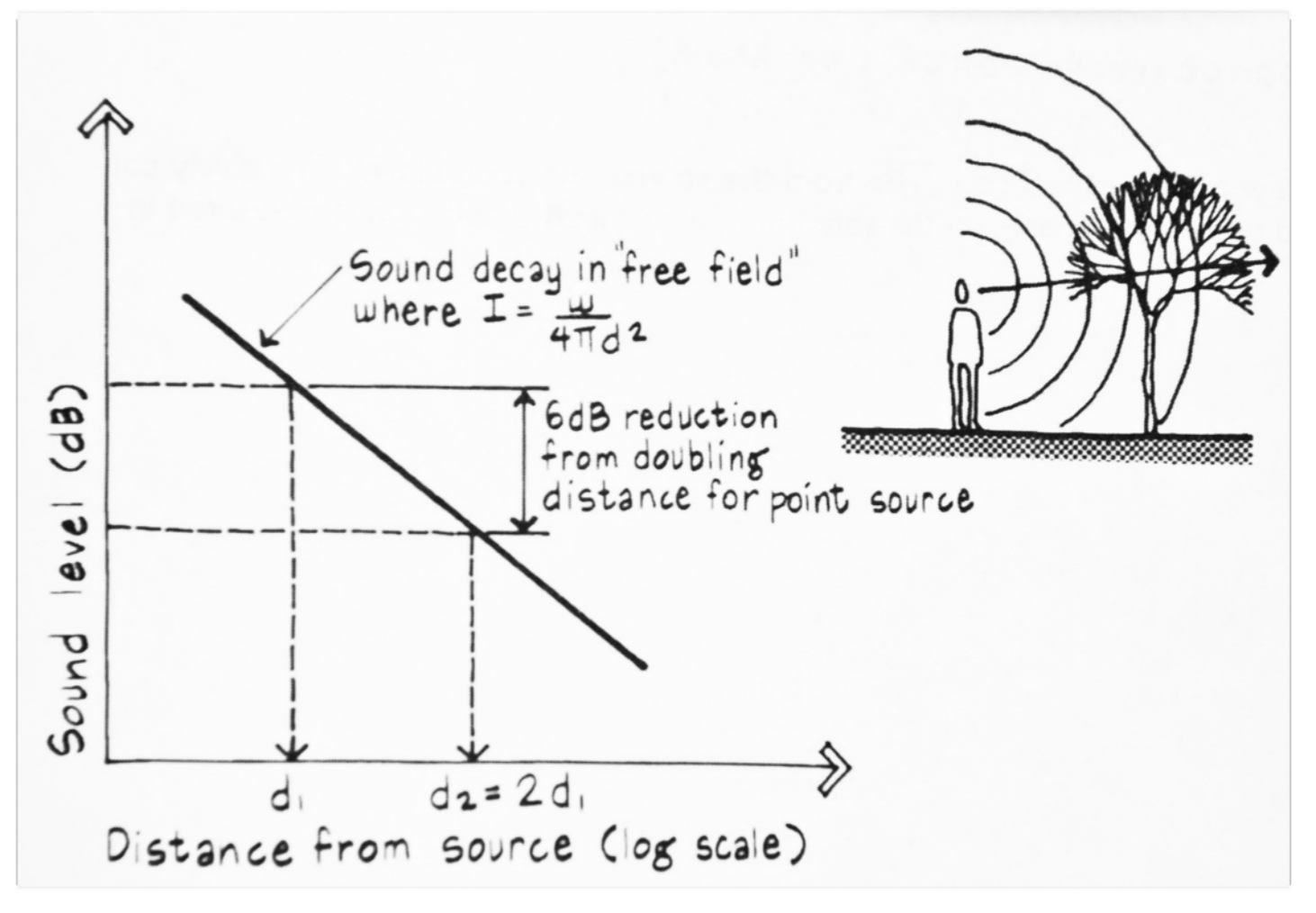
Materiali	Velocità del suono [m/s]
Aria	343
Acqua	1 480
Ghiaccio	3 200
Vetro	5 300
Acciaio	5 200
Piombo	1 200
Titanio	4 950
PVC (morbido)	80
PVC (duro)	1 700
Calcestruzzo	3 100
Faggio	3 300
Granito	6 200
Peridotite	7 700
Sabbia (asciutta)	10-300

# Propagazione del suono



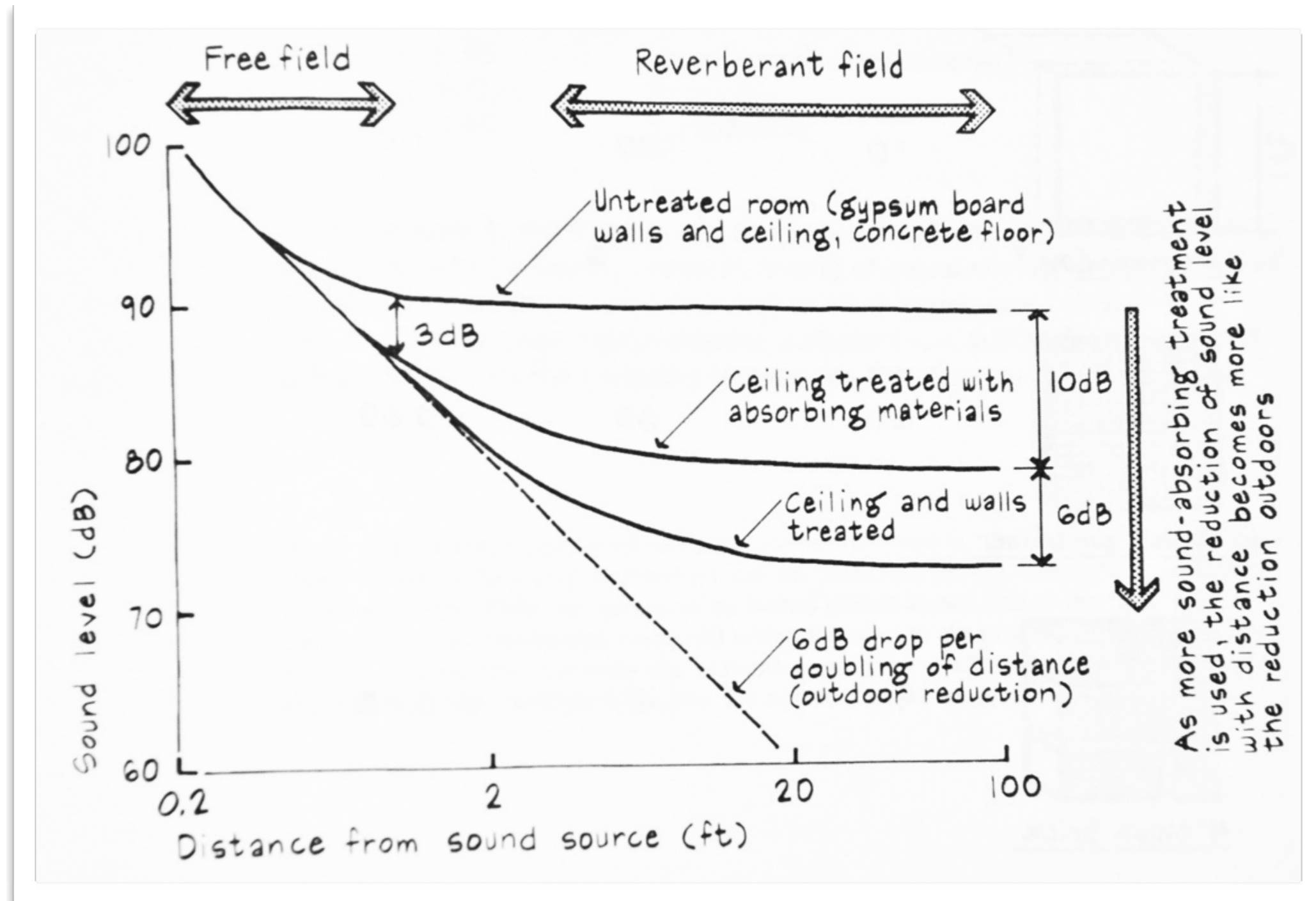
# Attenuazione del suono con la distanza in campo libero

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





# Attenuazione del suono con la distanza in un ambiente chiuso



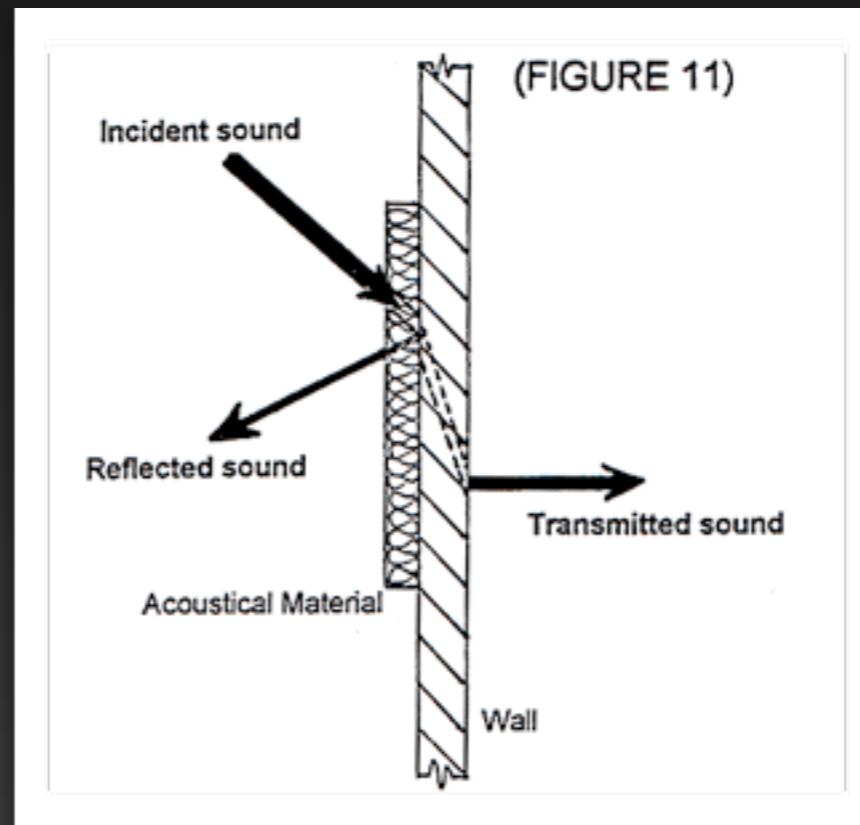
Il decadimento del suono in un ambiente chiuso dipende dalle proprietà *assorbenti*, *riflettenti* e *diffondenti* delle superfici che lo costituiscono.  
(muri, pavimenti pareti, oggetti, persone etc)

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  $r$ )



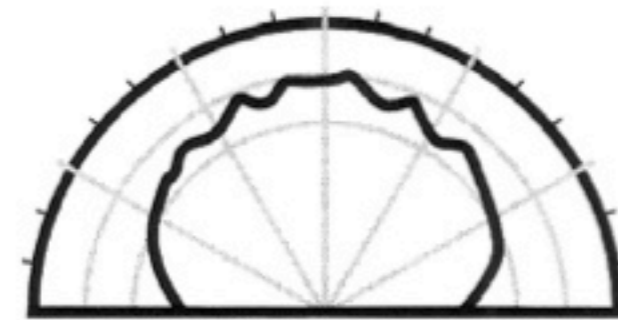
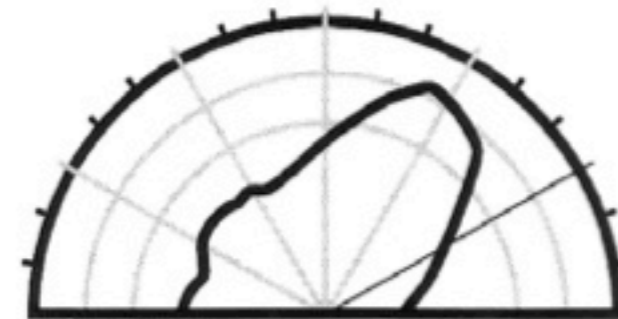
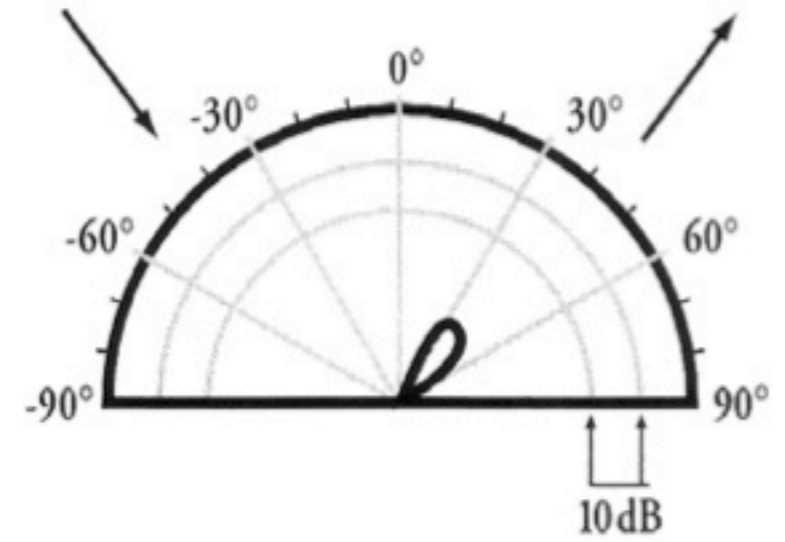
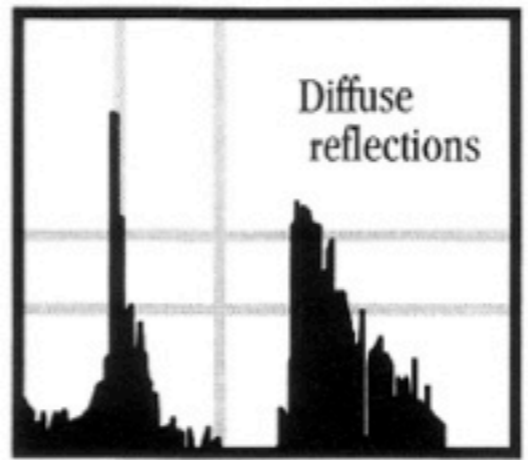
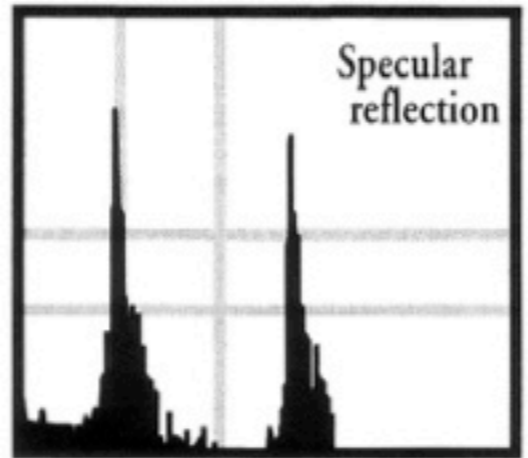
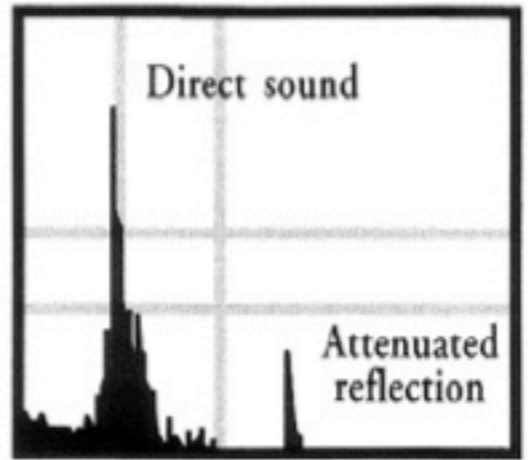
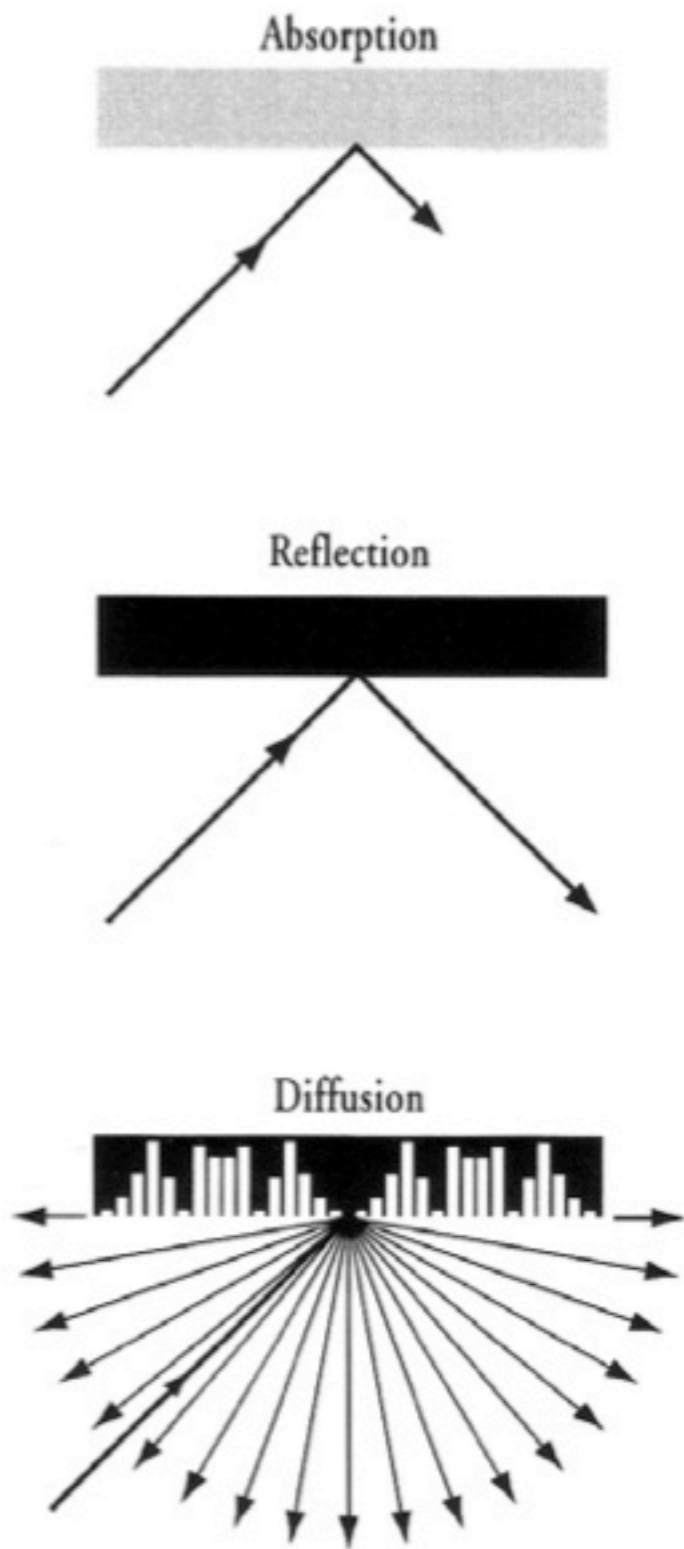
# Proprietà dei Materiali: assorbimento, riflessione e diffusione



Acoustical treatment

Temporal response

Spatial response



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

# Assorbimento acustico

Assorbimento acustico  
di una superficie:

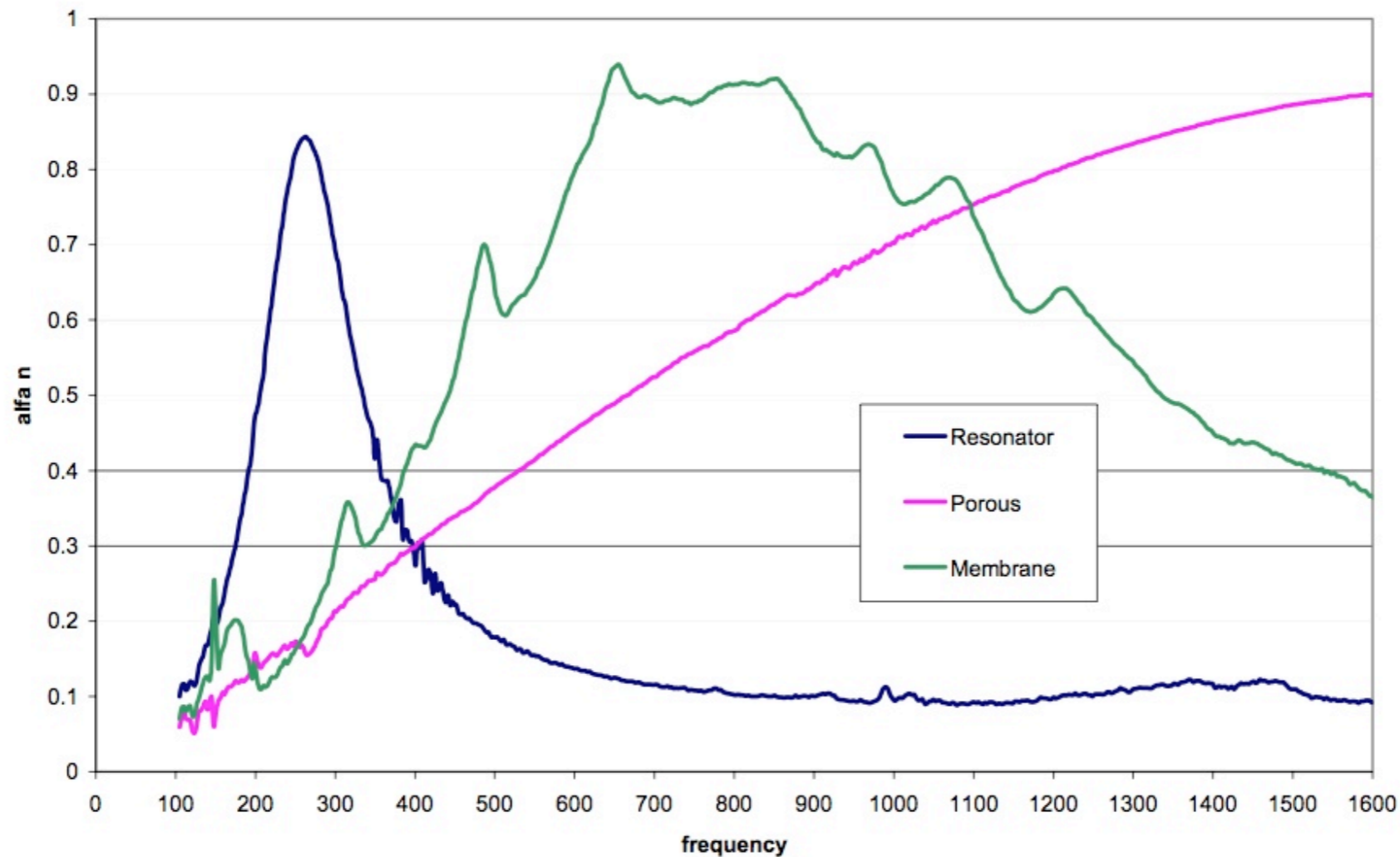
$$A = S \cdot \alpha \quad [\text{m}^2]$$

Assorbimento acustico totale di  
una stanza con n superfici:

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

# 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)

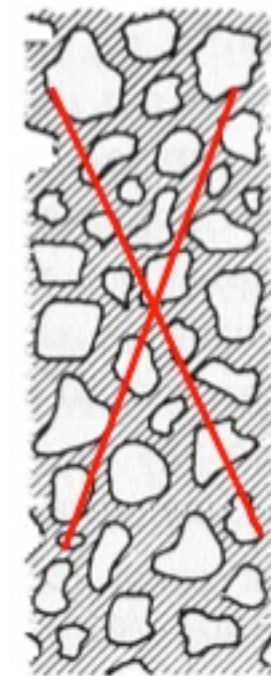


# NON SONO FONOASSORBENTI!!!

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**

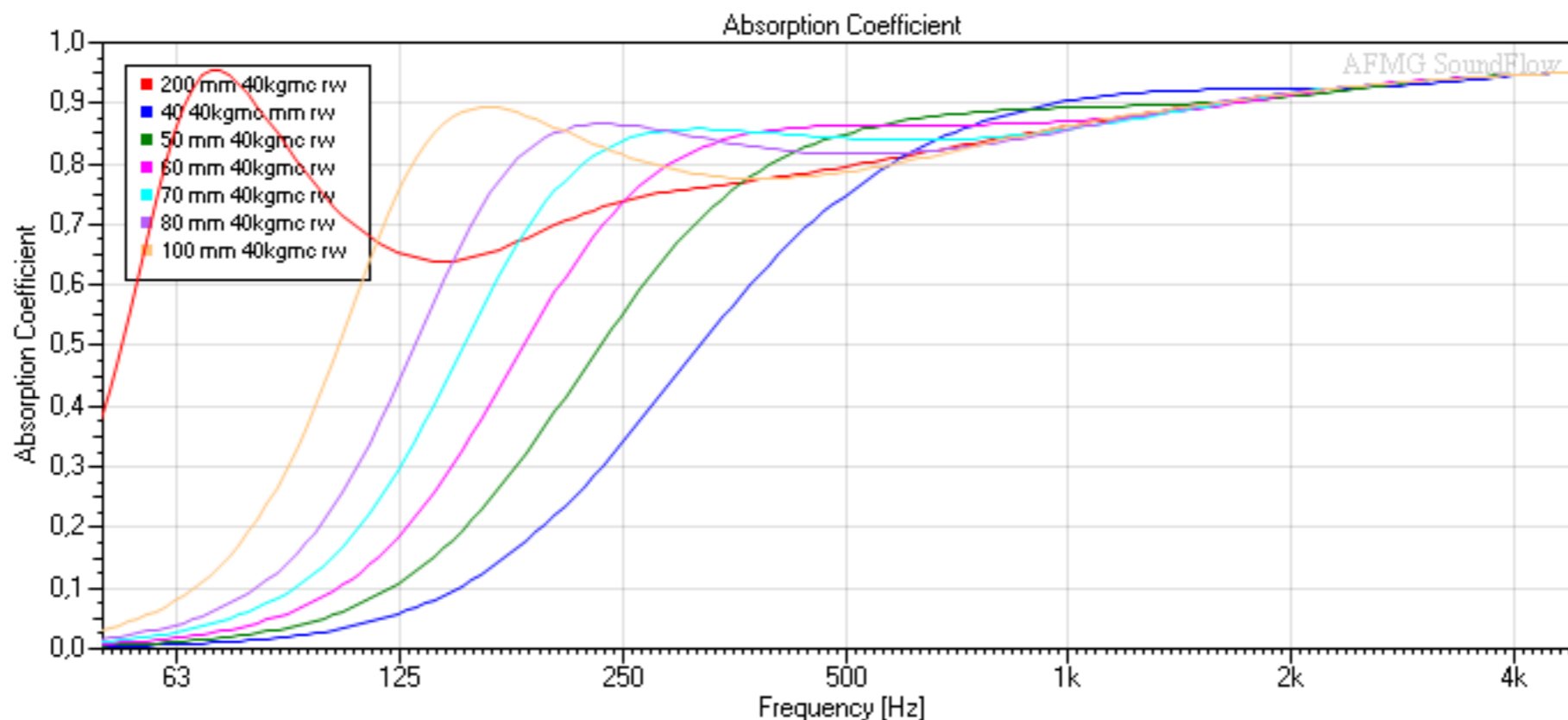


**NO**

Esempio:  
Polietilene,  
poliuretani a cella  
chiusa, polistirolo

# Effetto dello spessore nell'assorbimento

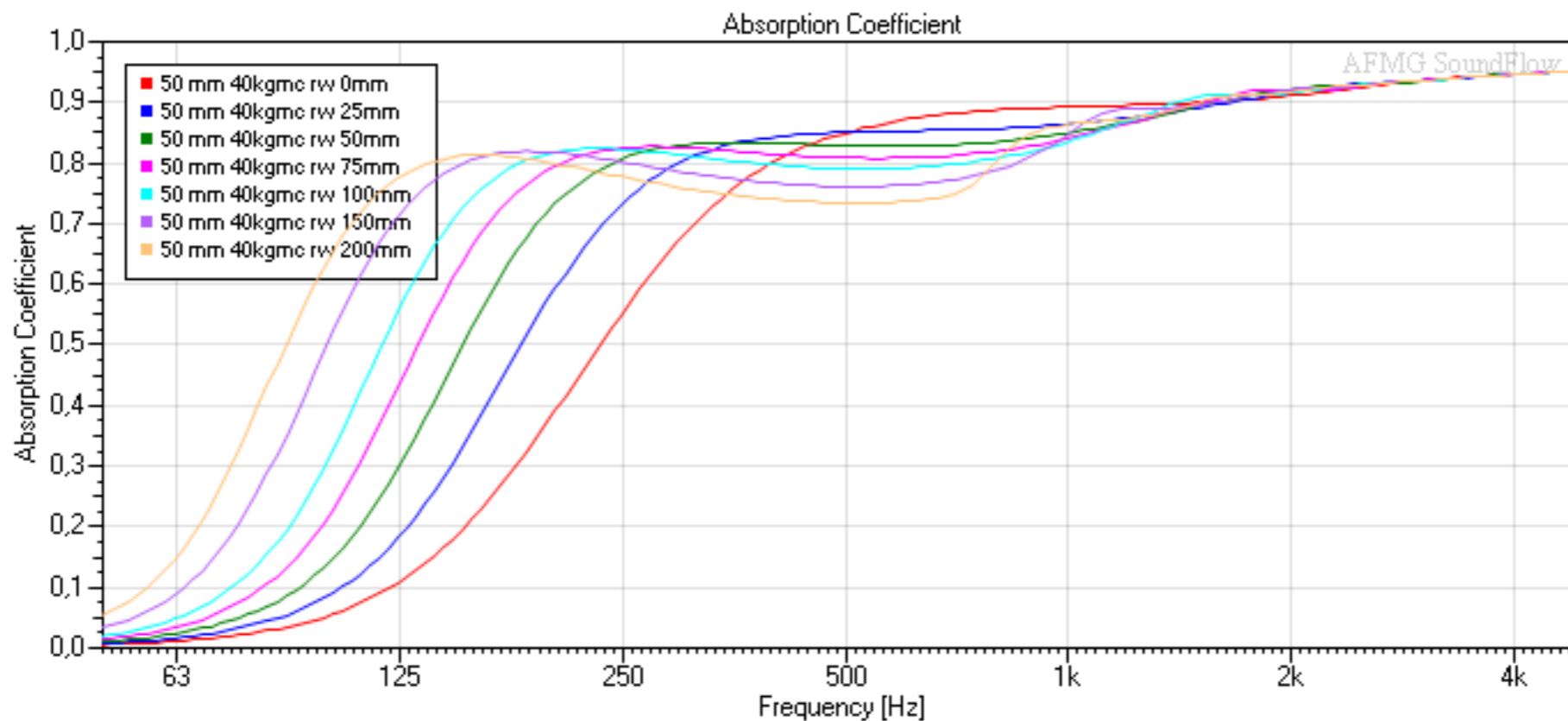
Lo spessore del materiale fonoassorbente aumenta le prestazioni di fonoassorbenza in particolar modo alle basse frequenze.



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

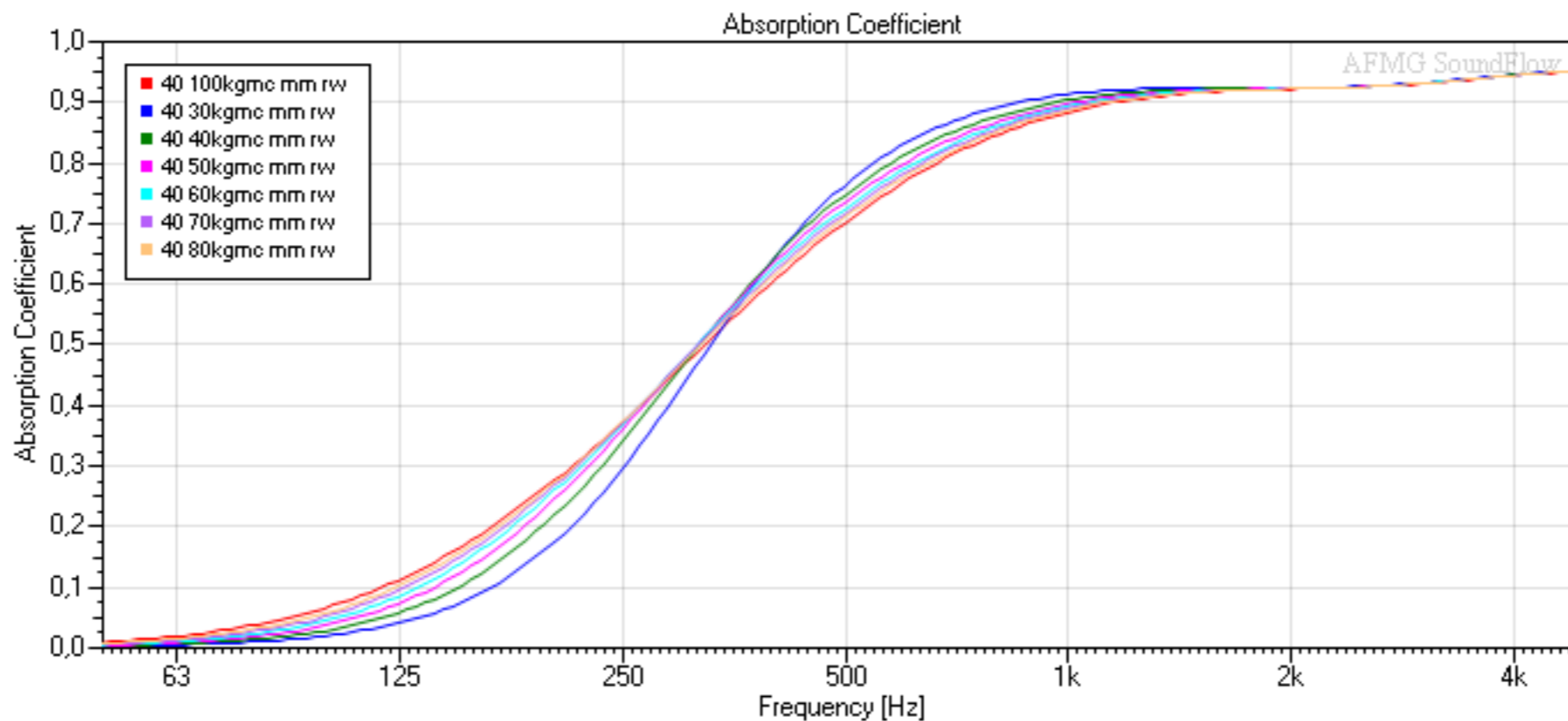
# Effetto della camera d'aria nell'assorbimento

Anche la camera d'aria posta tra il materiale e la superficie rigida aumenta le prestazioni di fonoassorbimento in particolar modo alle basse frequenze (un po' meno che lo spessore).

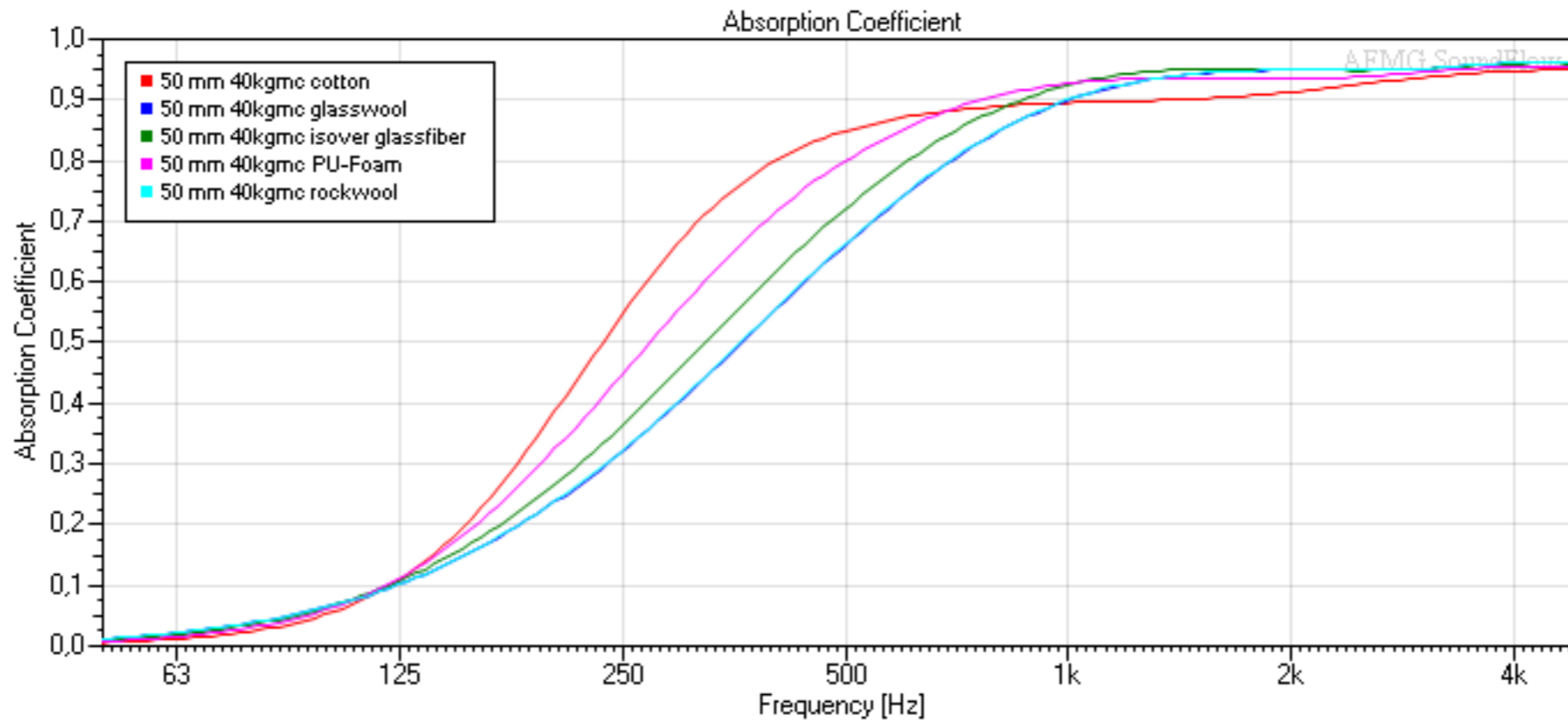


# Effetto della densità nell'assorbimento

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.



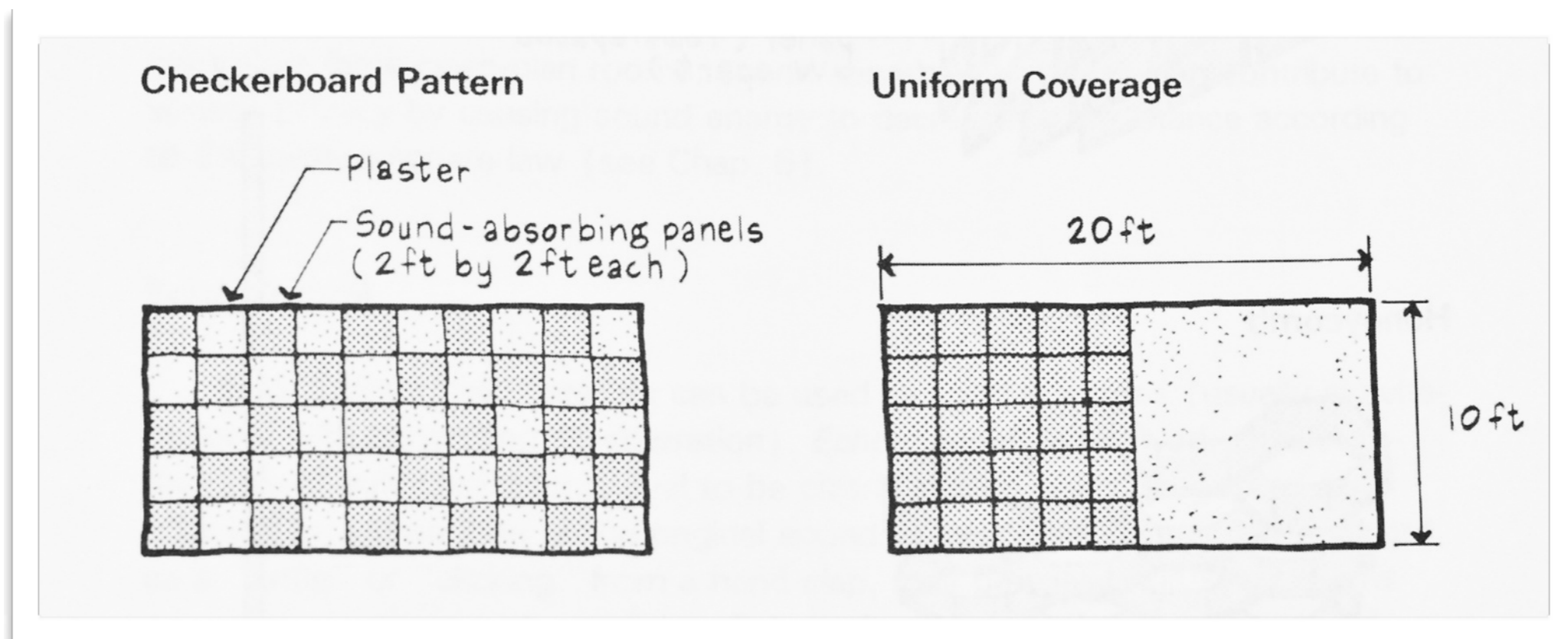
# Diversi materiali fibrosi



I coefficienti di assorbimento a parità di densità dipendono dalla grandezza delle fibre dei materiali. I coefficienti comunque non cambiano considerevolmente da materiale a materiale.

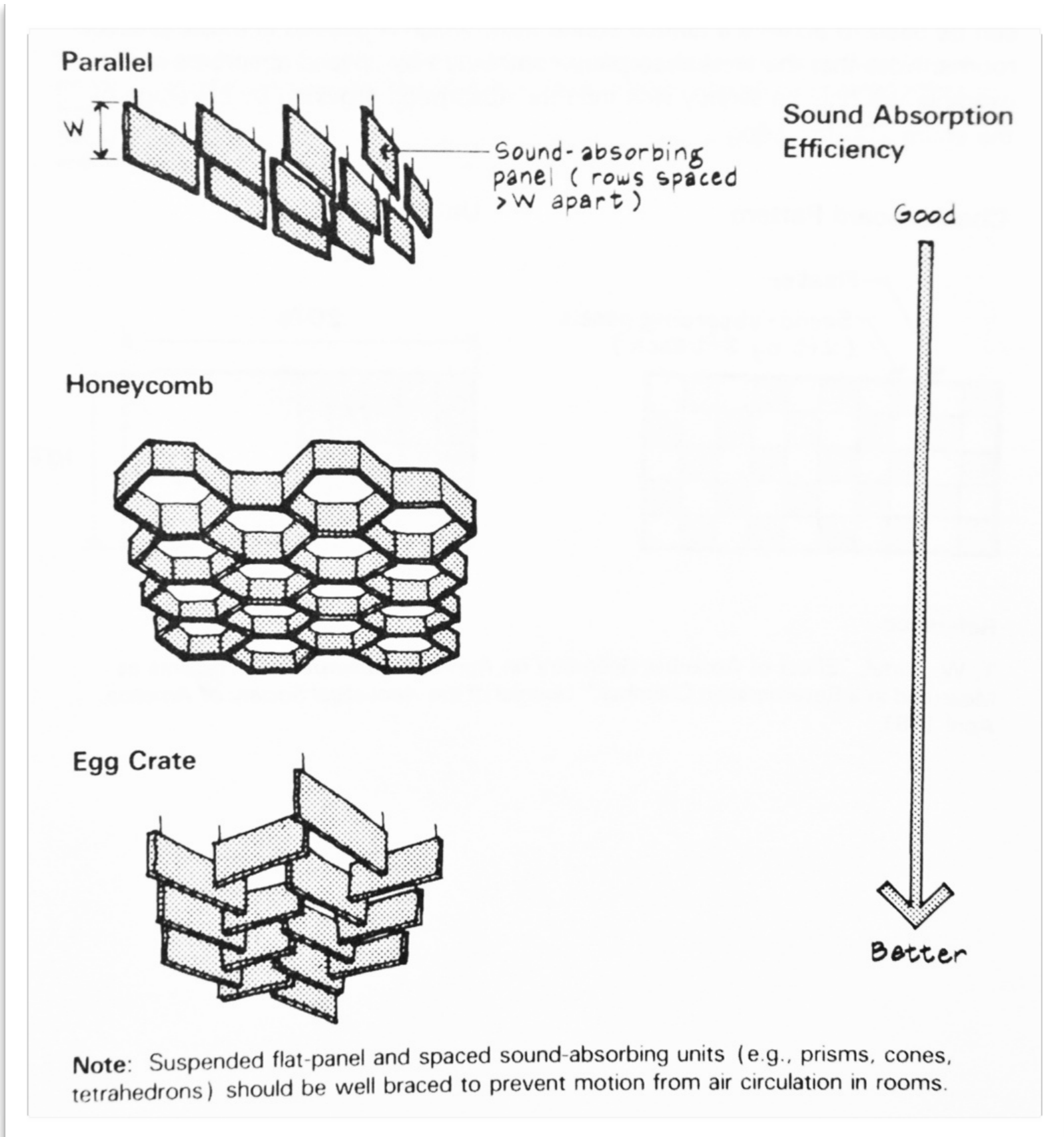


# “Area Effect”



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 spazati tra loro e all'assorbimento aggiuntivo 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.



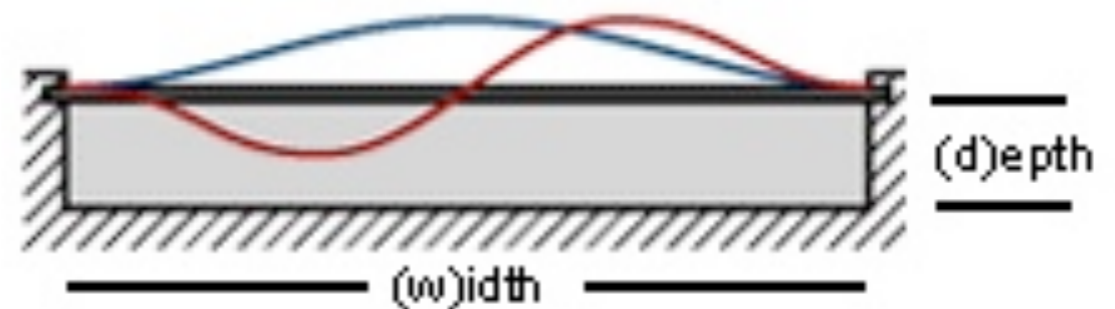
# 2. Assorbitori a membrana

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.

