

# Acoustic design

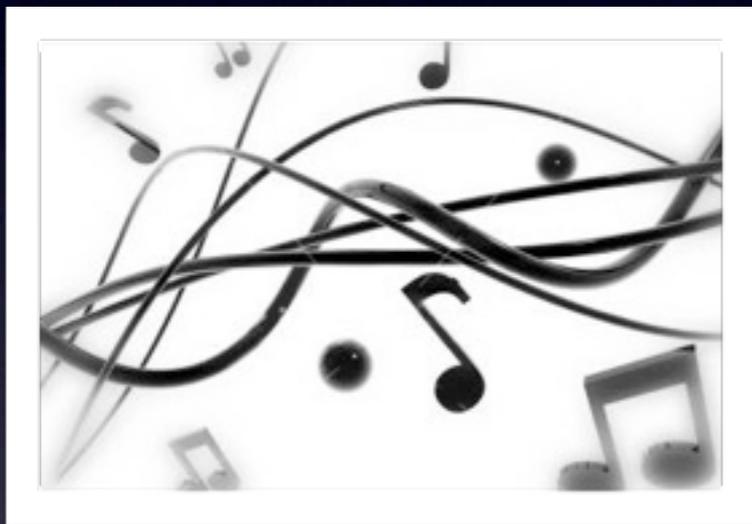
by Studio Sound Service s.a.s.

AES Workshop  
28-09-11

## Introduzione all'acustica degli ambienti chiusi

Dott. Donato Masci  
[info@acousticdesign.it](mailto:info@acousticdesign.it)

# 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.

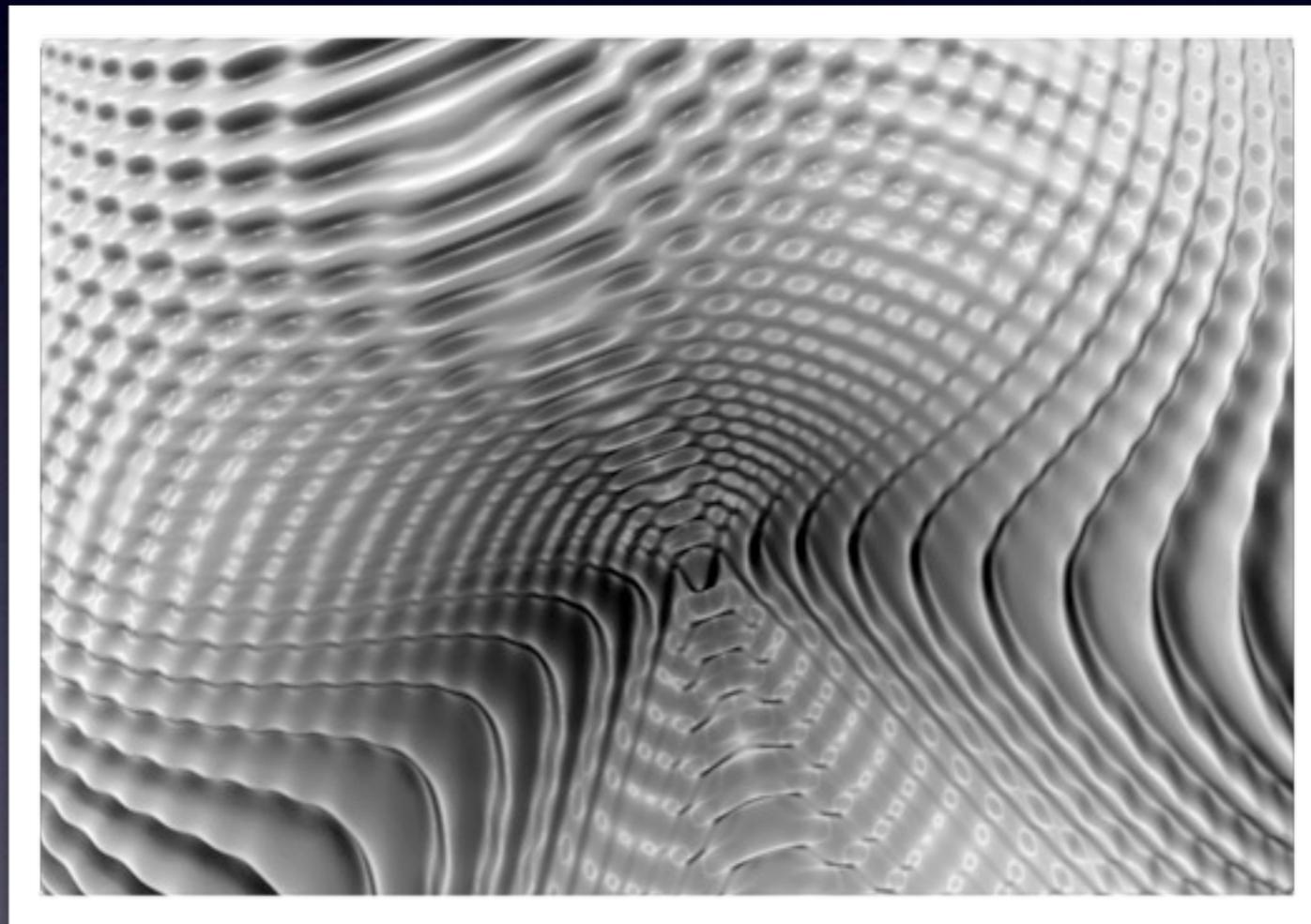
$$f = \frac{c}{\lambda} = \frac{343}{\lambda}$$