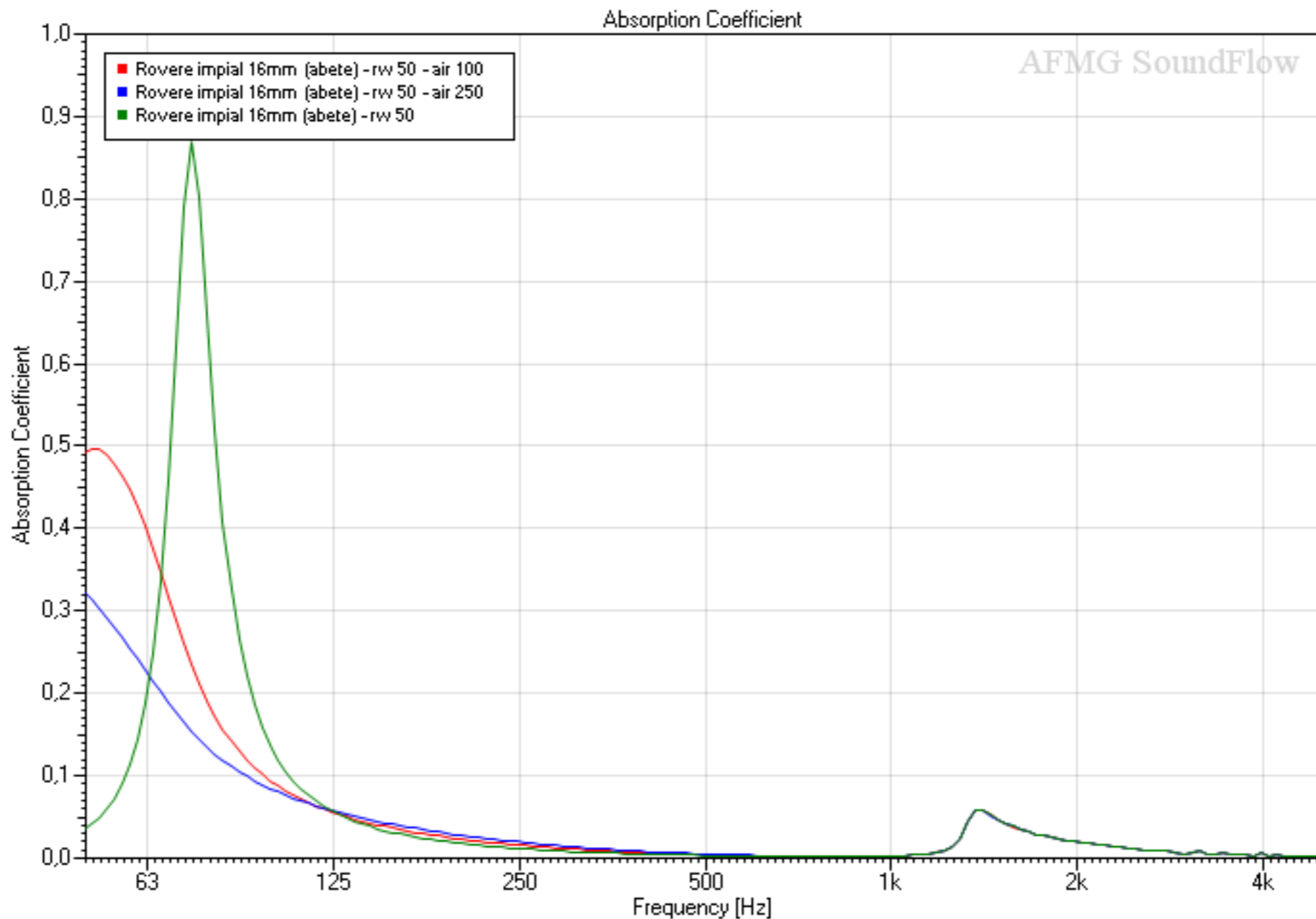
$$f_0 = \frac{62}{\sqrt{\rho_A \cdot d}}$$

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

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







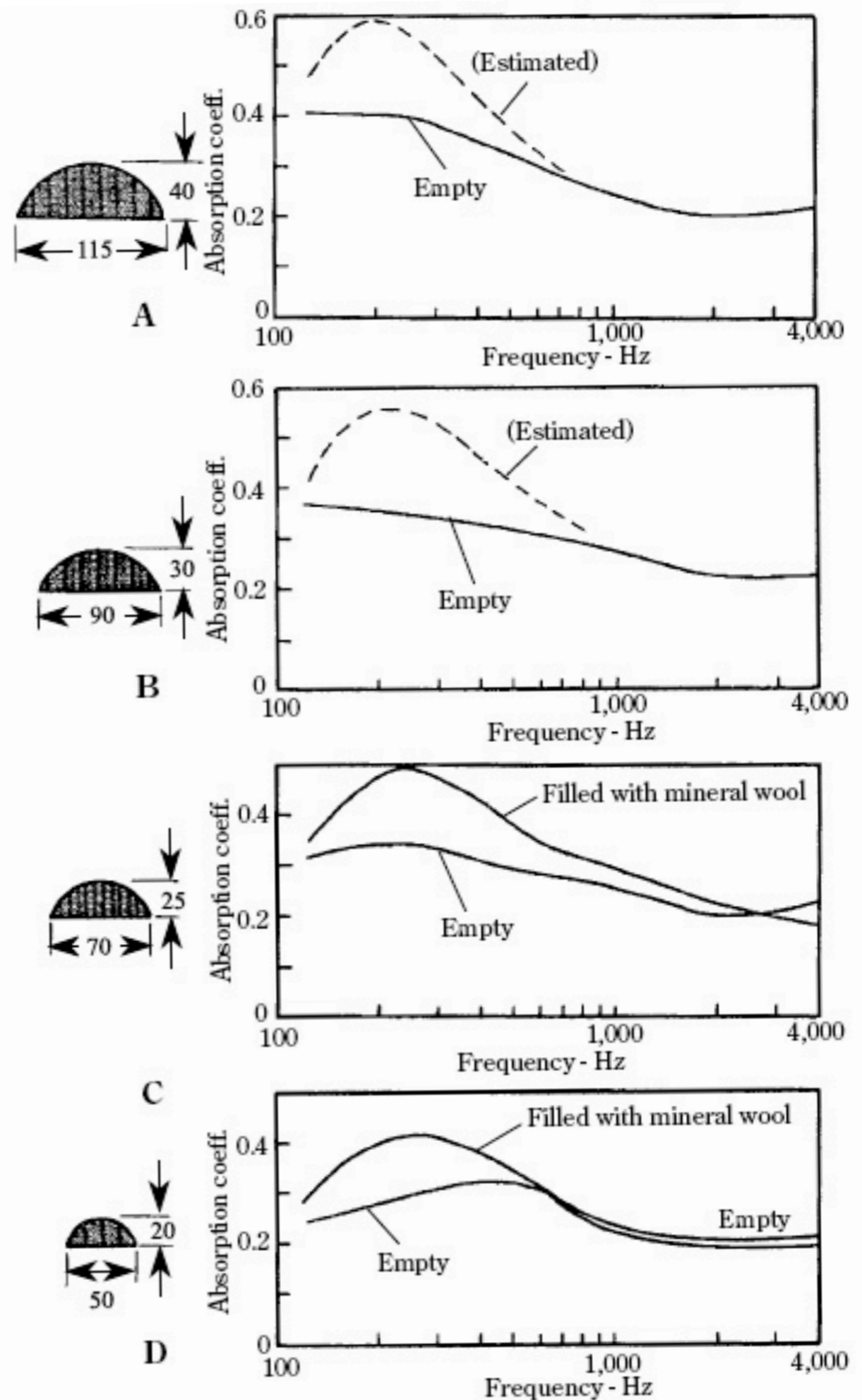
Tre diversi pannelli risonanti in rovere impiallacciato su abete: nella legenda il primo numero indica lo spessore in mm del pannello, la sigla rw indica la lana di roccia e il suo spessore e la sigla air indica la camera d'aria e il suo spessore.

# 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

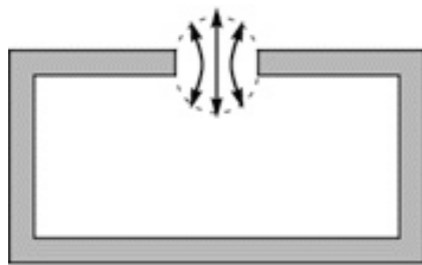


# 3. Assorbitori per Risonanza

- 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

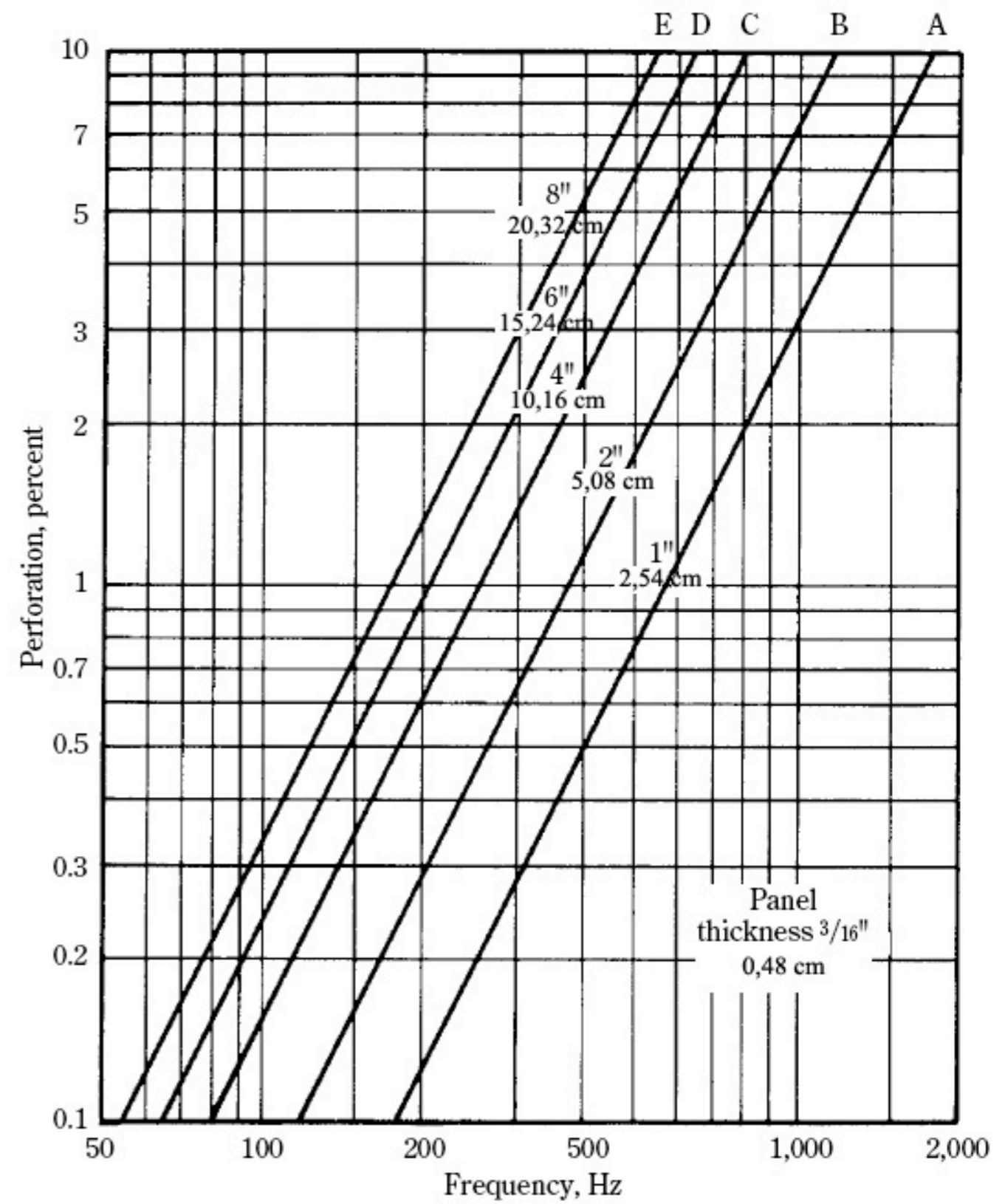
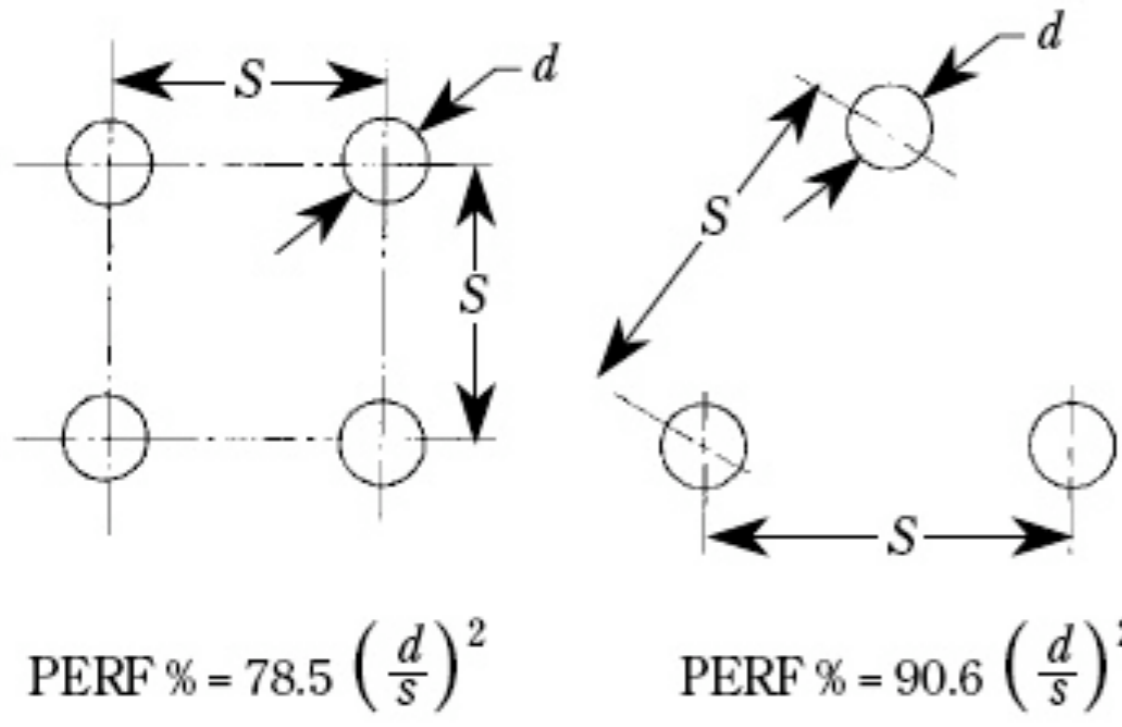
- Possiamo vedere questa struttura come un sistema di risonatori accoppiati.
- Se il suono giunge perpendicolare al pannello perforato, tutti i piccoli risonatori sono in fase. Per le onde sonore che arrivano dal lato, l'assorbimento è meno efficiente. Questa perdita può essere minimizzata sezionando 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



# Assorbitori a Stecche

- La massa dell'aria negli slot 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]

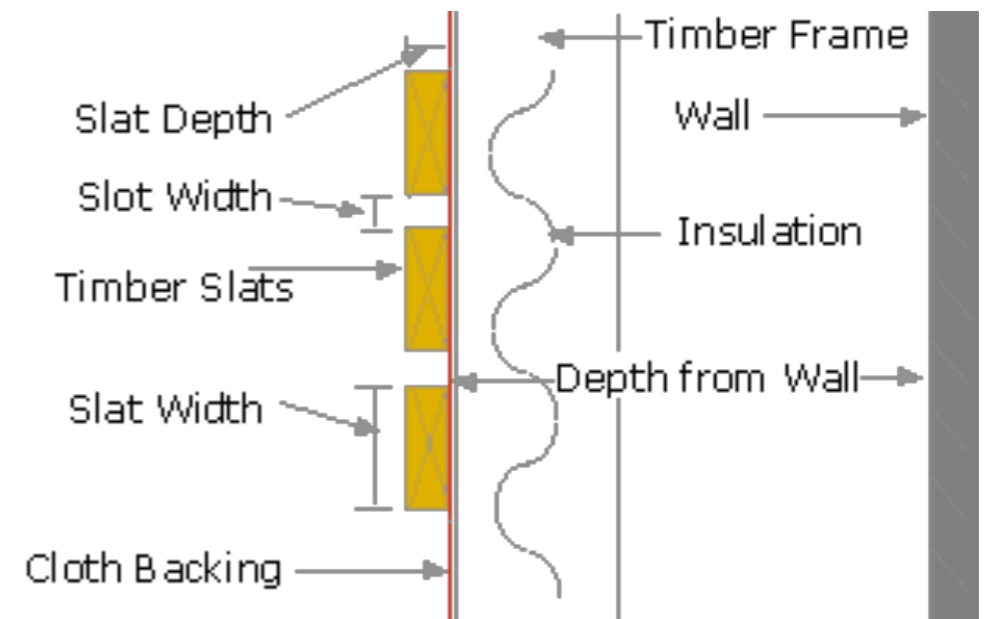
1.2 = mouth correction [cm]

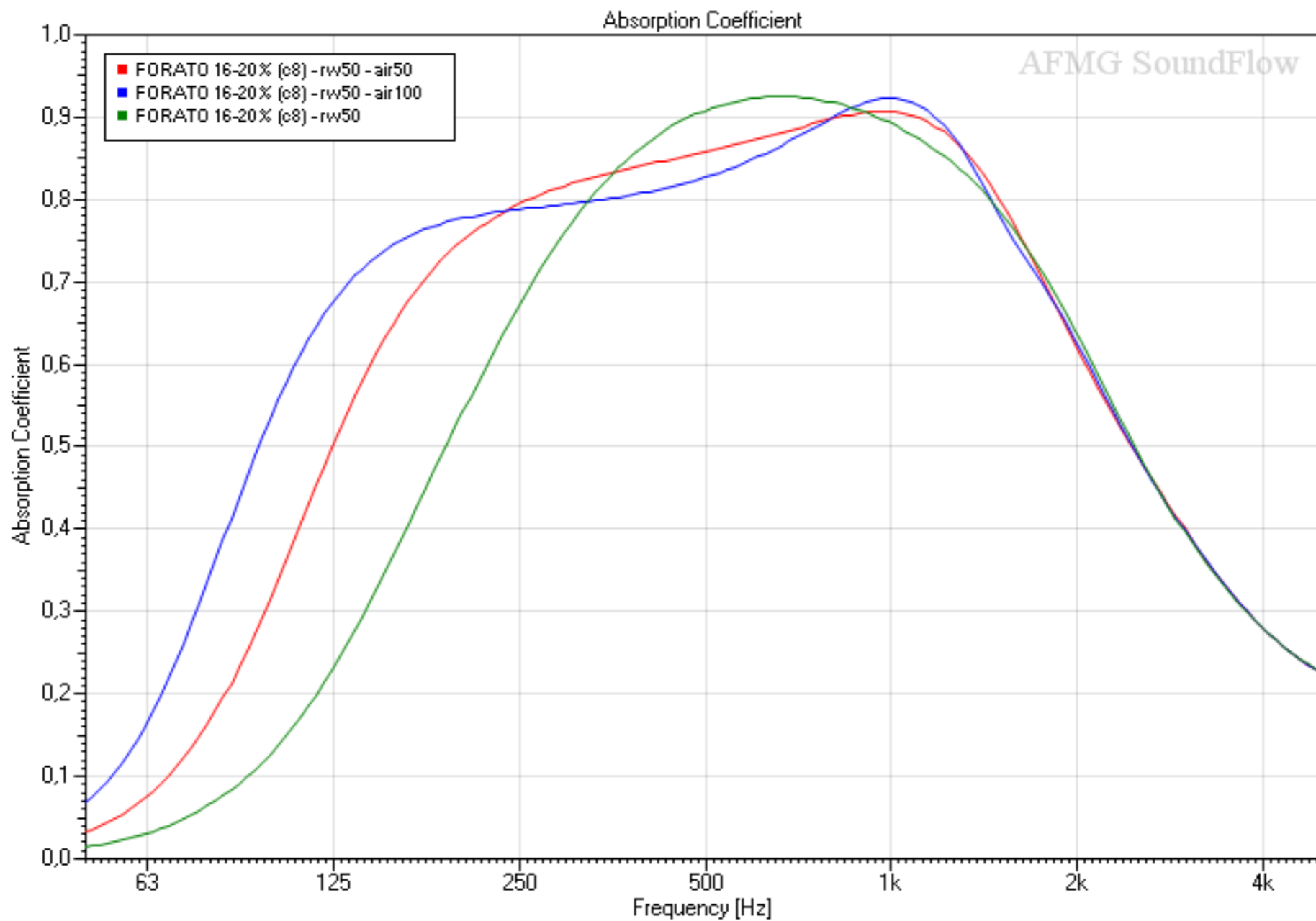
$D$  = cavity depth [cm]

$w$  = slat width [cm]

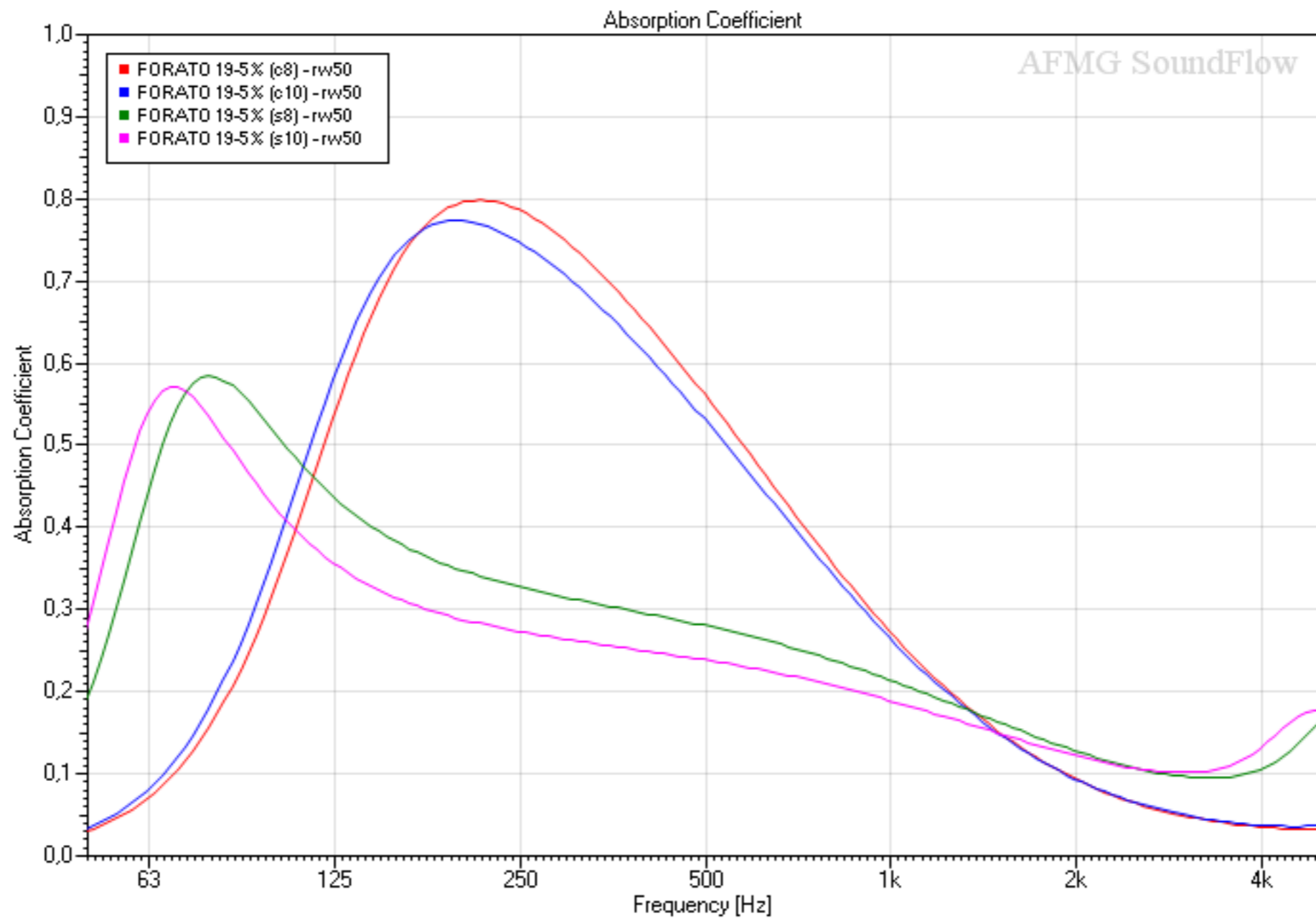
5469 =  $c/(2*\pi)$

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



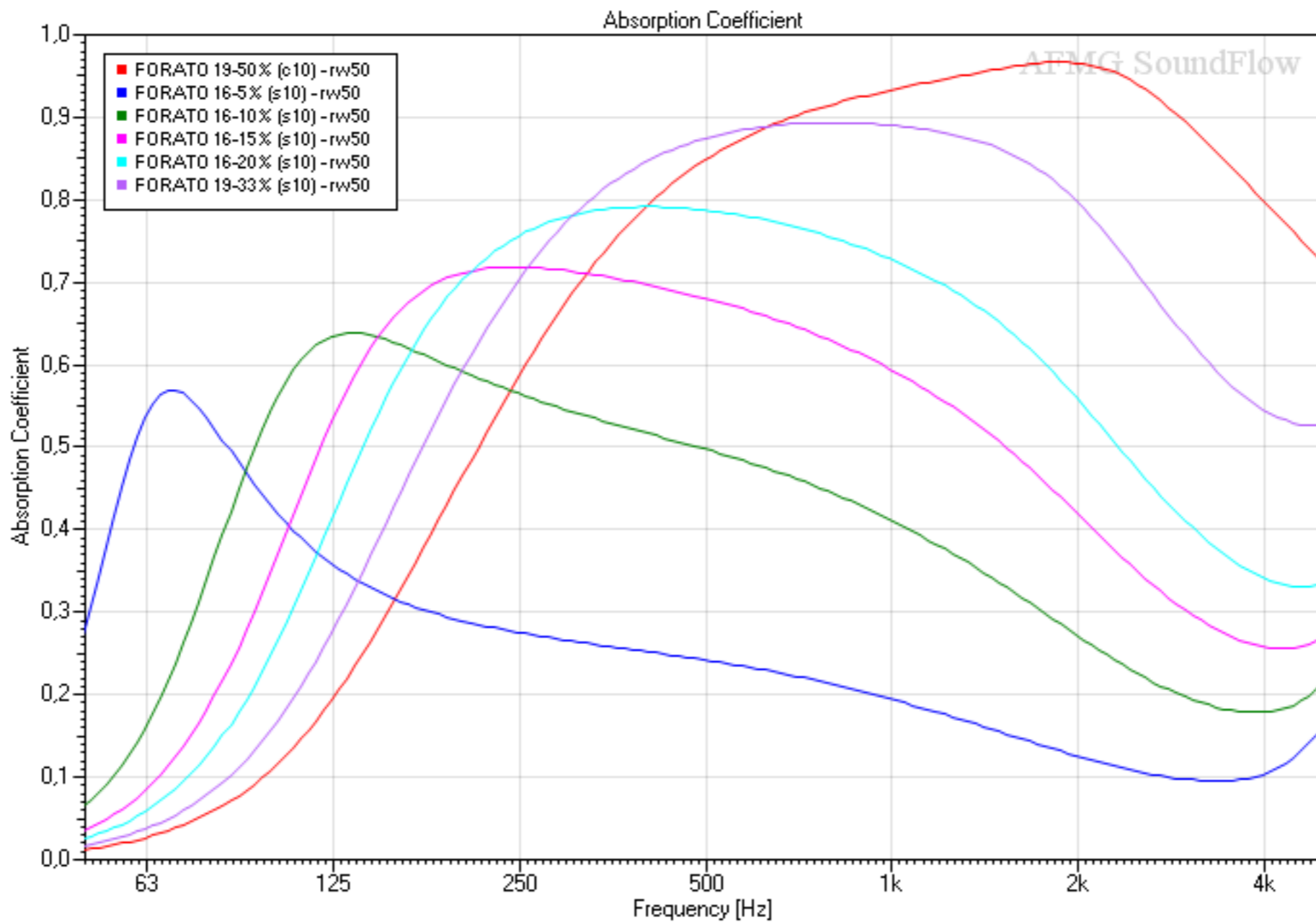


Tre diversi pannelli forati risonanti di stesso spessore (16 mm) e % e tipo di foratura (20% a stecche), montaggio diverso: la sigla rw indica la lana di roccia e il suo spessore e la sigla air indica la camera d'aria e il suo spessore.



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:



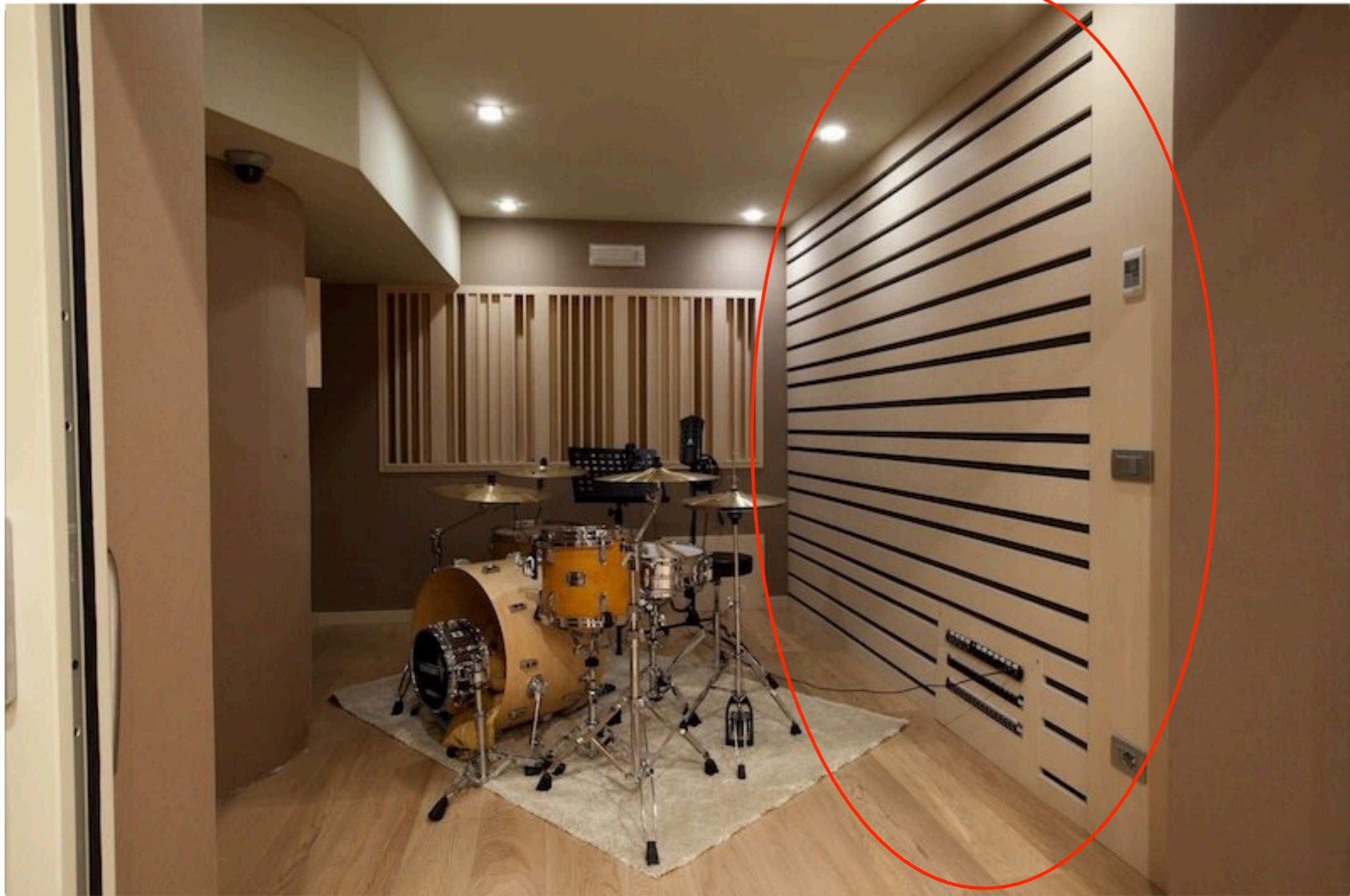


# Esempi di assorbitori a stecche:



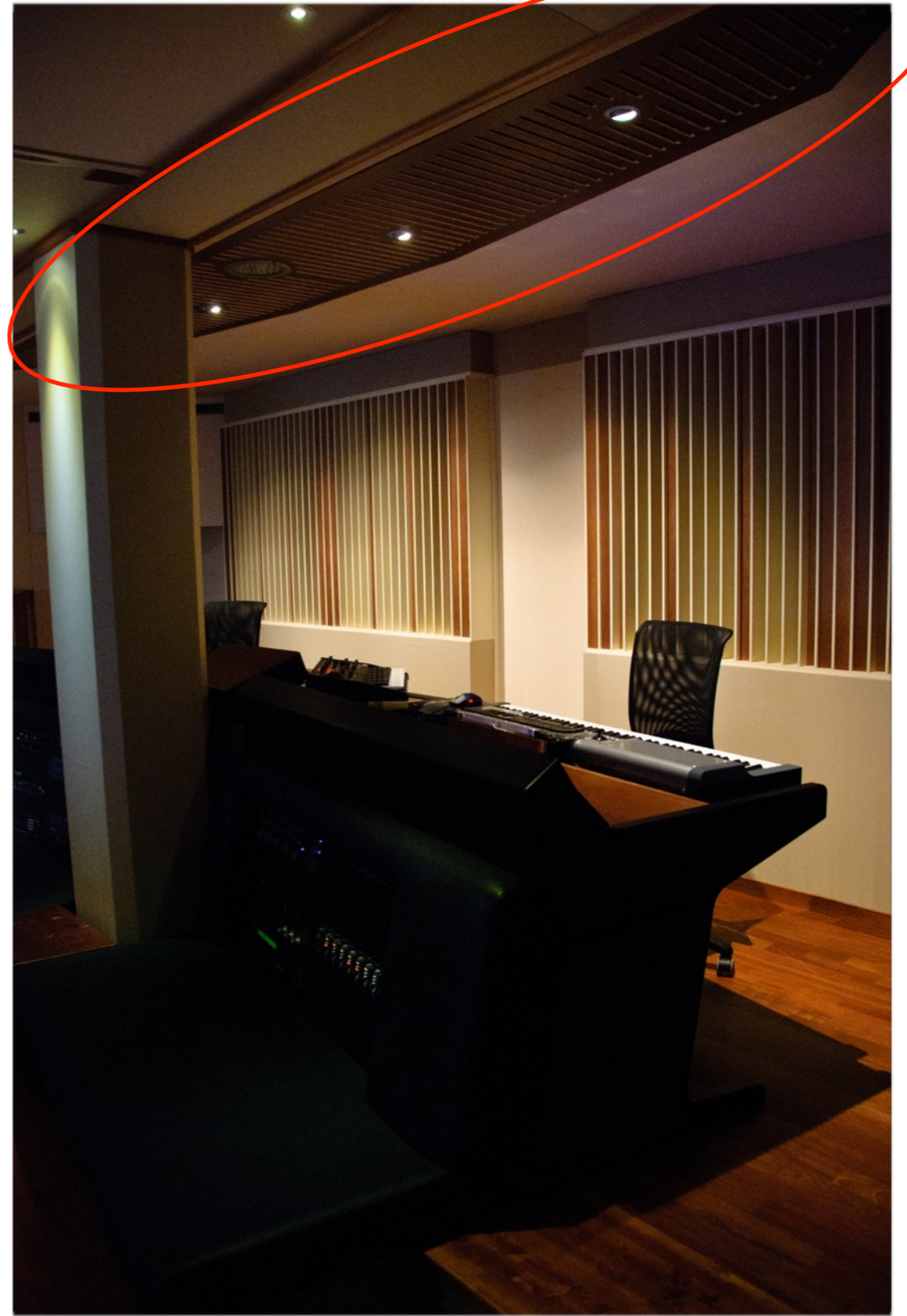


# Esempi di assorbitori a stecche:





# Esempi di assorbitori forati e a stecche:



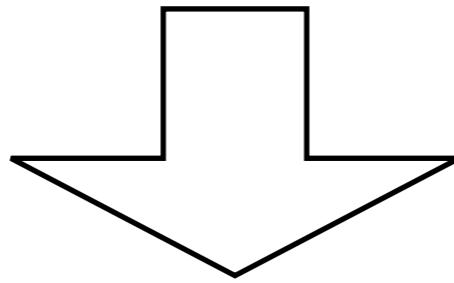


# Esempi di assorbitori forati e a stecche:



# Onde Acustiche

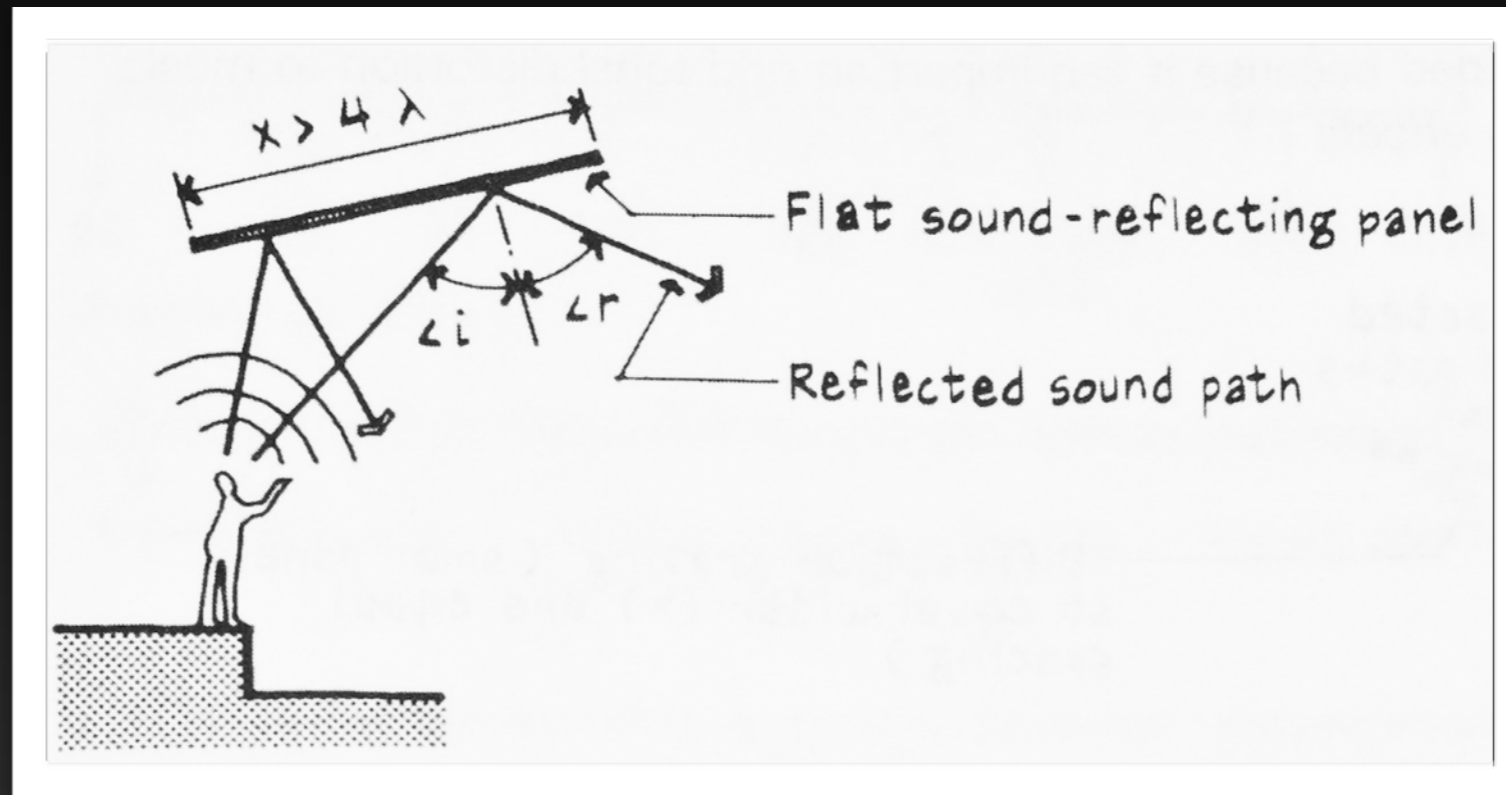
Il suono è un fenomeno di tipo ondulatorio



è soggetto ai tipici comportamenti ondulatori:

Riflessione  
Rifrazione  
Diffrazione  
Interferenza

# Riflessione acustica

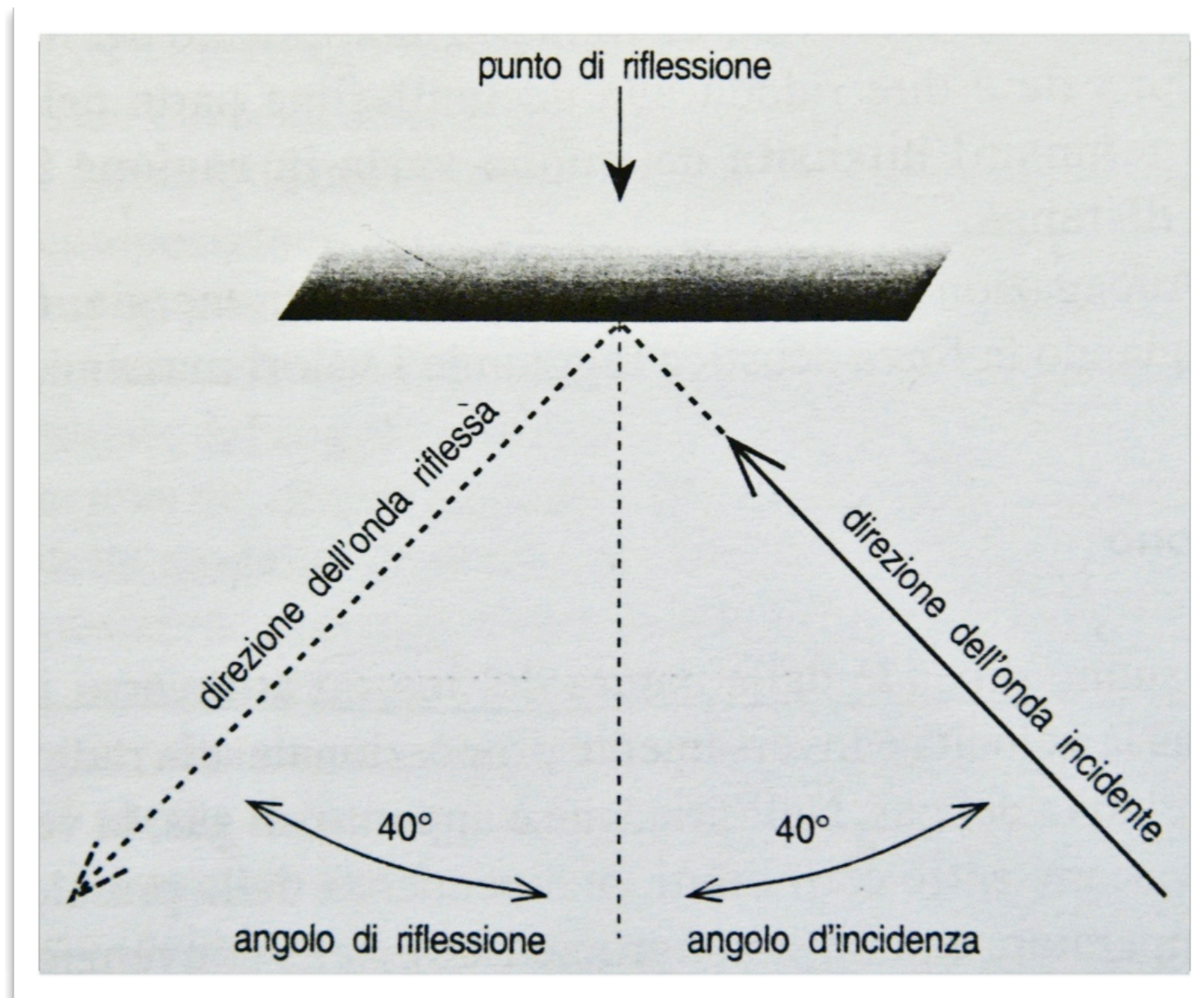


Se la dimensione della superficie  $x$  è circa 2÷4 volte la lunghezza d'onda incidente  $\lambda$ , allora l'angolo di incidenza  $i$  è uguale all'angolo di riflessione  $r$ .

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.