# 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

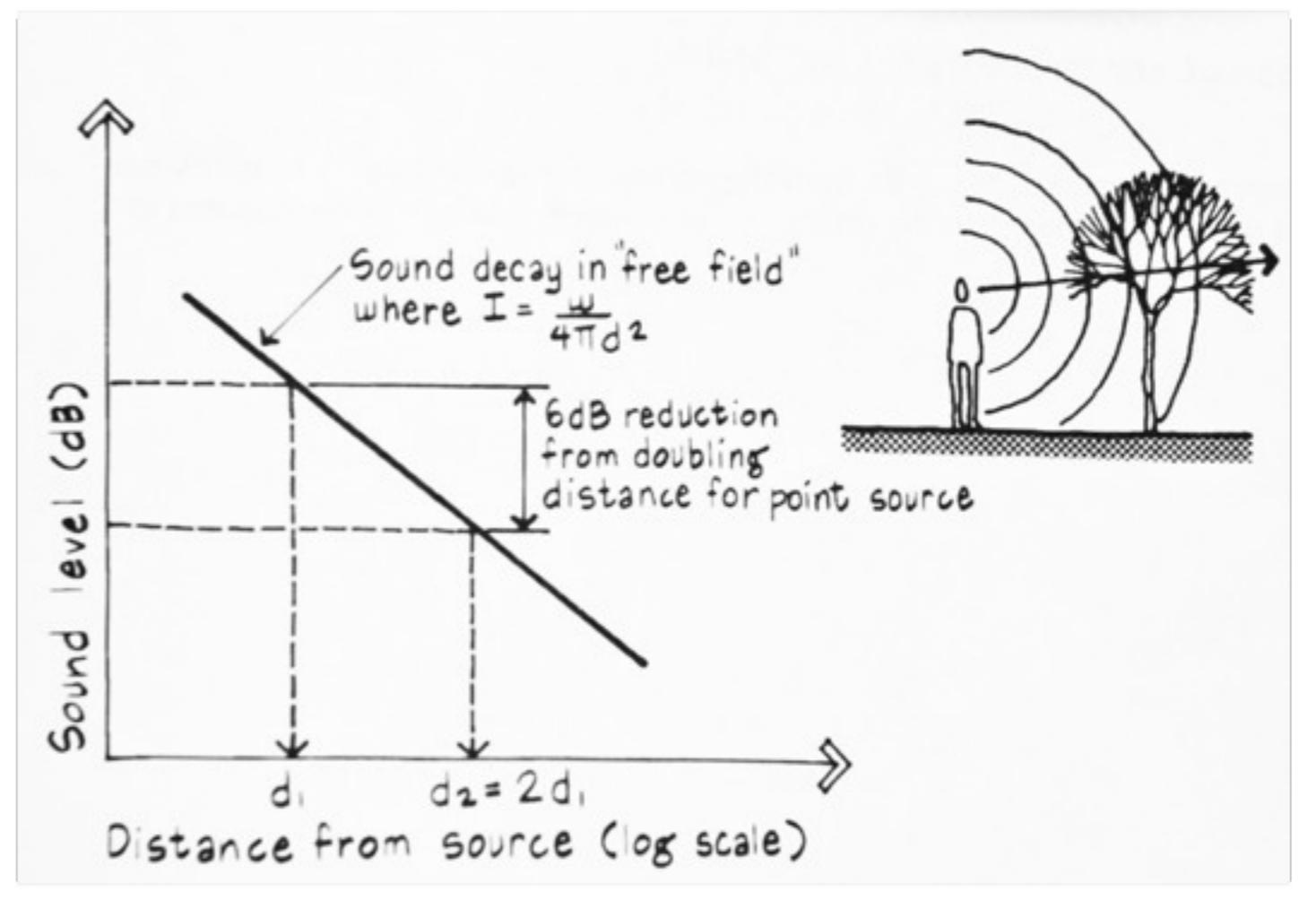
Materiali	Velocità del suono [m/s]
Aria	343
Acqua	1 480
Ghiaccio	3 200
Vetro	5 300
Acciaio	5 200
Piombo	1 200
Titanio	4 950
PVC (morbido)	80
PVC (duro)	1 700
Calcestruzzo	3 100
Faggio	3 300
Granito	6 200
Peridotite	7 700
Sabbia (asciutta)	10-300