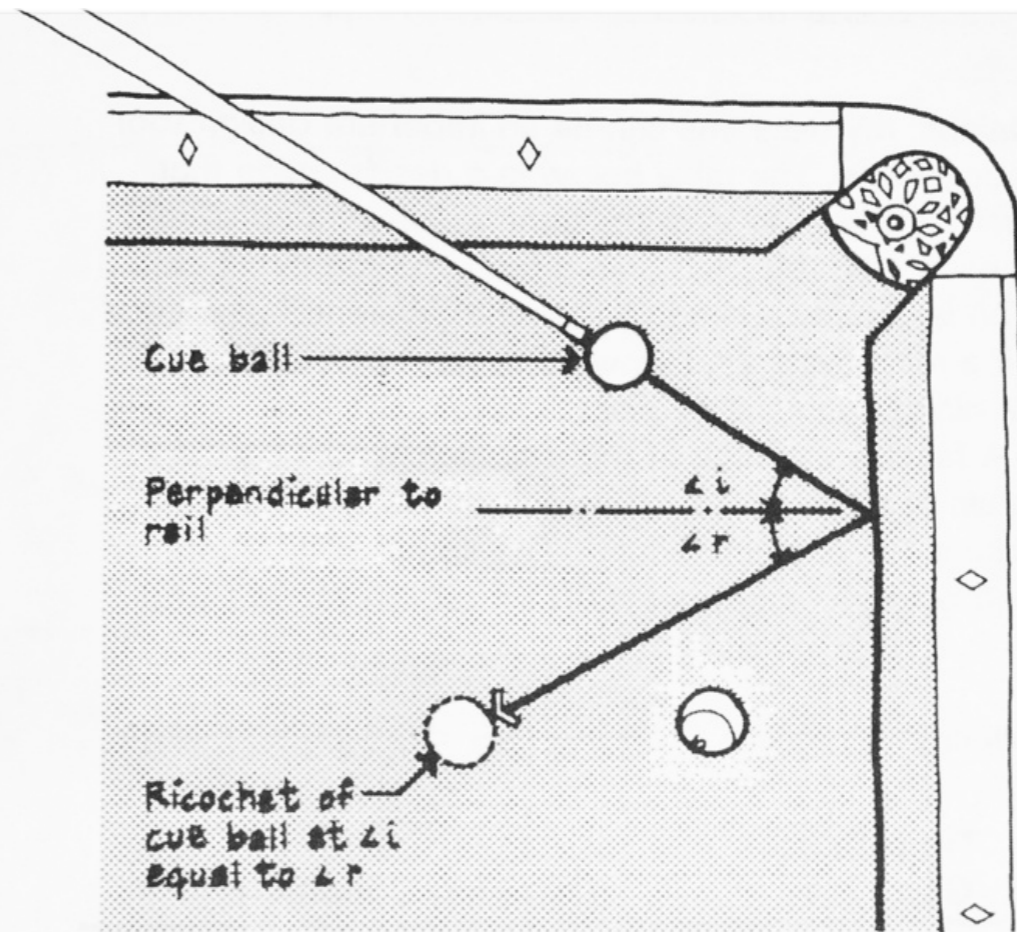


Quando un sistema di onde sonore incontra un corpo incapace di vibrare le onde riflettono con una norma che è comune a tutti i fenomeni del genere e secondo la quale l'angolo d'incidenza è uguale a quello di riflessione:

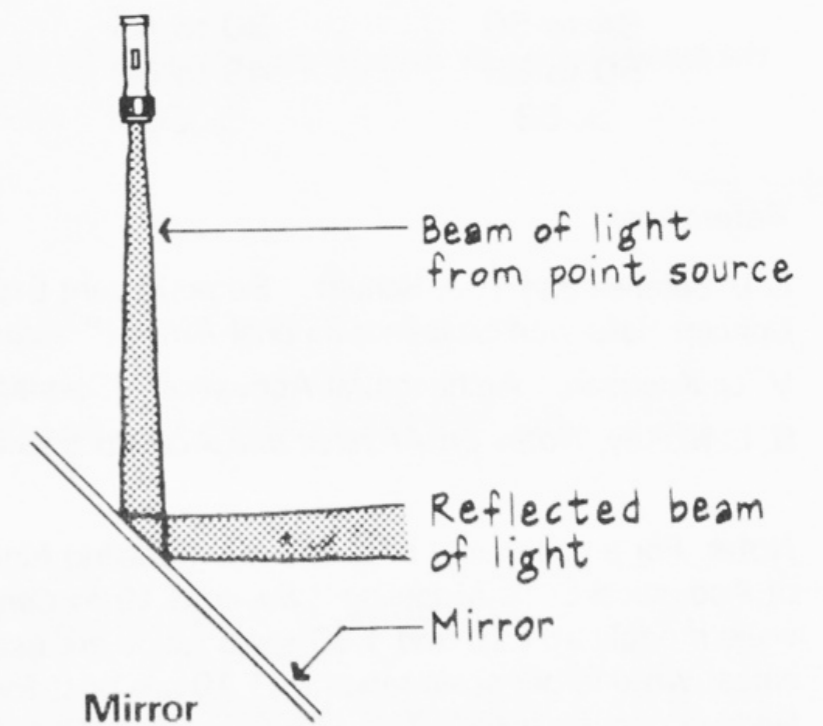


Dalle caratteristiche della superficie riflettente, dipende l'intensità e la qualità della riflessione. In ogni caso, la parte di energia che non viene riflessa è assorbita oppure rifratta.

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



Billiard Table

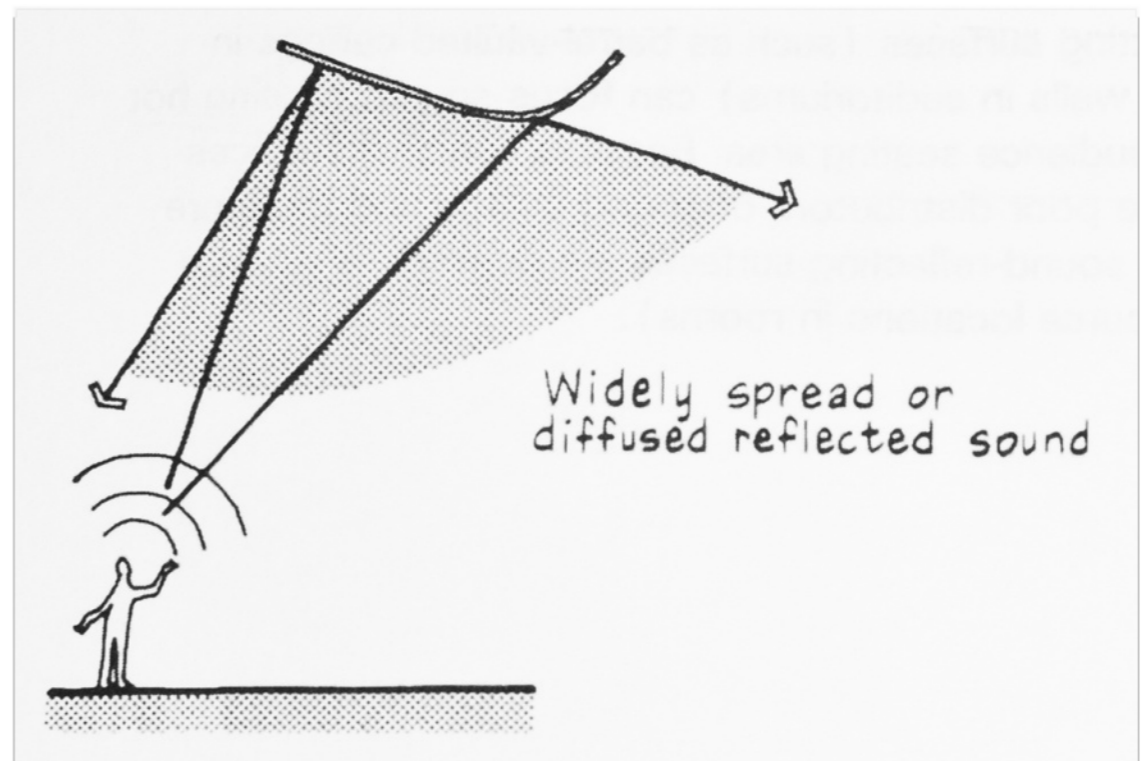
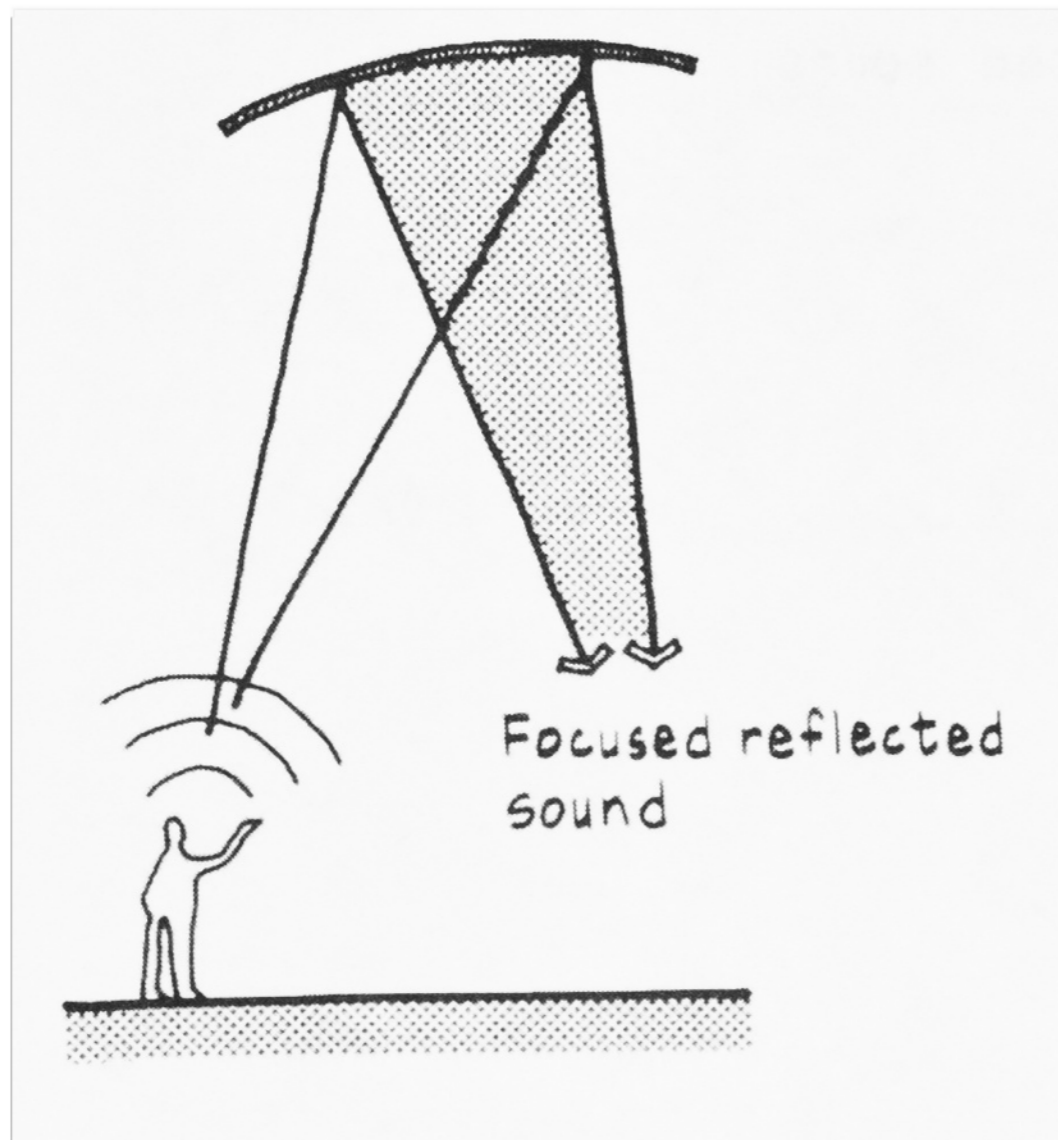
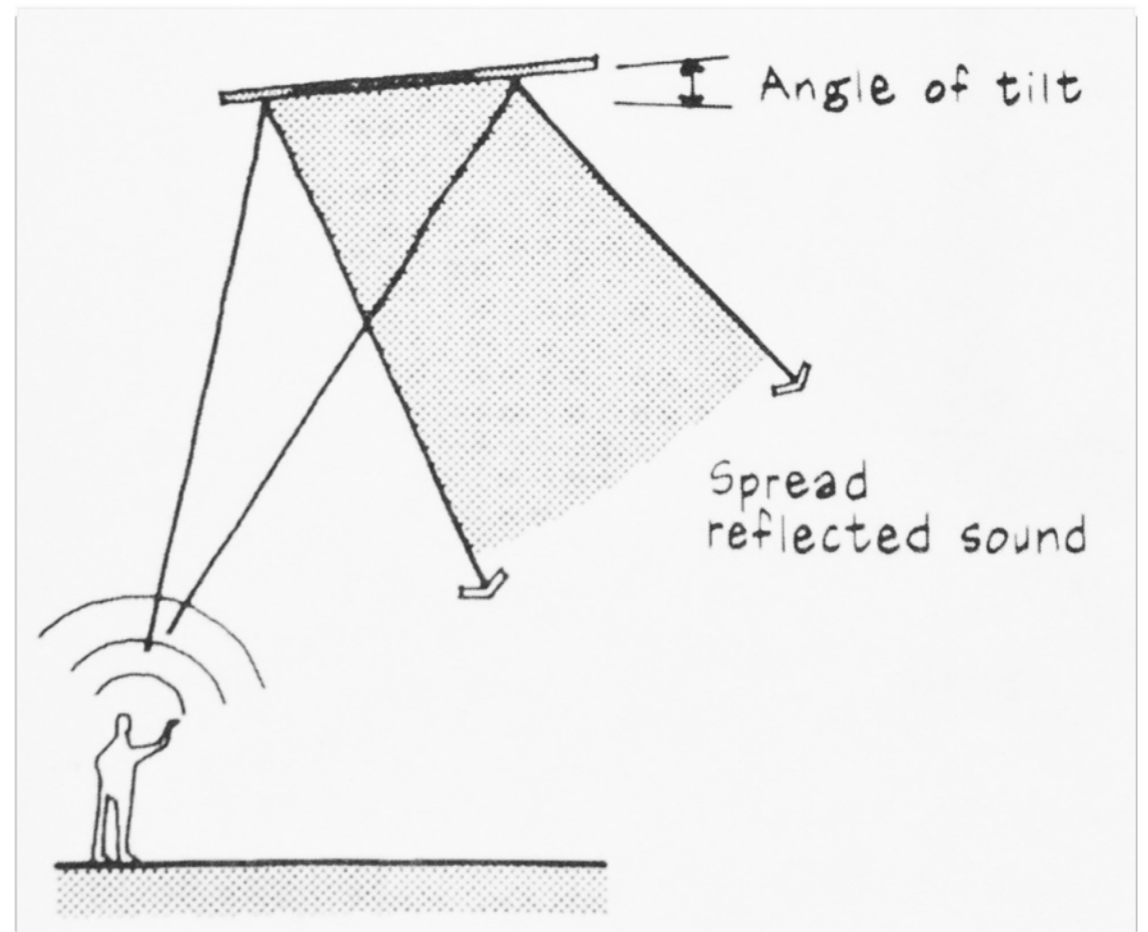




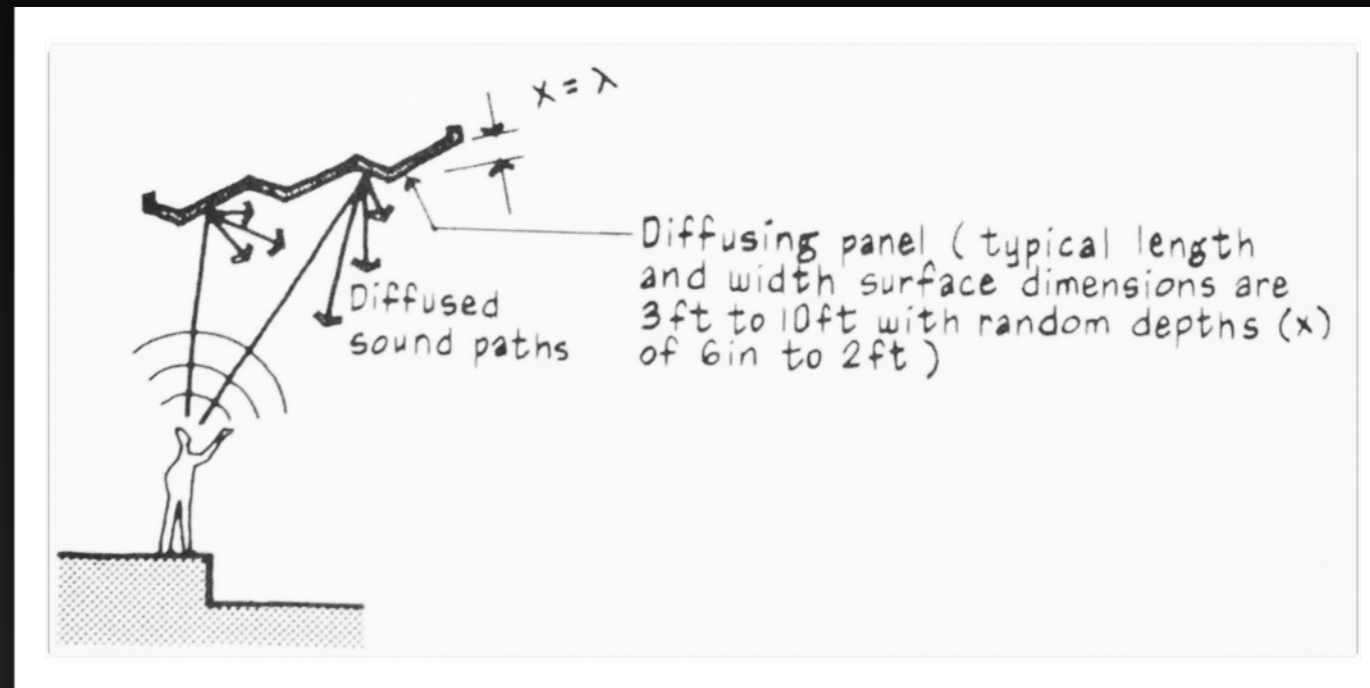
La riflessione speculare è molto utile per indirizzare le riflessioni dove vogliamo noi.

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

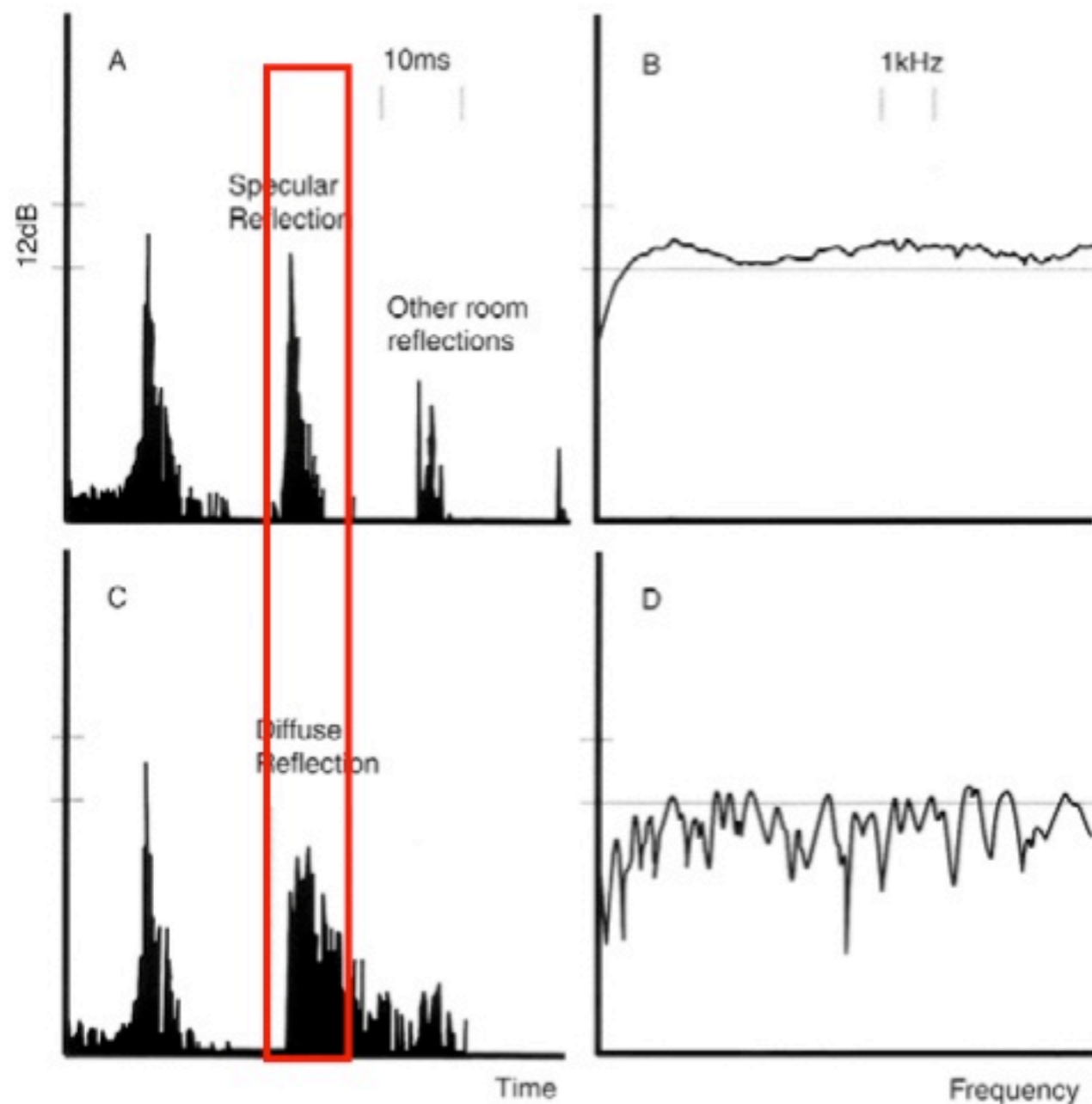
Le superfici convesse possono invece allargare l'angolo di diffusione.



# 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.

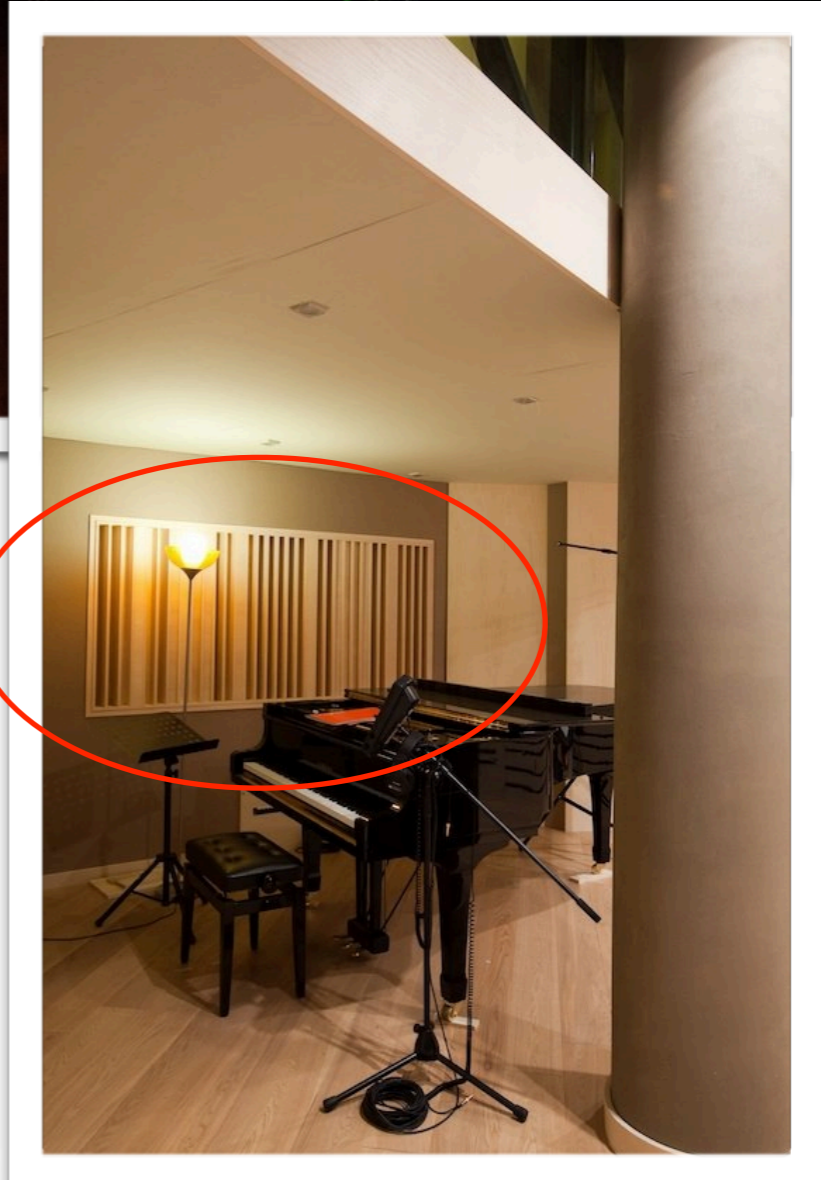
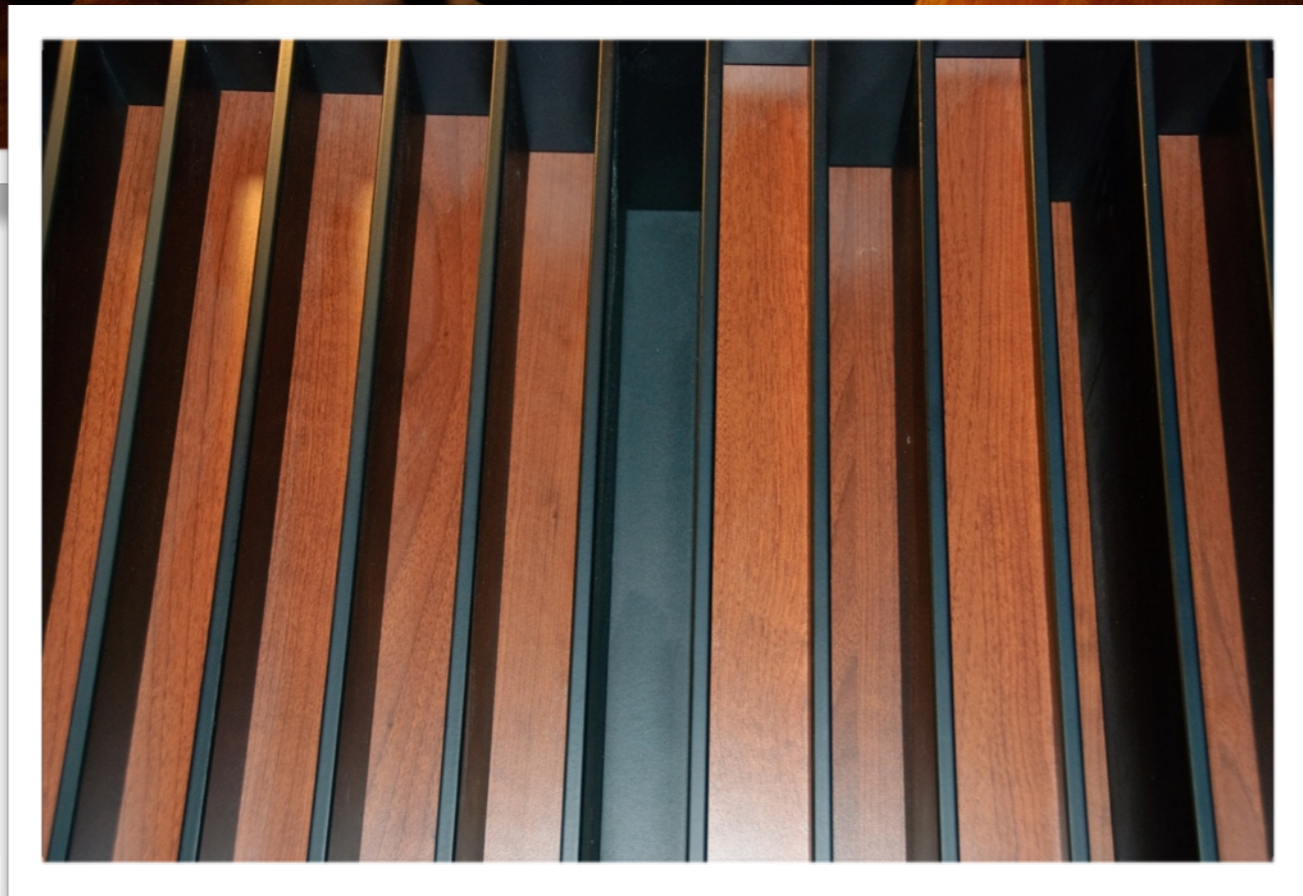
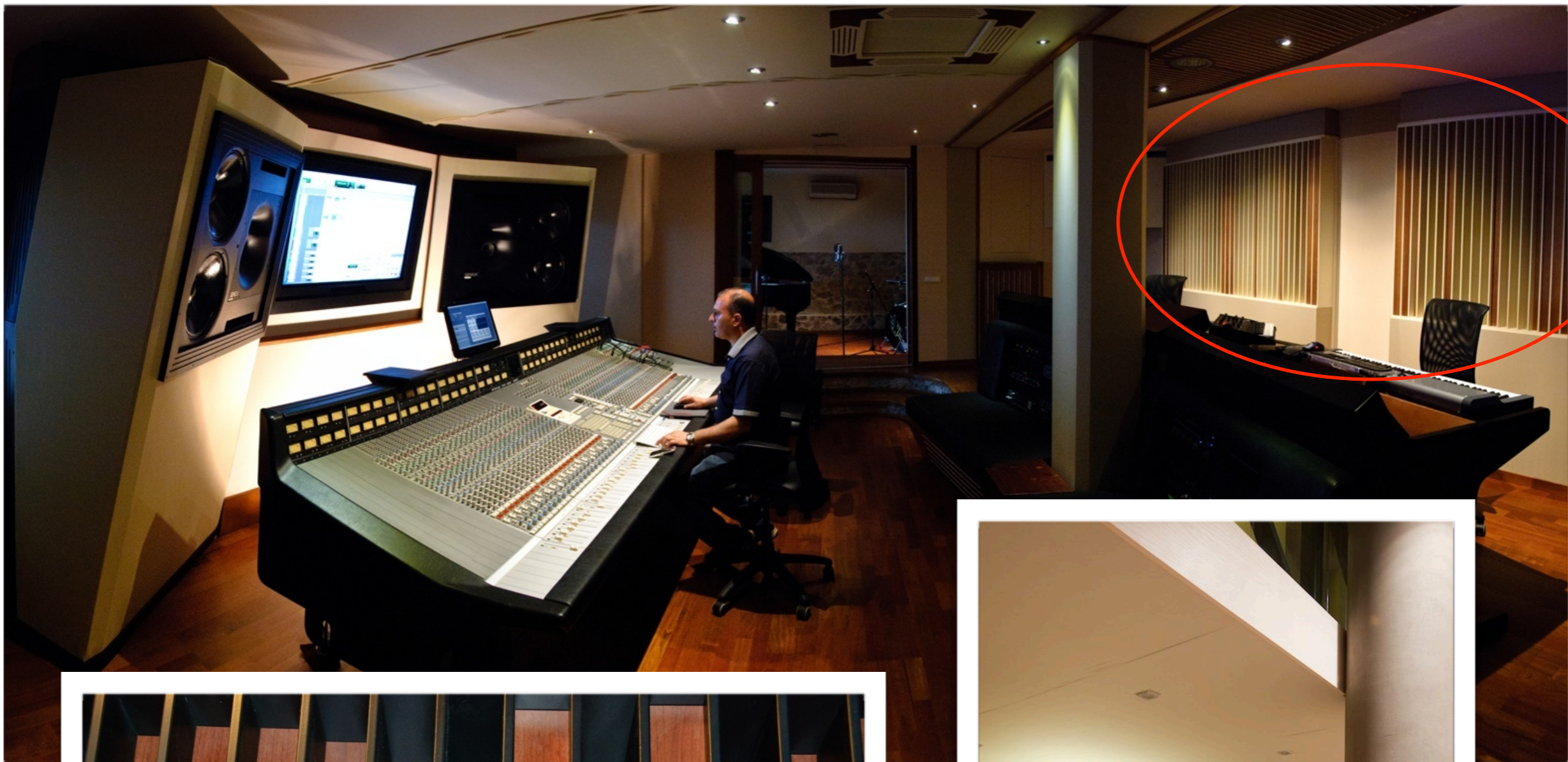
# Diffusione di Schroeder: QRD Quadratic Residue Diffusors Skyline

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

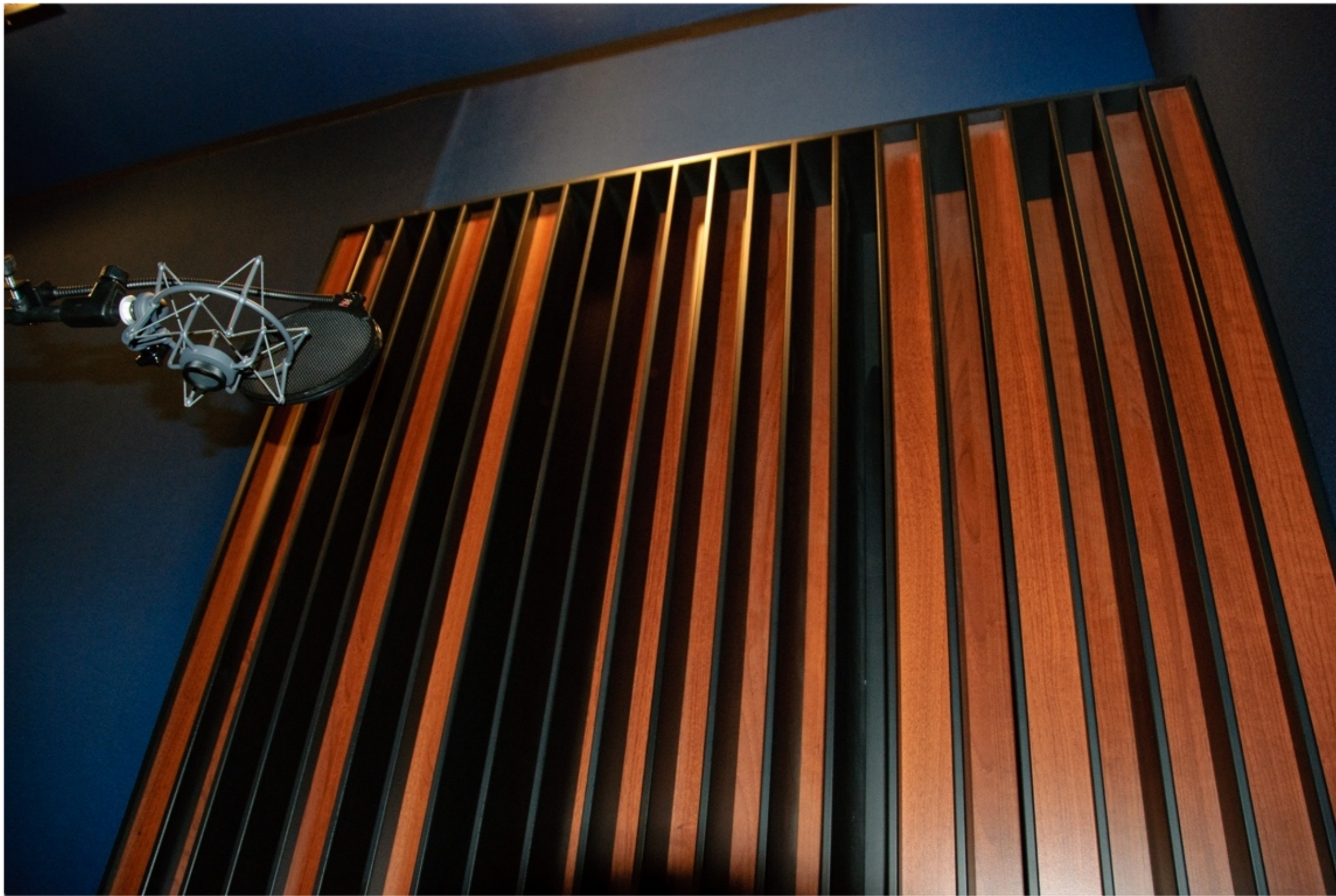




**DONATO MASCI**

*dott. in Fisica, acoustic designer & consultant. Tecnico competente in acustica n°184 Provincia di Firenze. Socio Accomandatario **Studio Sound Service s.a.s.**  
Via Torricella, 22/a - 50023 Impruneta (FI), Italy - +39.055.2373831 - +39.335.8233579 - [donatomasci@gmail.com](mailto:donatomasci@gmail.com) - [www.studiosoundservice.com](http://www.studiosoundservice.com)*



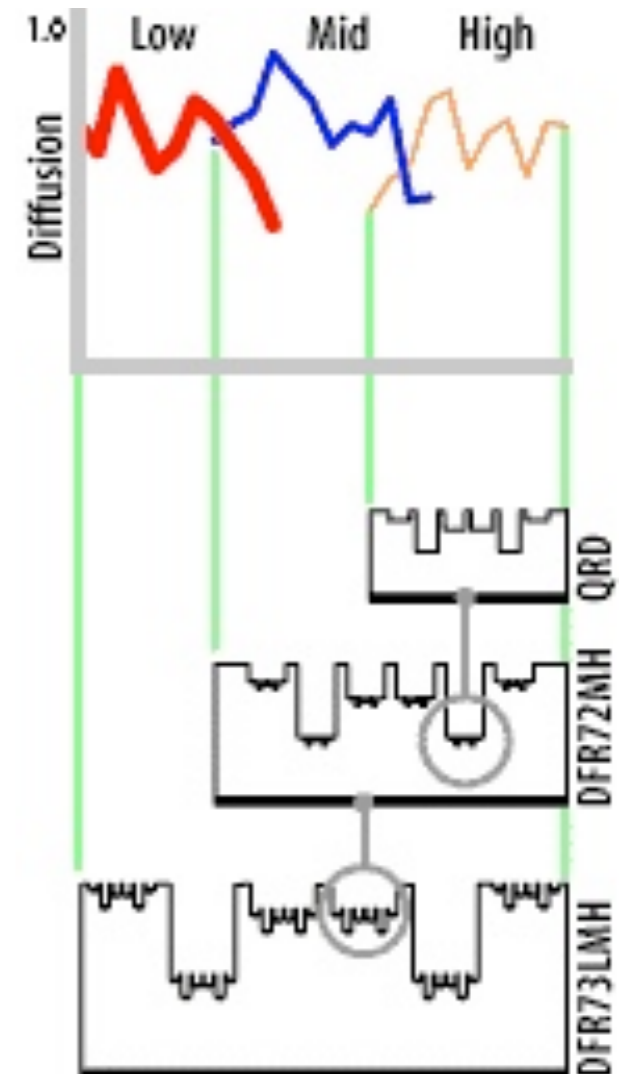
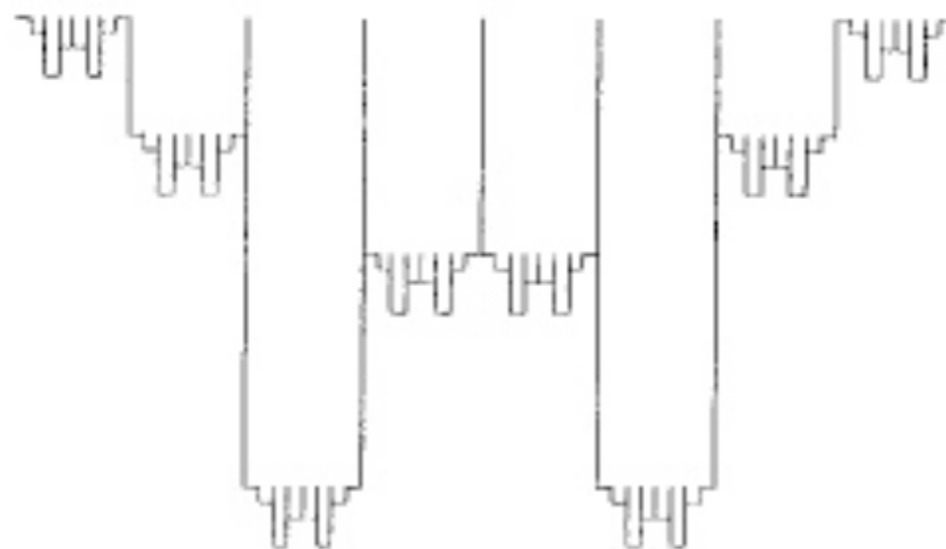
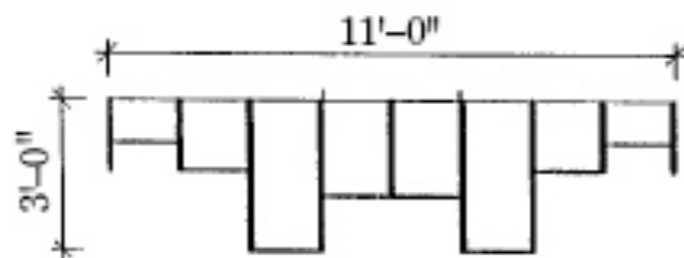
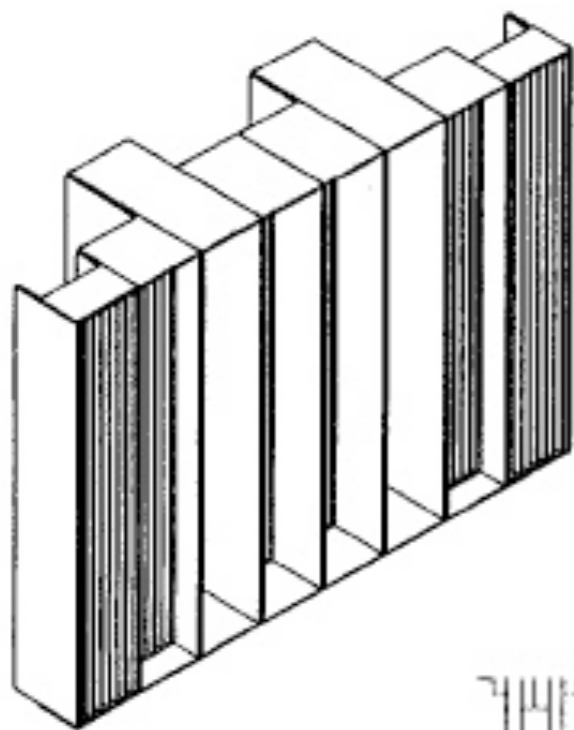


**DONATO MASCI**

*dott. in Fisica, acoustic designer & consultant. Tecnico competente in acustica n°184 Provincia di Firenze. Socio Accomandatario **Studio Sound Service s.a.s.**  
Via Torricella, 22/a - 50023 Impruneta (FI), Italy - +39.055.2373831 - +39.335.8233579 - [donatomasci@gmail.com](mailto:donatomasci@gmail.com) - [www.studiosoundservice.com](http://www.studiosoundservice.com)*



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.



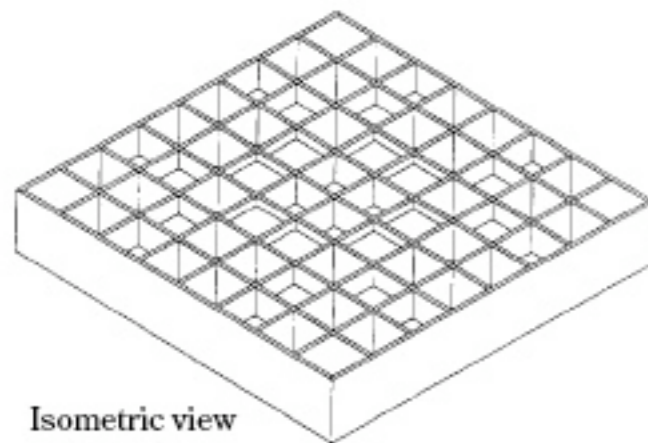


Patented: 2, 027, 658; 5, 027, 920; 4, 964, 486

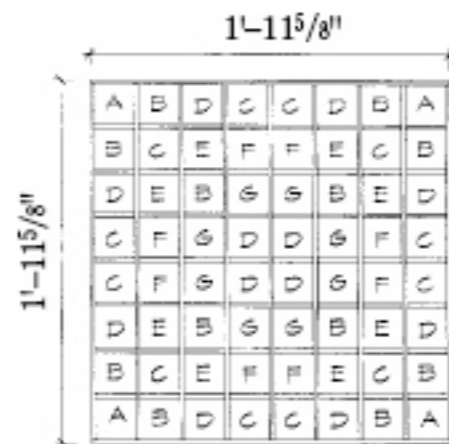


# Diffusori in 2d

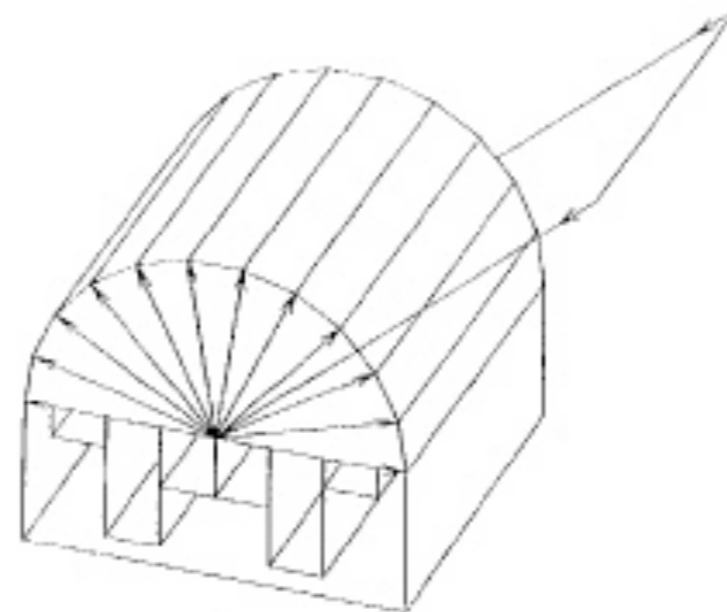
La distribuzione spaziale delle riflessioni provocate da questo tipo di diffusori è a semicerchio ossia in due dimensioni. Per avere una distribuzione sferica bisognerà utilizzare diffusori in tre dimensioni come l'Omniffusor RPG.



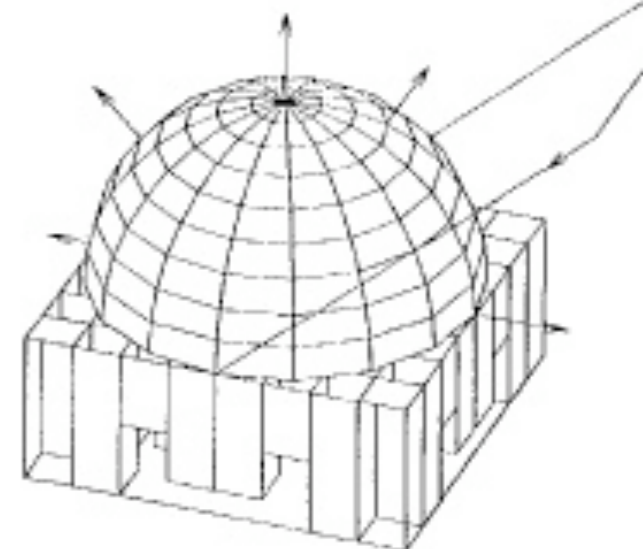
Isometric view



Front elevation



A



B

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.