# 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.



# Relazioni tra livelli sonori

Ambiente esterno, campo libero

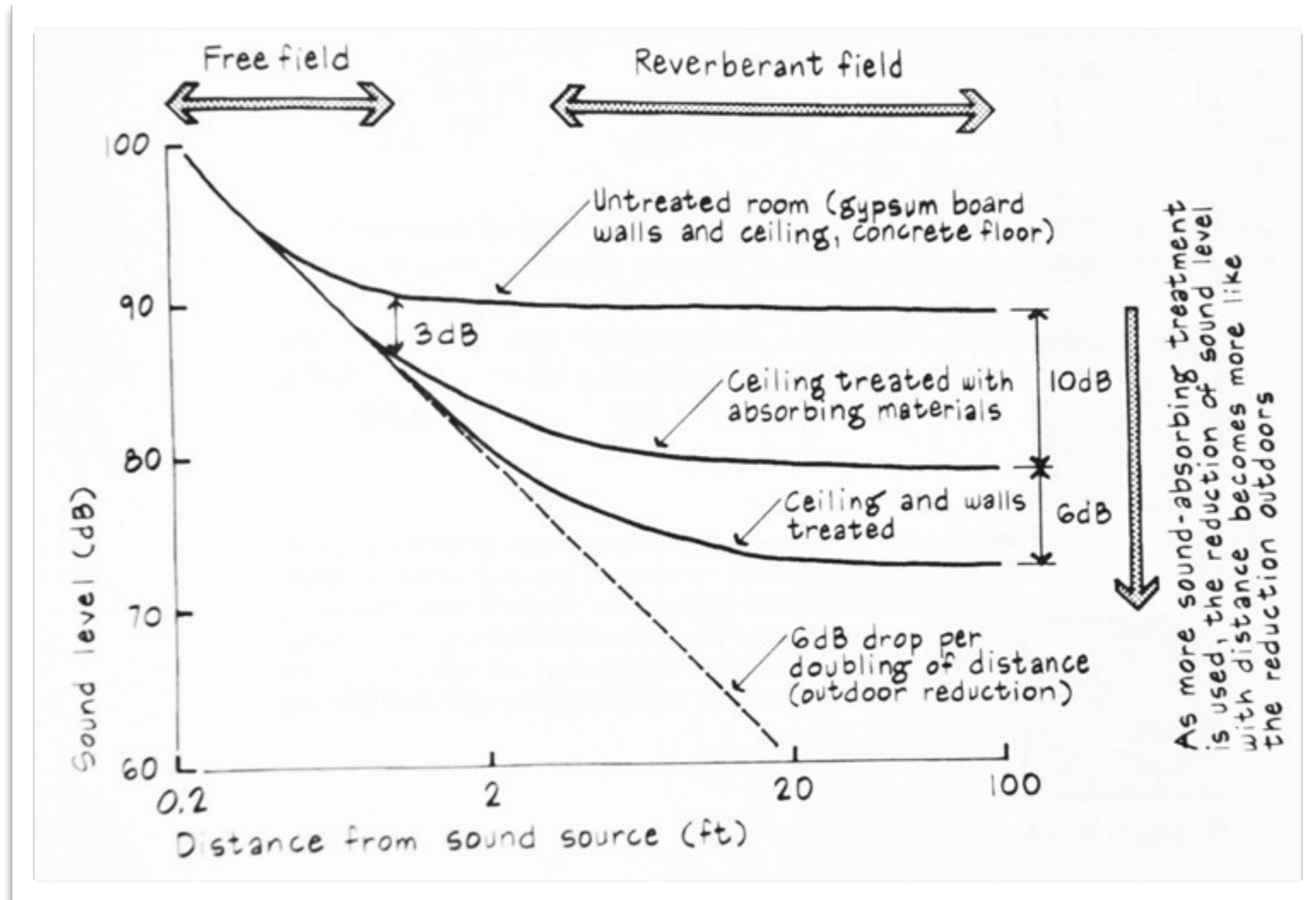
Sorgente Generica  $L_p \cong L_W - 10 \log \frac{400}{\rho c} - 10 \log S$

Sorgente Sferica  $L_p \cong L_W - 10 \log \frac{400}{\rho c} - 20 \log r - 11$

(con approssimazione di campo lontano, ossia:)

$$r > \frac{10}{2\pi} \lambda \approx 1.6 \lambda$$

# 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)

# Relazioni tra livelli sonori

## Ambiente chiuso

Campo riverberante

$$L_p \cong L_W + 10 \log \frac{4}{A}$$

Campo semiriverberante

$$L_p \cong L_W + 10 \log \left( \frac{Q}{4\pi r^2} + \frac{4}{R} \right)$$

dove

$$R = 10 \log \frac{1}{\tau} = 10 \log \frac{1}{\alpha - \delta} = \frac{\bar{\alpha} \cdot S}{1 - \bar{\alpha}} = \frac{S \cdot A}{S - A}$$