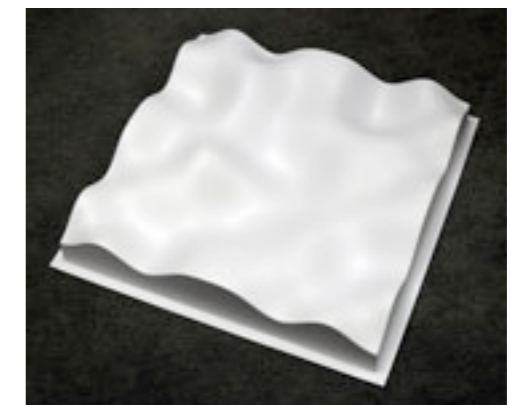
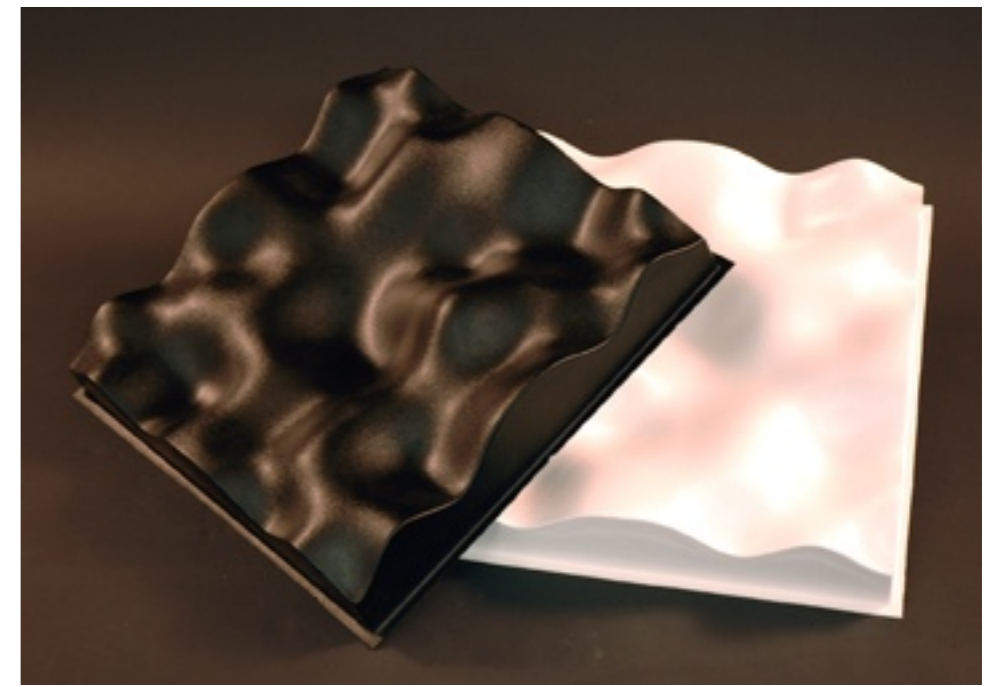




**DONATO MASCI**

*dott. in Fisica, acoustic designer & consultant. Tecnico competente in acustica n°184 Provincia di Firenze. Socio Accomandatario **Studio Sound Service s.a.s.**  
Via Torricella, 22/a - 50023 Impruneta (FI), Italy - +39.055.2373831 - +39.335.8233579 - [donatomaschi@gmail.com](mailto:donatomaschi@gmail.com) - [www.studiosoundservice.com](http://www.studiosoundservice.com)*

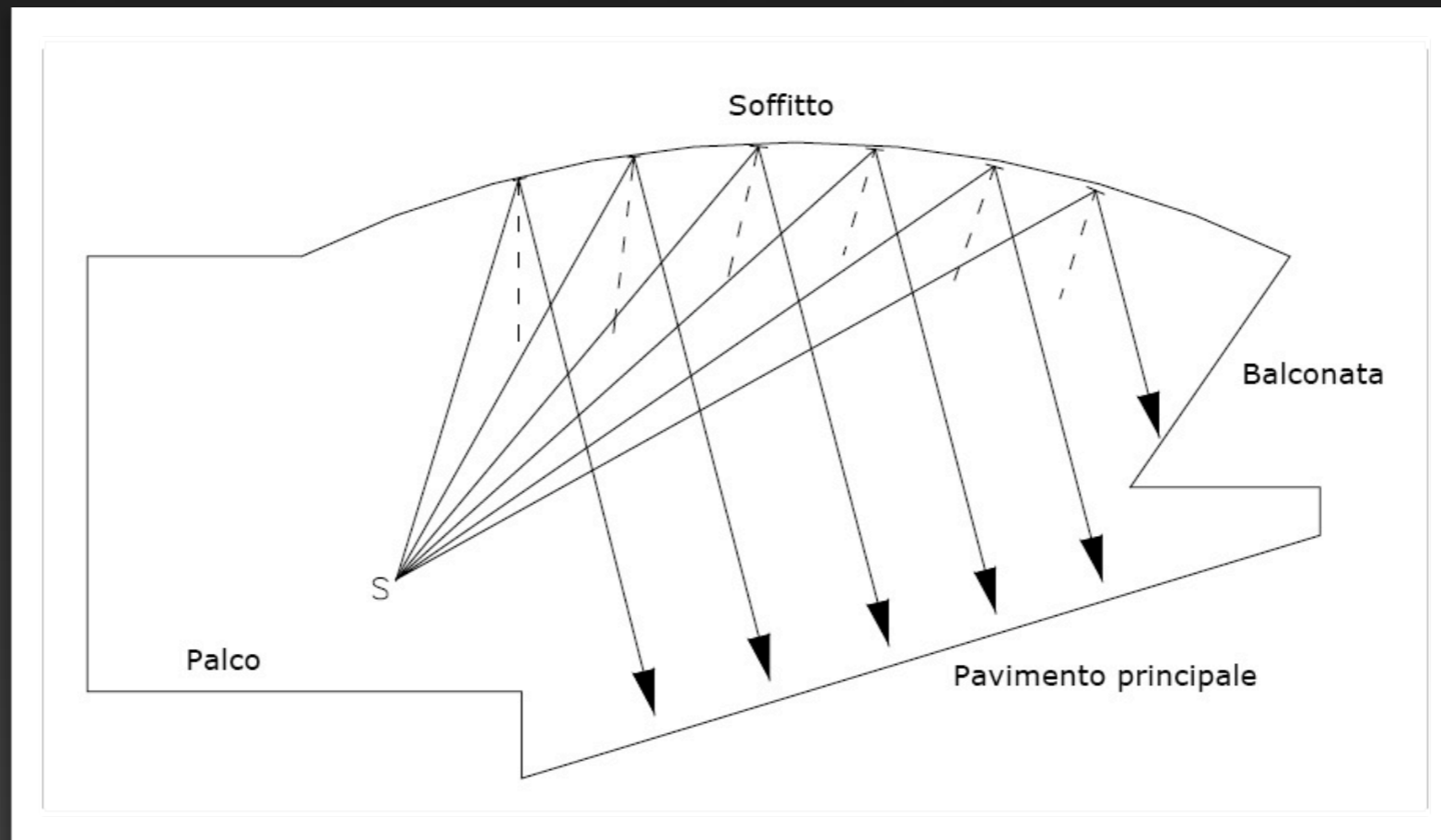




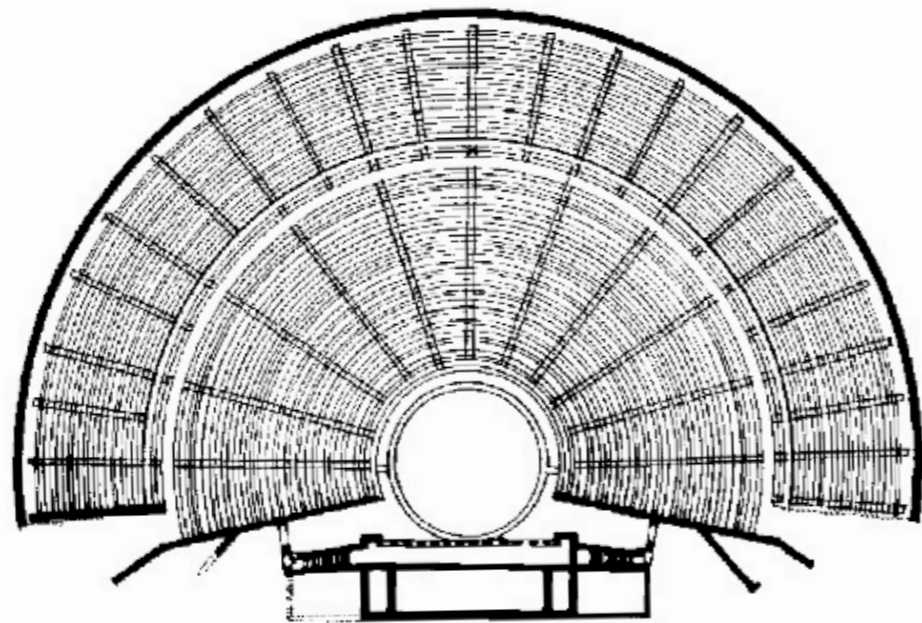


# Room Acoustics: Acustica negli ambienti chiusi

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

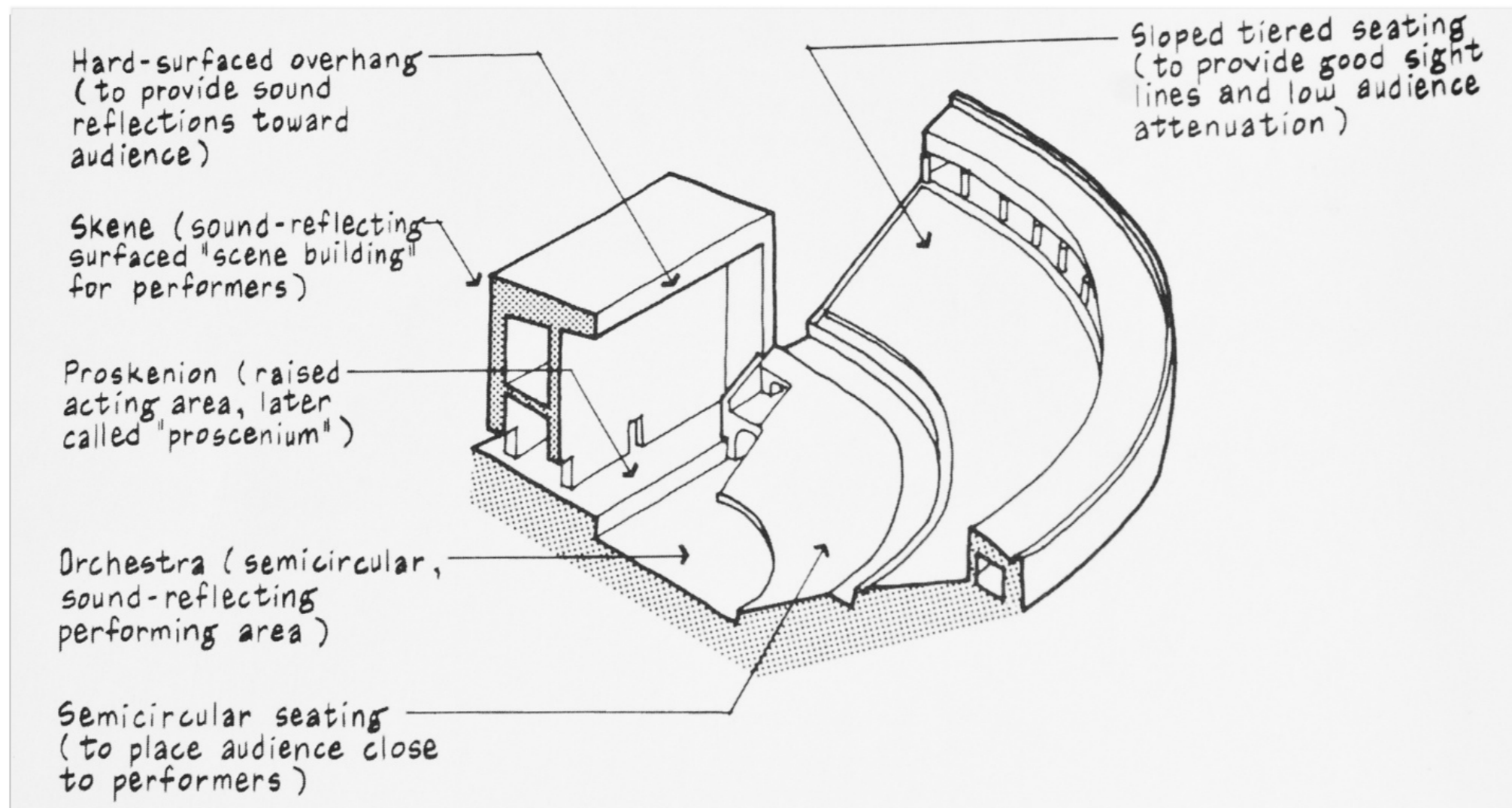


teatro di Epidauro, grecia





# Il teatro greco-romano



# 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*.

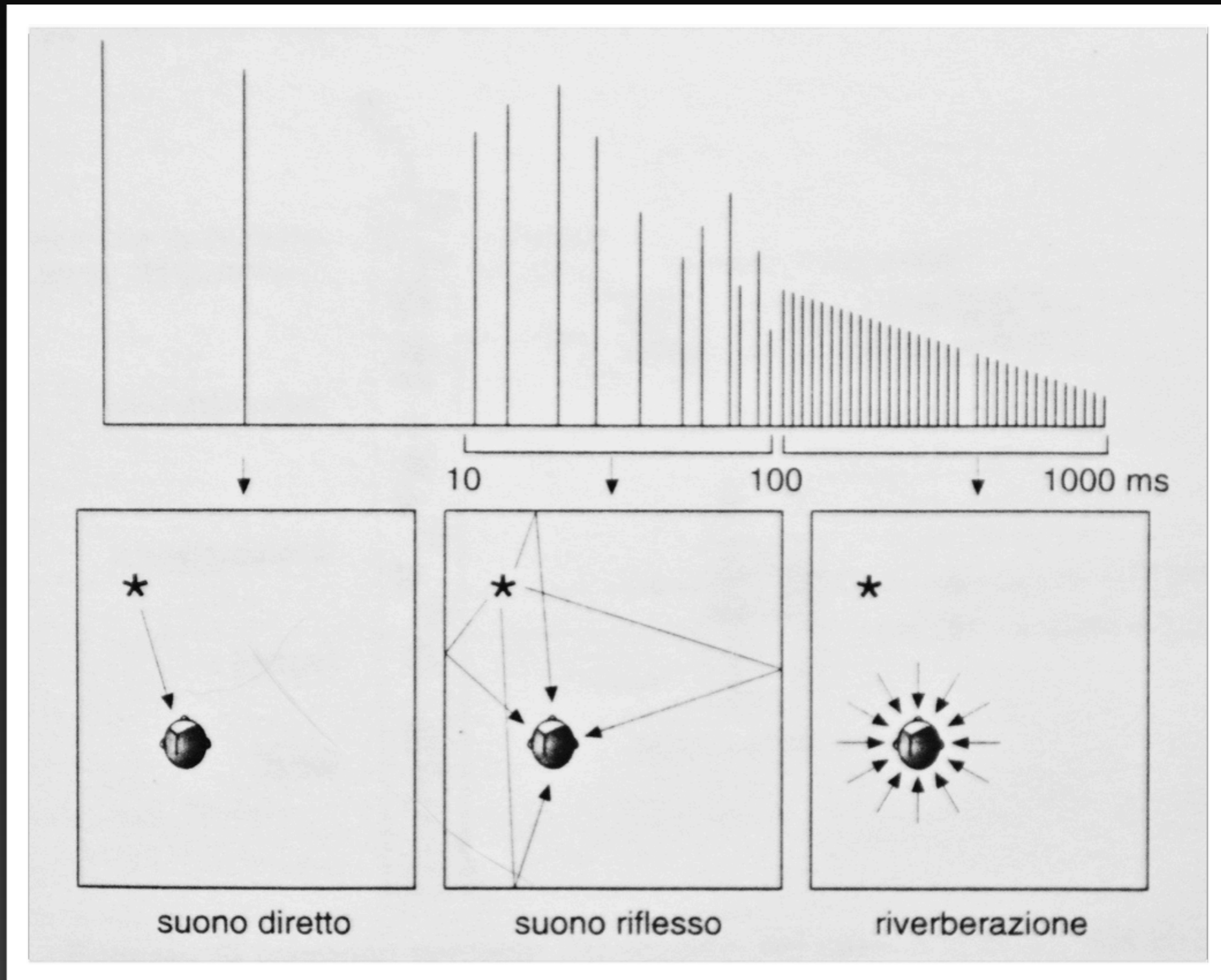
Coprì le sedute di materiale poroso fonoassorbente e misurò di quanto diminuiva il tempo di riverberazione nella sala.

# 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:

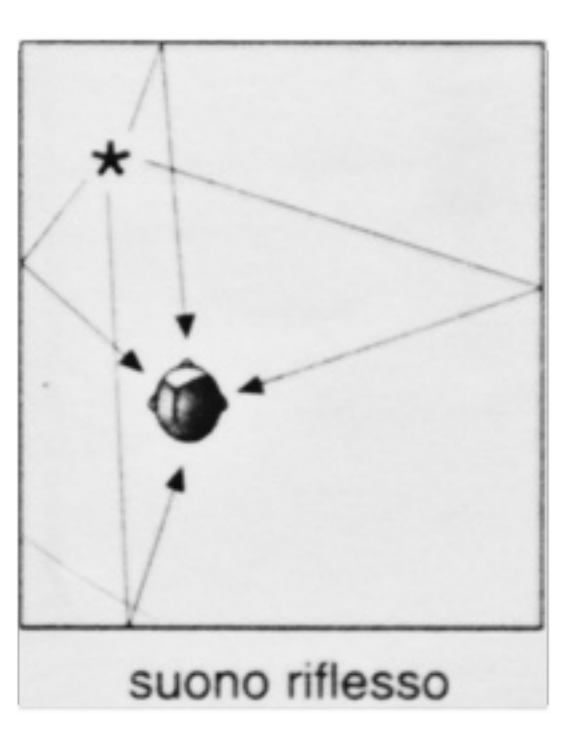
1. posizione della sorgente;
2. dimensione della sorgente;
3. vero timbro della sorgente.

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.





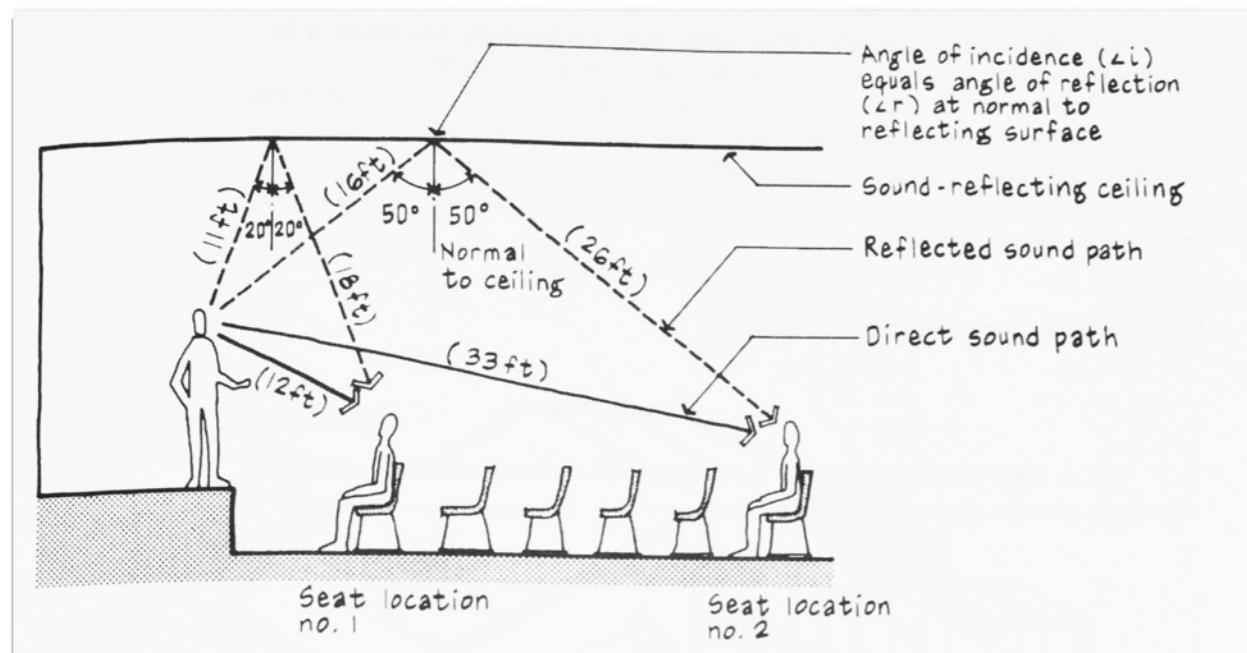
# Prime Riflessioni



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.

# Fusione Temporale



Le prime riflessioni che giungono all'orecchio umano entro 30÷80 millisecondi dal suono diretto, oltre a non risultare udibili, sono effettivamente **fuse con il suono diretto** stesso.

L'orecchio umano non riesce a distinguere separatamente suoni che si verificano molto ravvicinati nel tempo e considera le riflessioni come parte del suono diretto.

Il limite di tempo per la fusione temporale non è assoluto: dipende piuttosto dall'involuppo del suono. La fusione si interrompe a 4 ms nel caso di transienti, anche se può arrivare fino a 80 ms nel caso di suoni che cambiano lentamente, come ad esempio il legato dei violini.

Nonostante le prime riflessioni siano soppresse e risultino amalgamate con il suono diretto, esse modificano la nostra percezione del suono, rendendolo più pieno e più intenso.