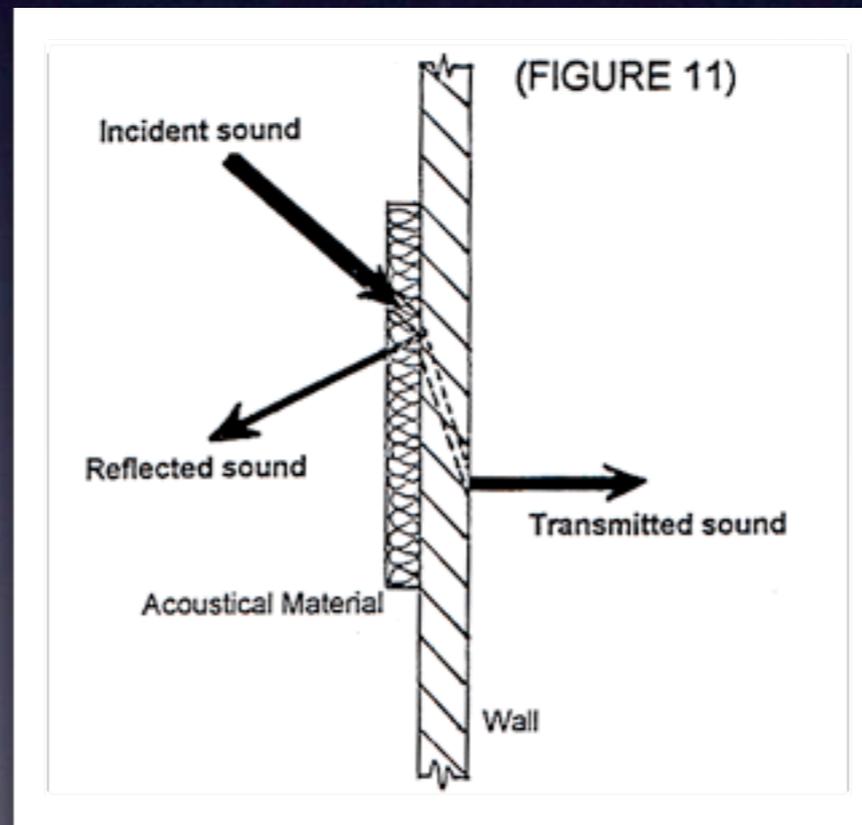
e

$Q$  è il fattore direttività della sorgente  
per sorgenti omnidirezionali è 1

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



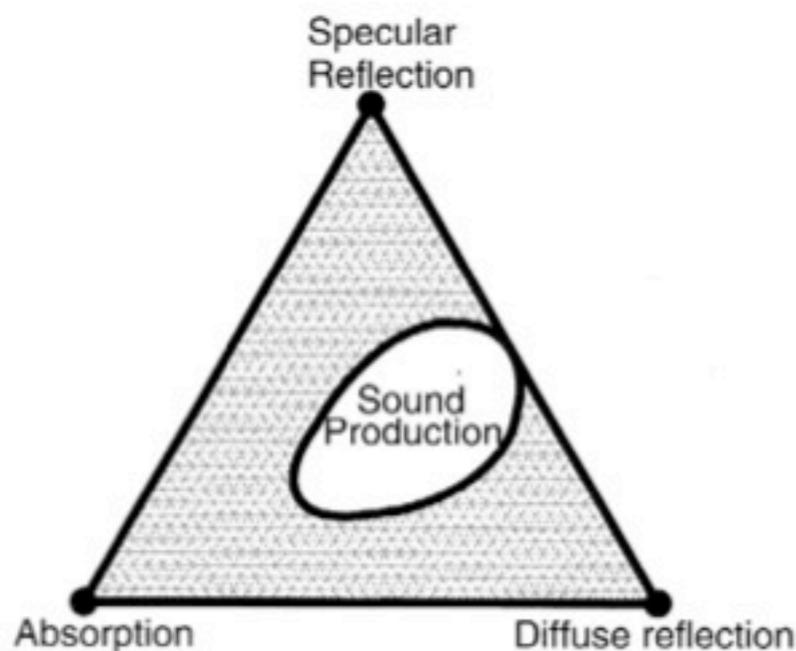
# Combinazioni delle superfici al contorno

Linee guida per una buona progettazione acustica:

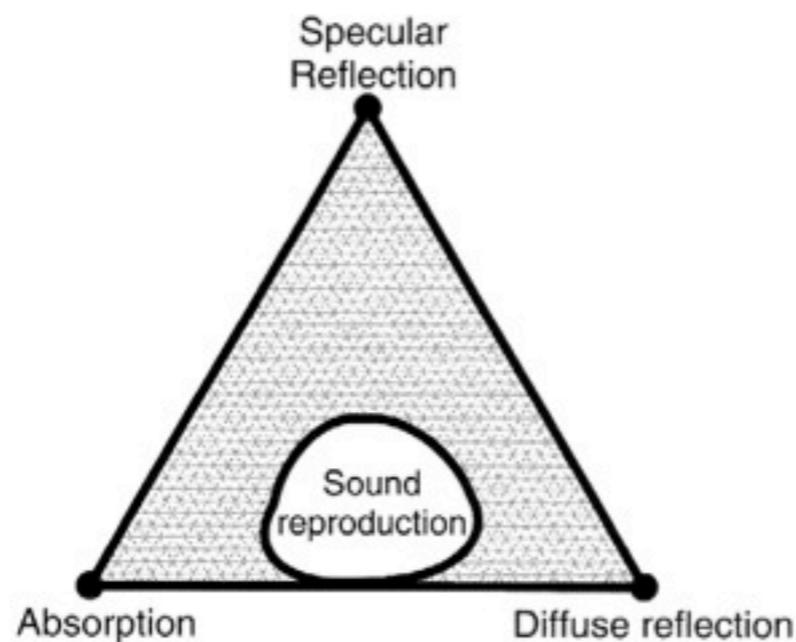
1. volume appropriato
2. geometria e forma ottimizzate
3. trattamento acustico delle superfici.

Il punto 3. segue da un'appropriata scelta di combinazioni e posizionamenti di materiale con caratteristiche acustiche **assorbenti, riflettenti e diffondenti.**

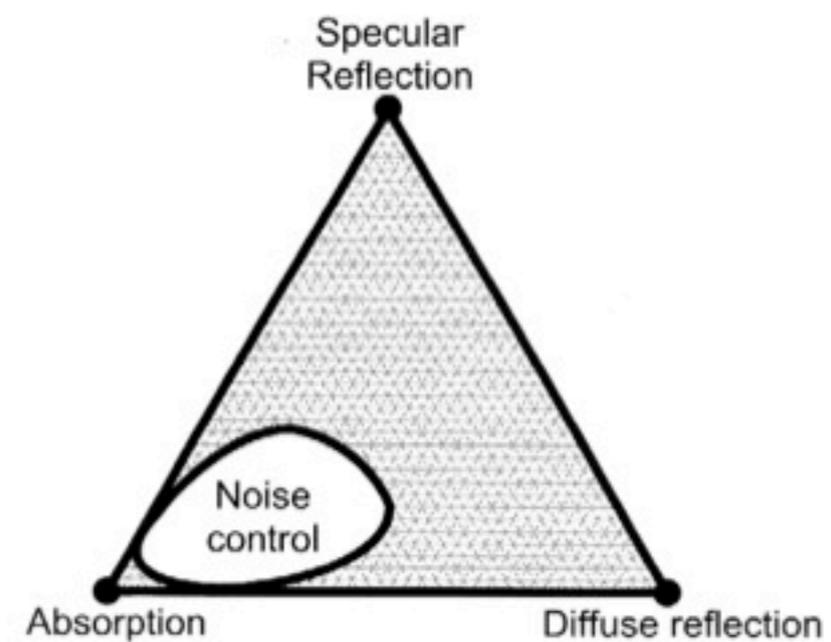
Ogni ambiente ha necessità differenti:



Concert Halls  
Opera Houses  
Teatri di prosa  
Auditorium  
Sale Conferenza  
Luoghi di culto