# ...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**

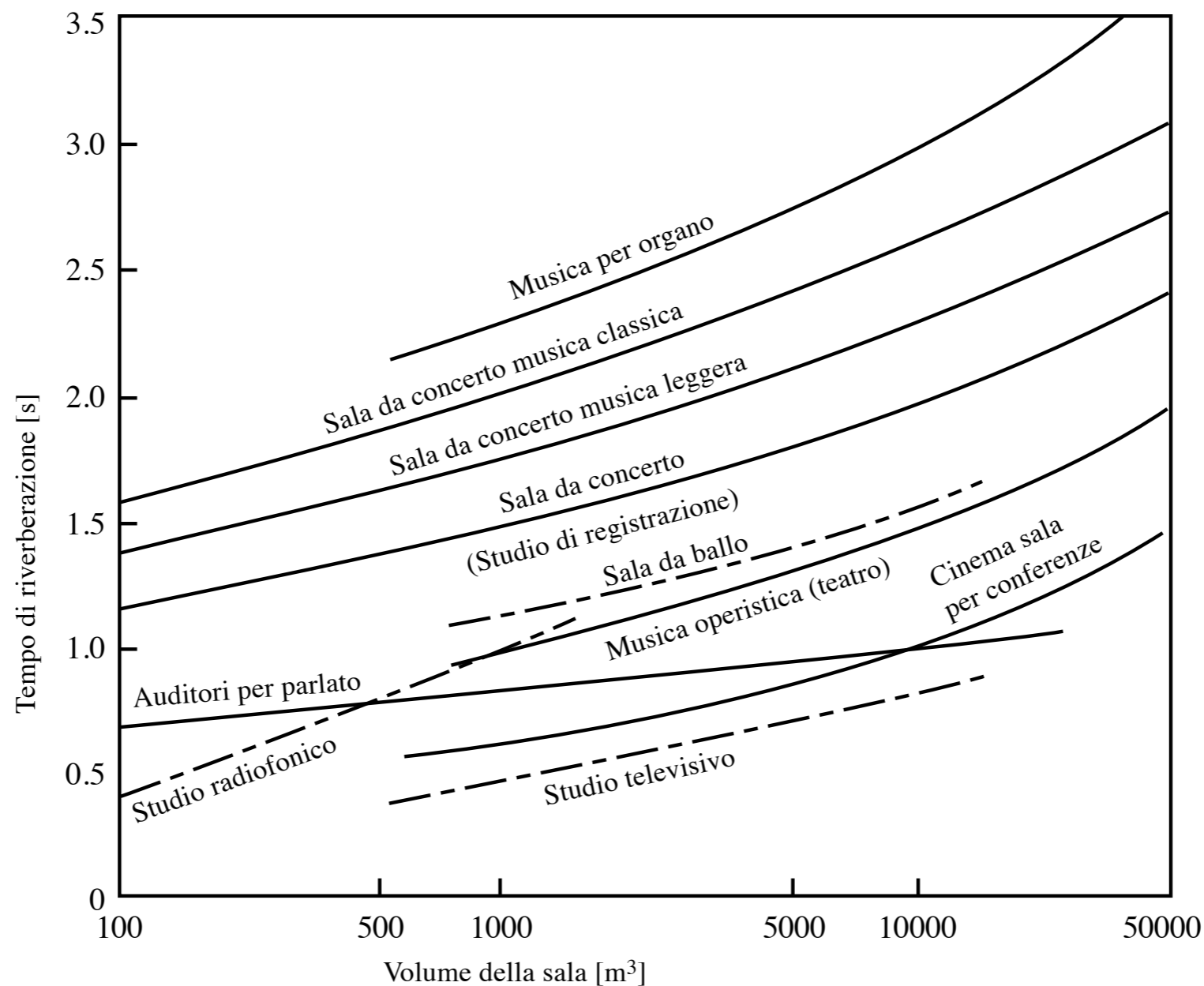
# Tempo di riverberazione ottimale

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:

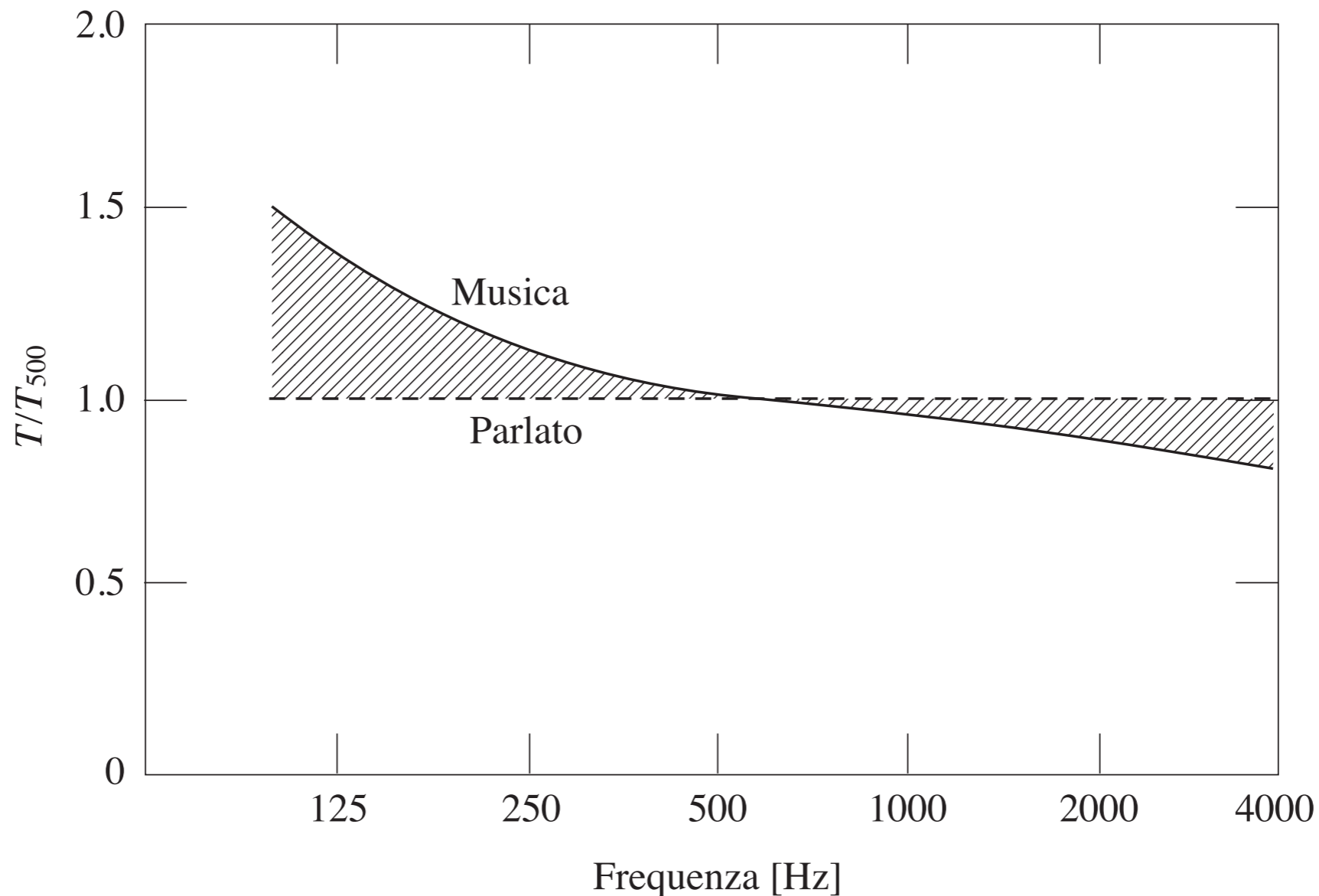
formule empiriche  
( $V$  in  $m^3$ )

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

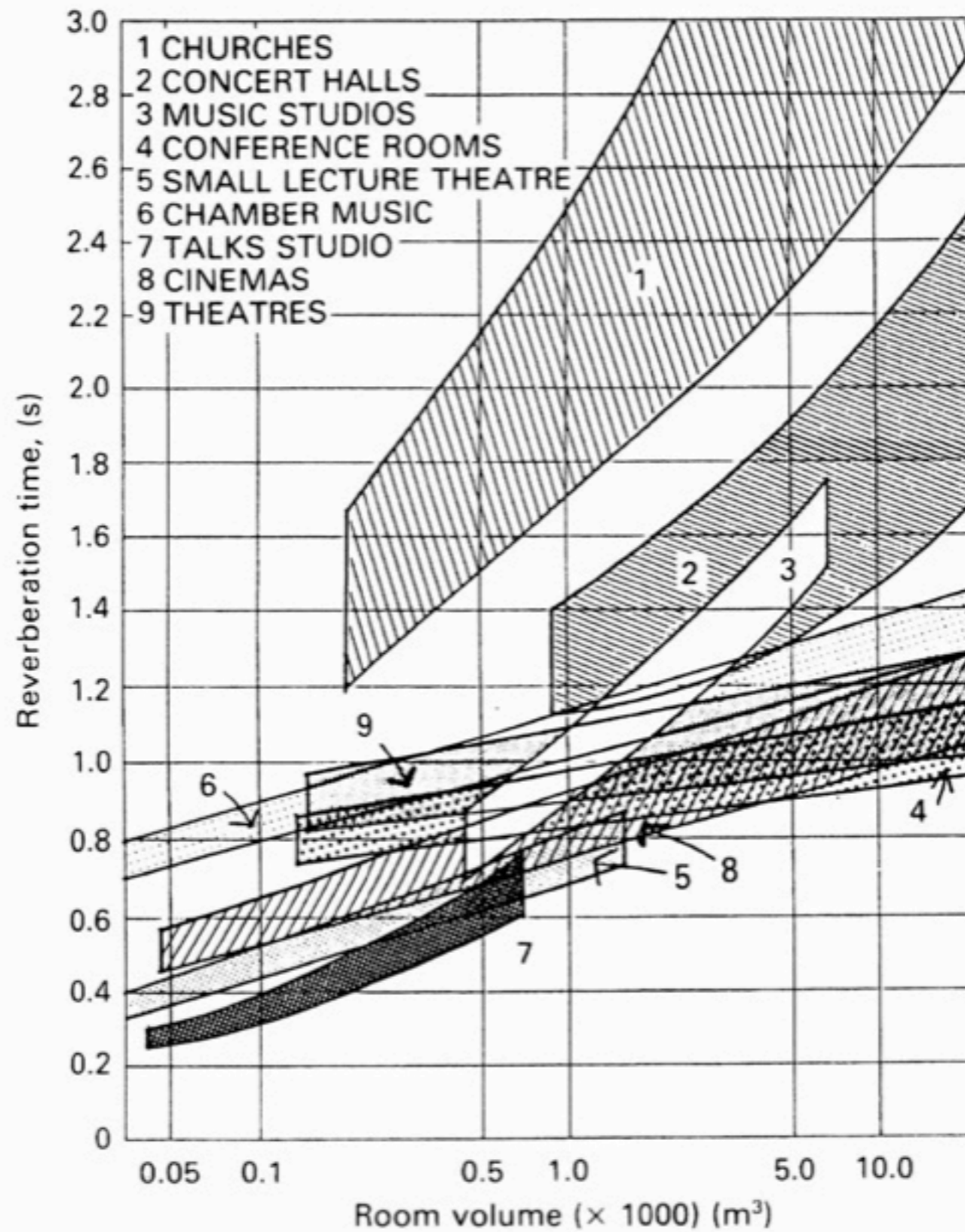
$$RT60_{musica} = 0.5 + 10^{-4} V$$



# 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	$V/10^3$ [m <sup>3</sup> ]	$S/10^3$ [m <sup>2</sup> ]	Tempo di riverber. [s] a varie frequenze [Hz]						Prima riflessione [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.).



# Leo Beranek

1962: *Music, Acoustics and Architecture*

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

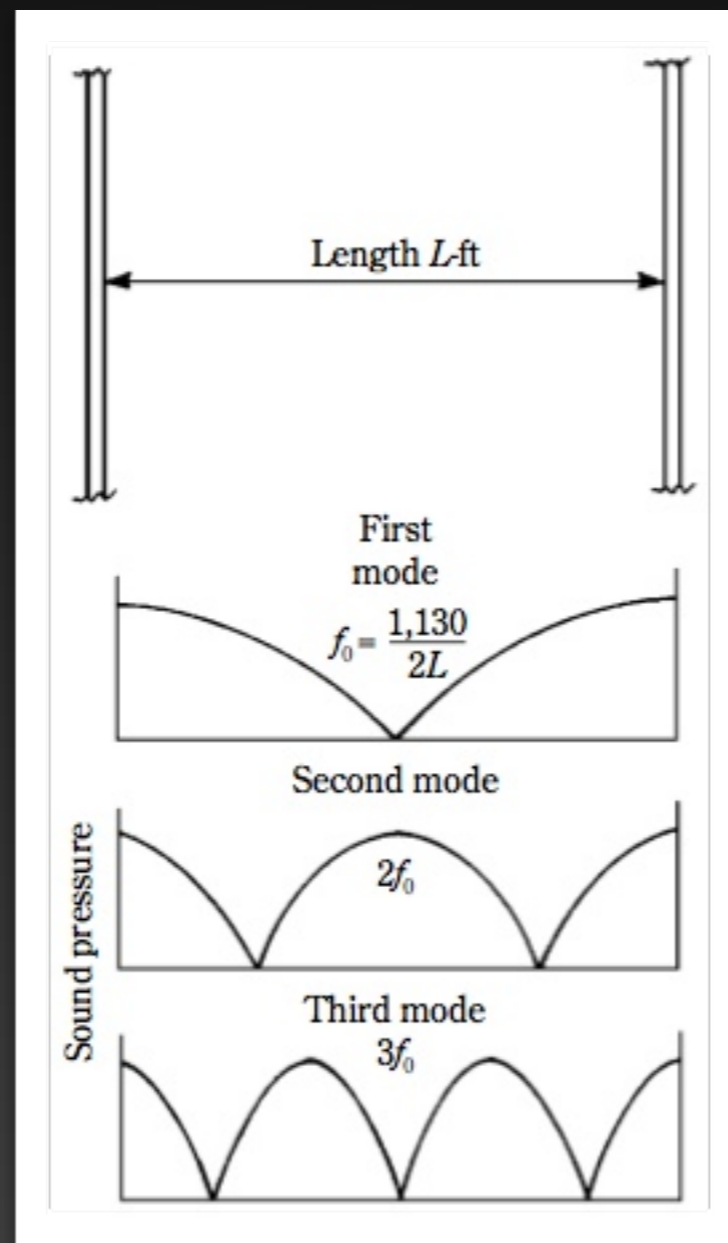
Tentativo di classificazione delle sale da concerto utilizzando parametri oggettivi.



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

# Risonanze modali e onde stazionarie



# 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.

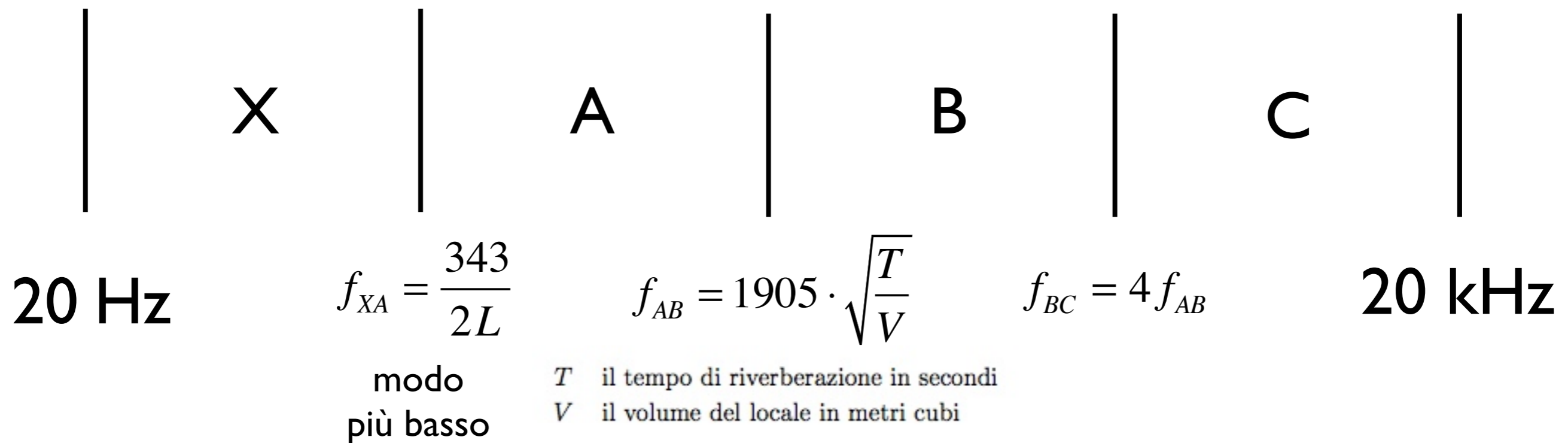
Una caratteristica delle onde stazionarie è che ad esse non è associato alcun trasporto di energia.





# 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.

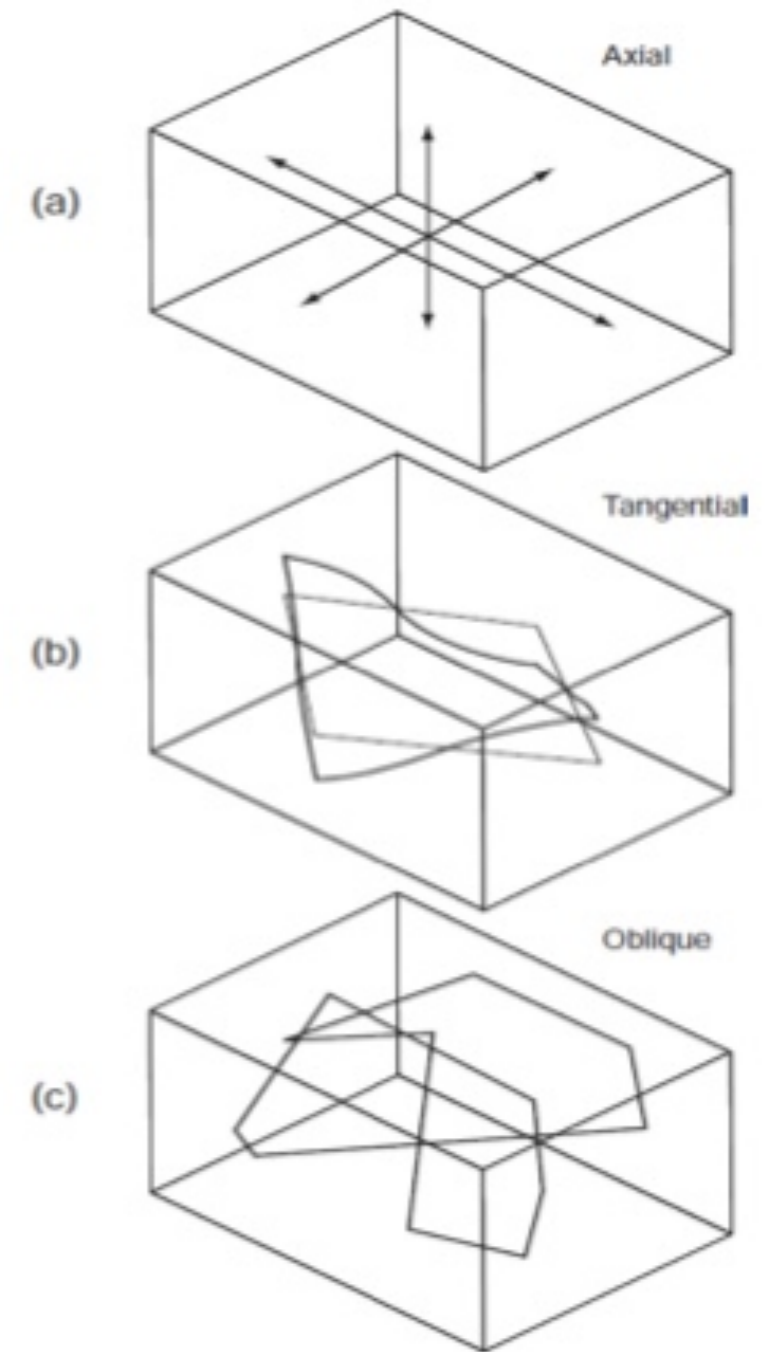
E' dimostrabile che l'aria racchiusa in una stanza rettangolare possiede un infinito numero di modi normali di vibrazione. Le frequenze alle quali occorrono sono date dall'equazione:

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

$c$	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

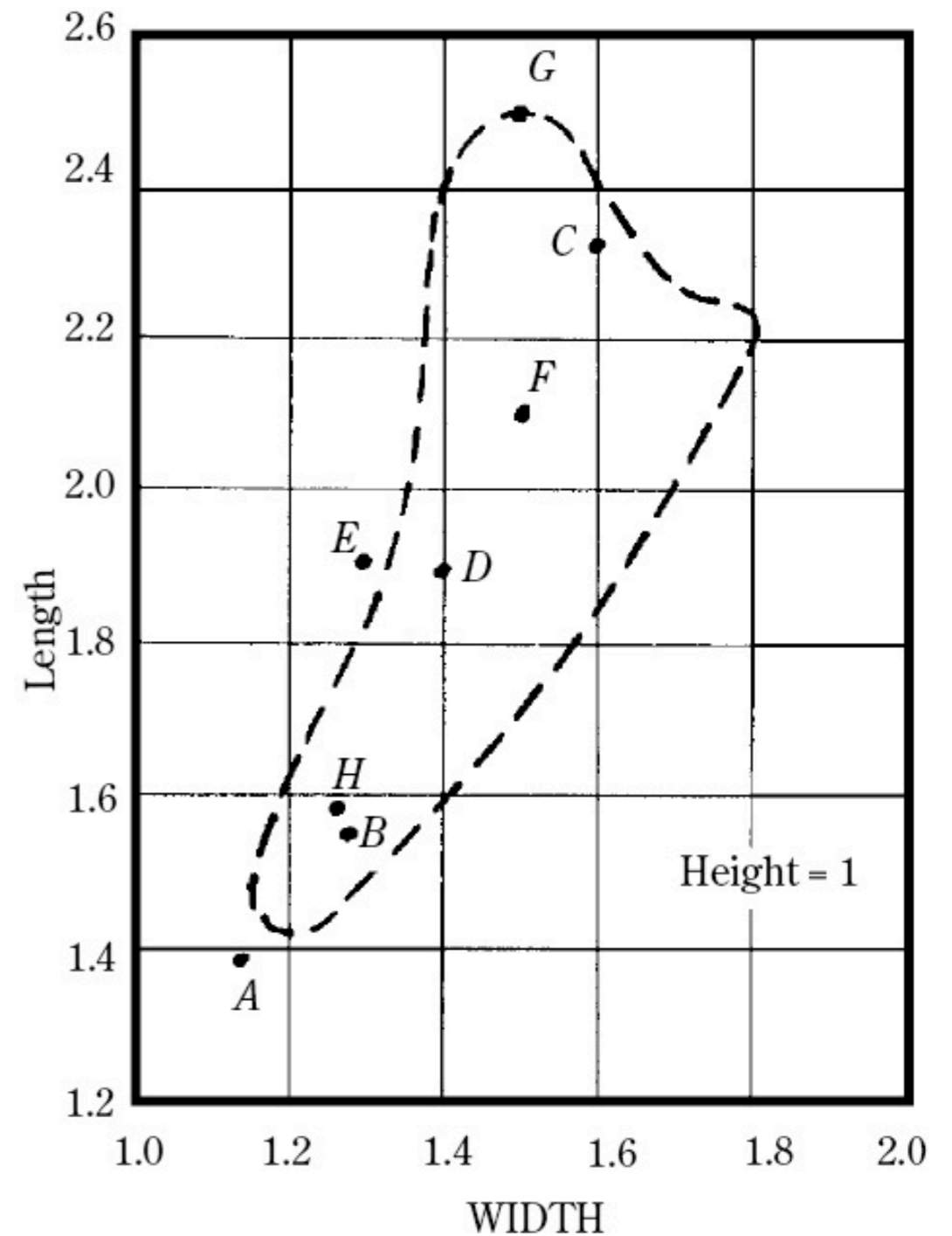
- Si calcolano le frequenze modali basandoci sulle dimensioni delle pareti rigide del locale
- Uso di un programma di calcolo che sostituisca valori crescenti agli indici  $p, q, r$ , in sequenza
- ordini i risultati dalla frequenza più piccola alla più grande
- numeri i modi e ne descriva il tipo contando il numero di zeri presenti negli indici  $p, q, r$



# 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);