Studi di registrazione  
Studi Radio televisivi  
Home Theatres

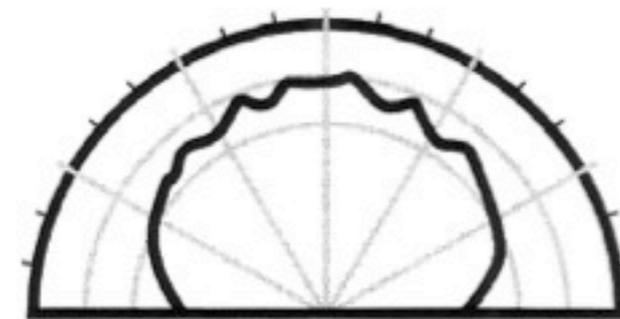
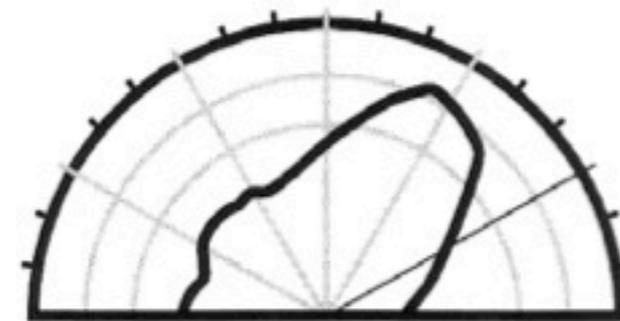
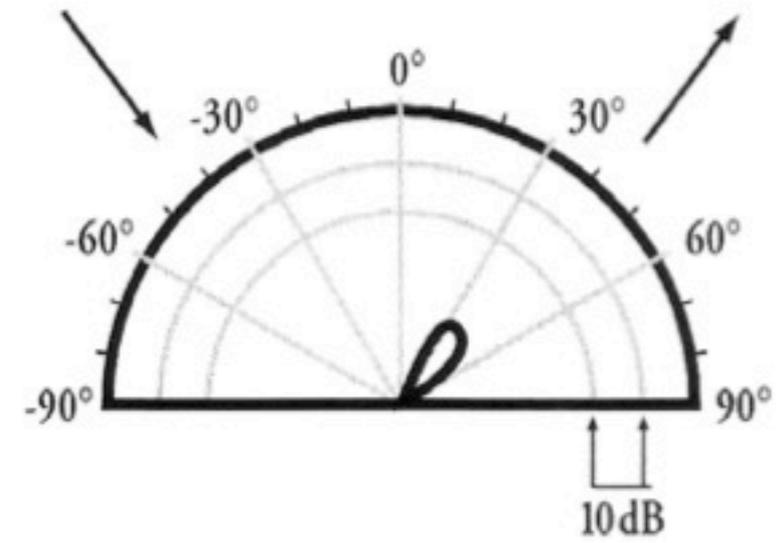
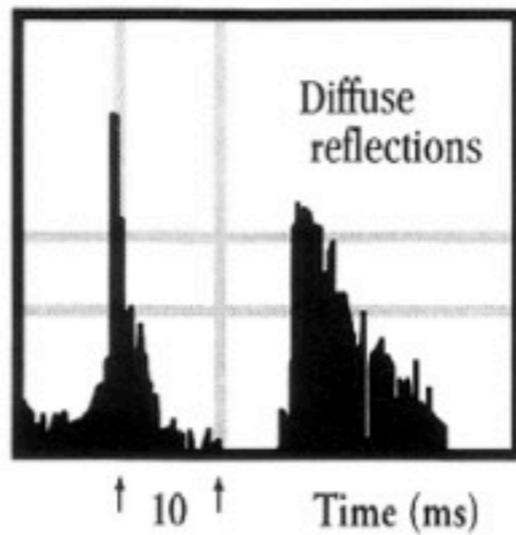
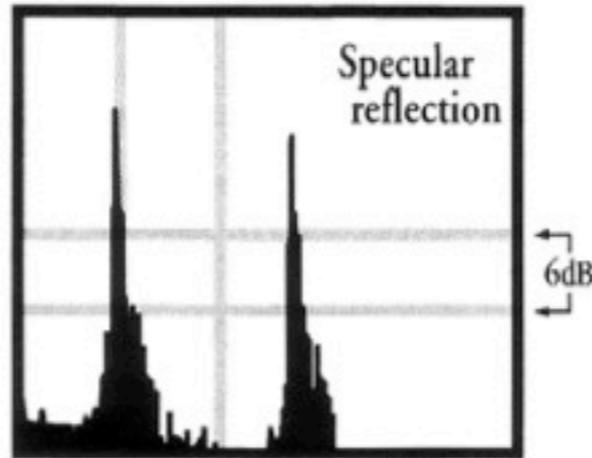
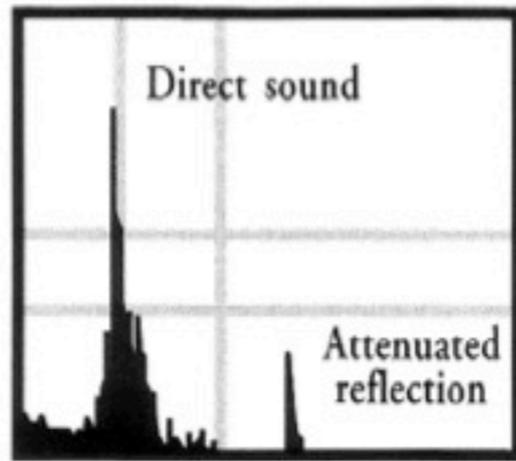
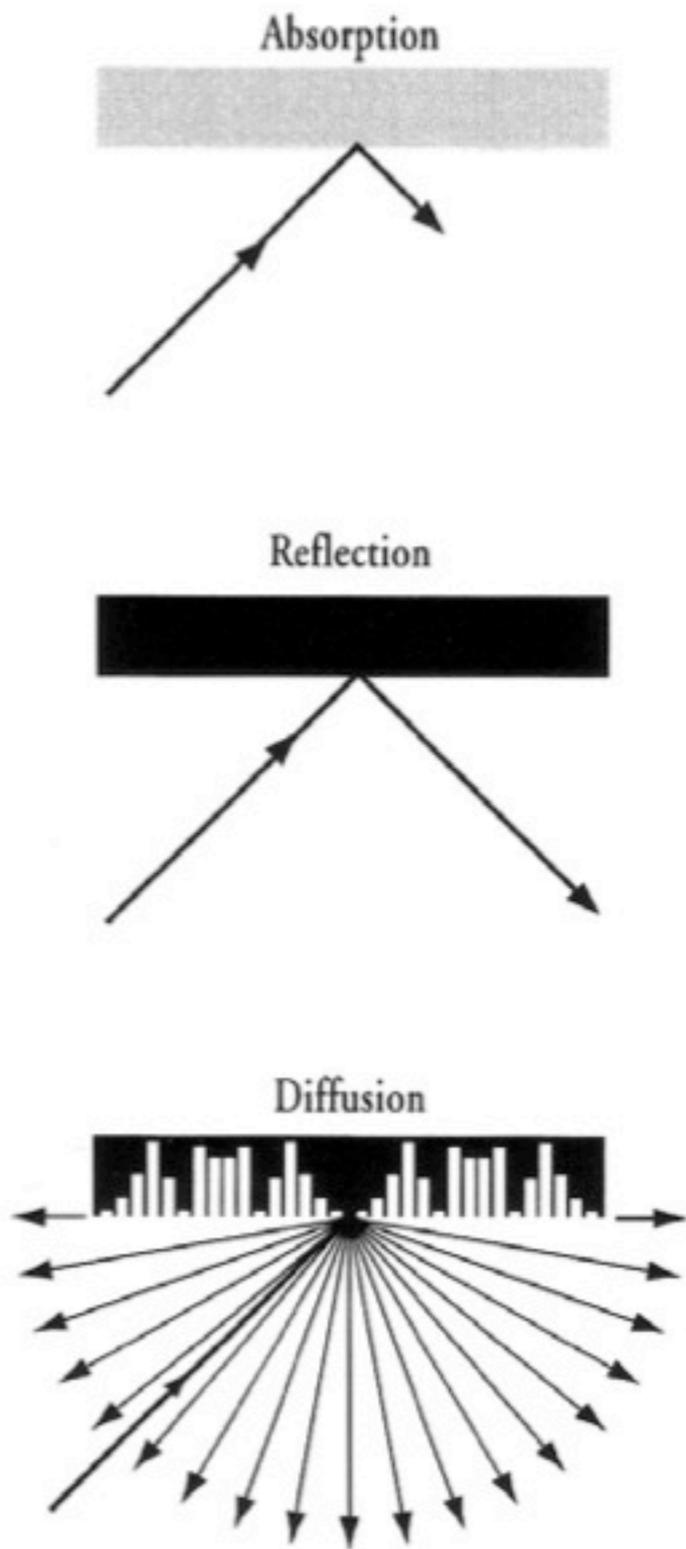


Ambienti industriali  
Palestre  
Piscine  
Biblioteche  
Foyer - altri

Acoustical treatment

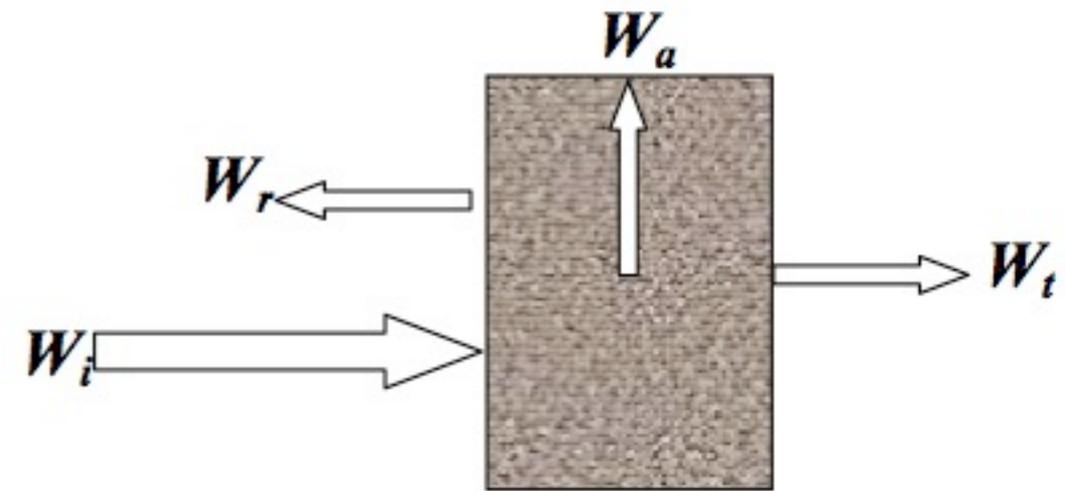
Temporal response

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:

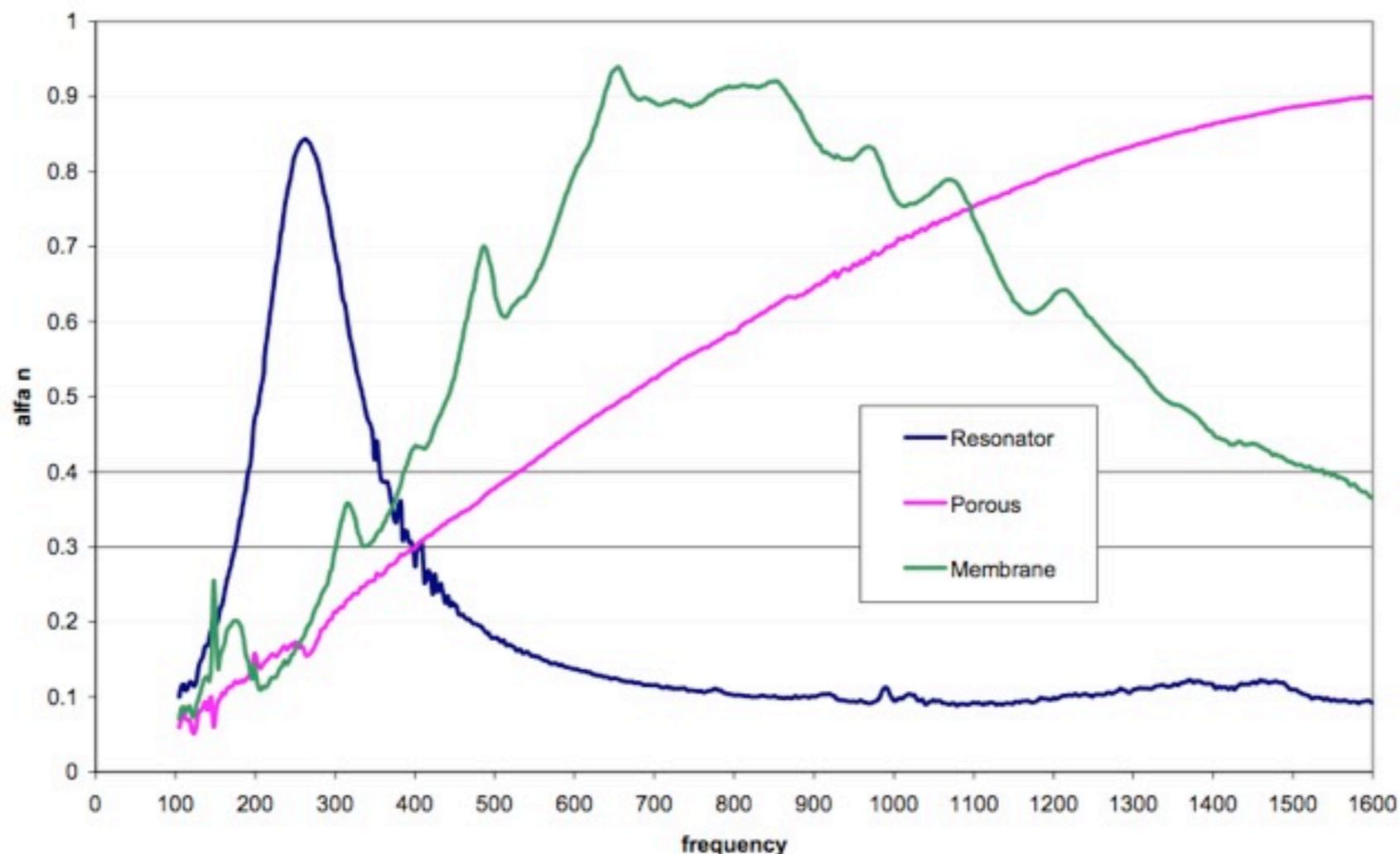
$$A = S \cdot \alpha \quad [\text{m}^2]$$

Assorbimento acustico totale di  
una stanza con n superfici:

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

# 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

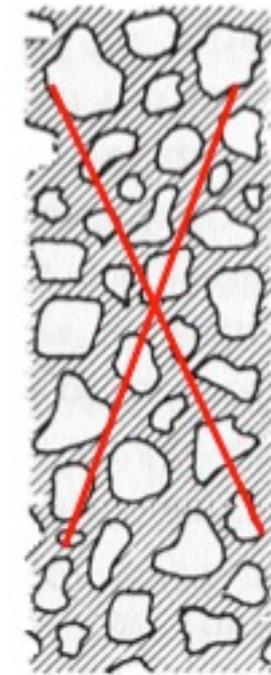
- **materiali fibrosi** (lana di vetro, lana di roccia, fibra di poliestere, feltri fibre di acido polilattico (mais), fibre vegetali (cotone, canapa, cocco, legno, cellulosa etc), fibre animali (lana, piuma d'oca etc))
- **materiali porosi (o a celle aperte)** (poliuretani espansi a cella aperta, resina 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**

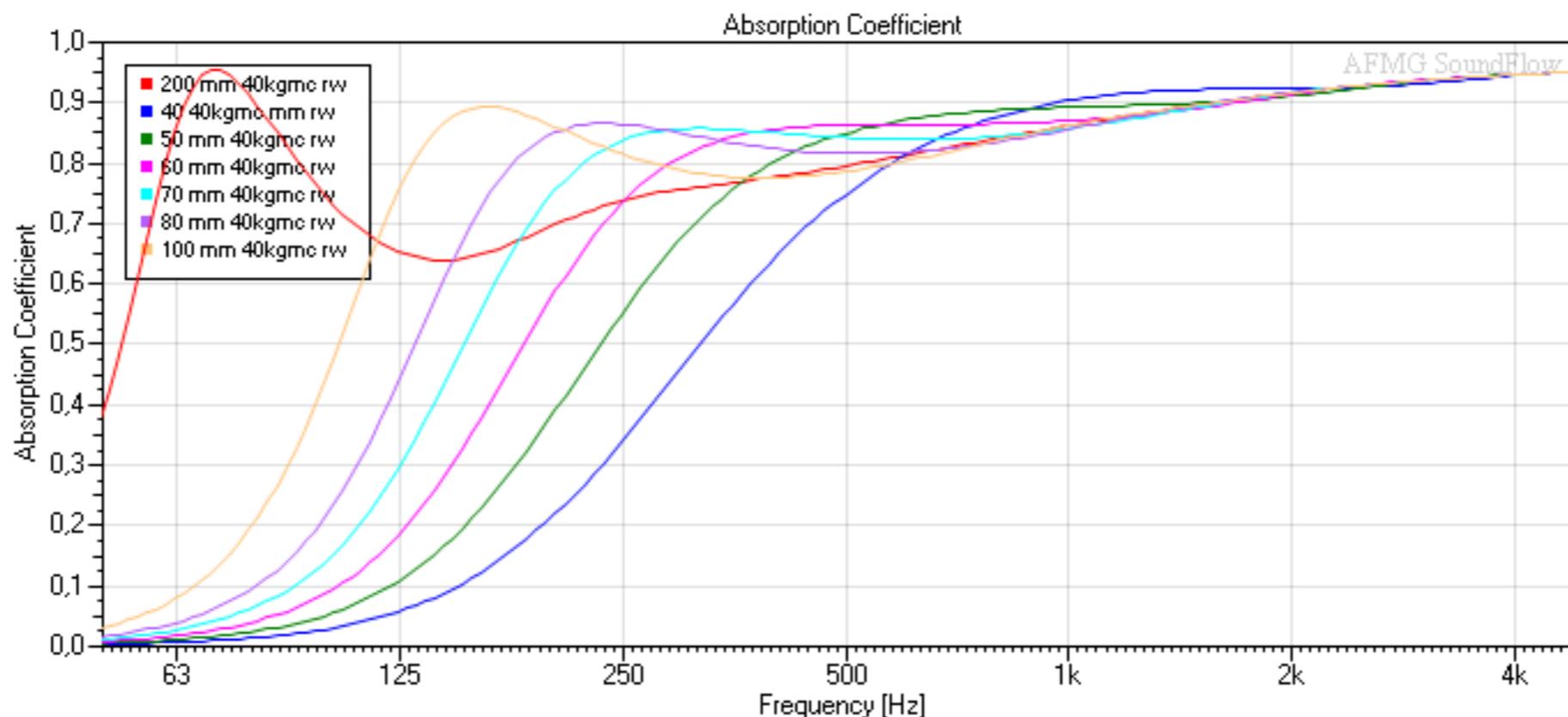


**NO**

Esempio:  
Polietilene,  
poliuretani a cella  
chiusa, polistirolo

# Effetto dello spessore nell'assorbimento

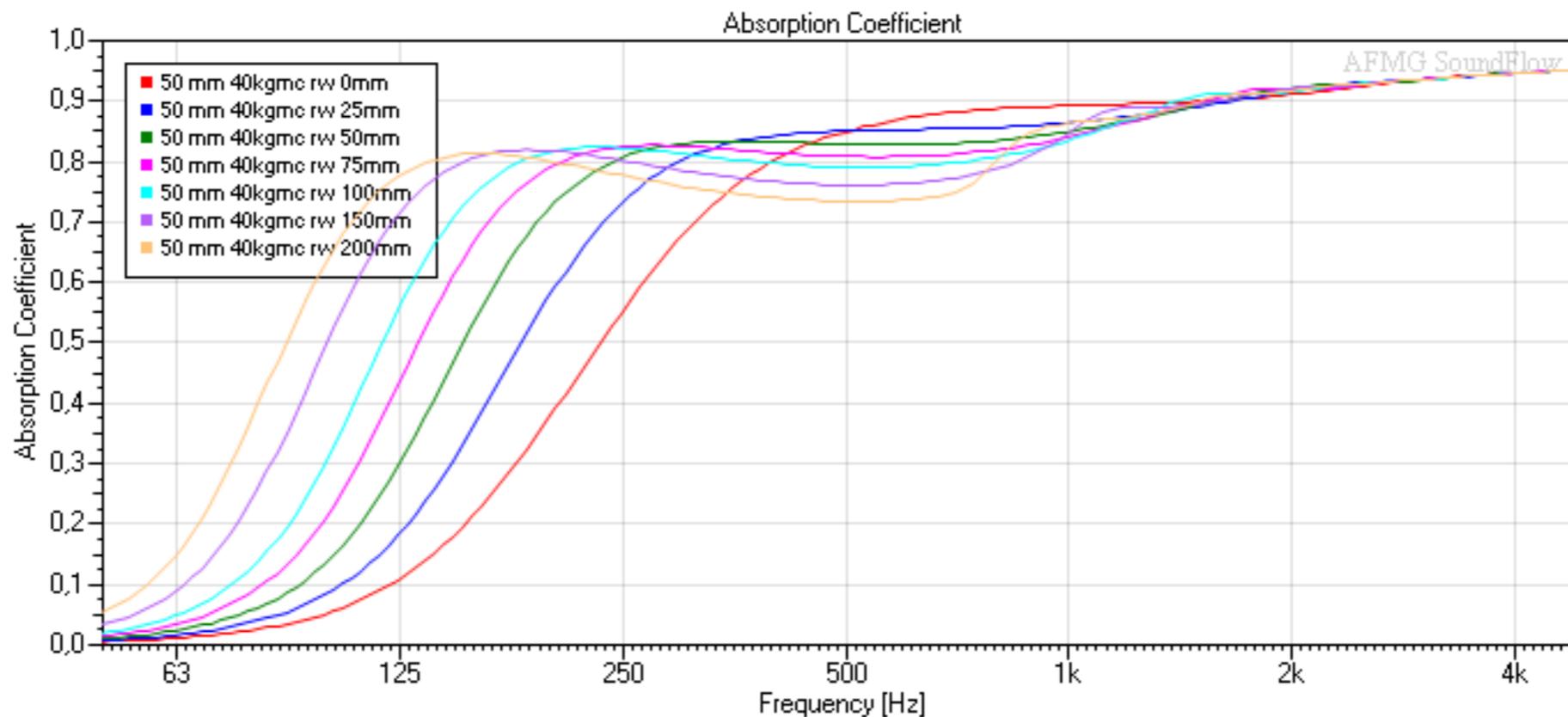
Lo spessore del materiale fonoassorbente aumenta le prestazioni di fonoassorbenza in particolar modo alle basse frequenze.



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

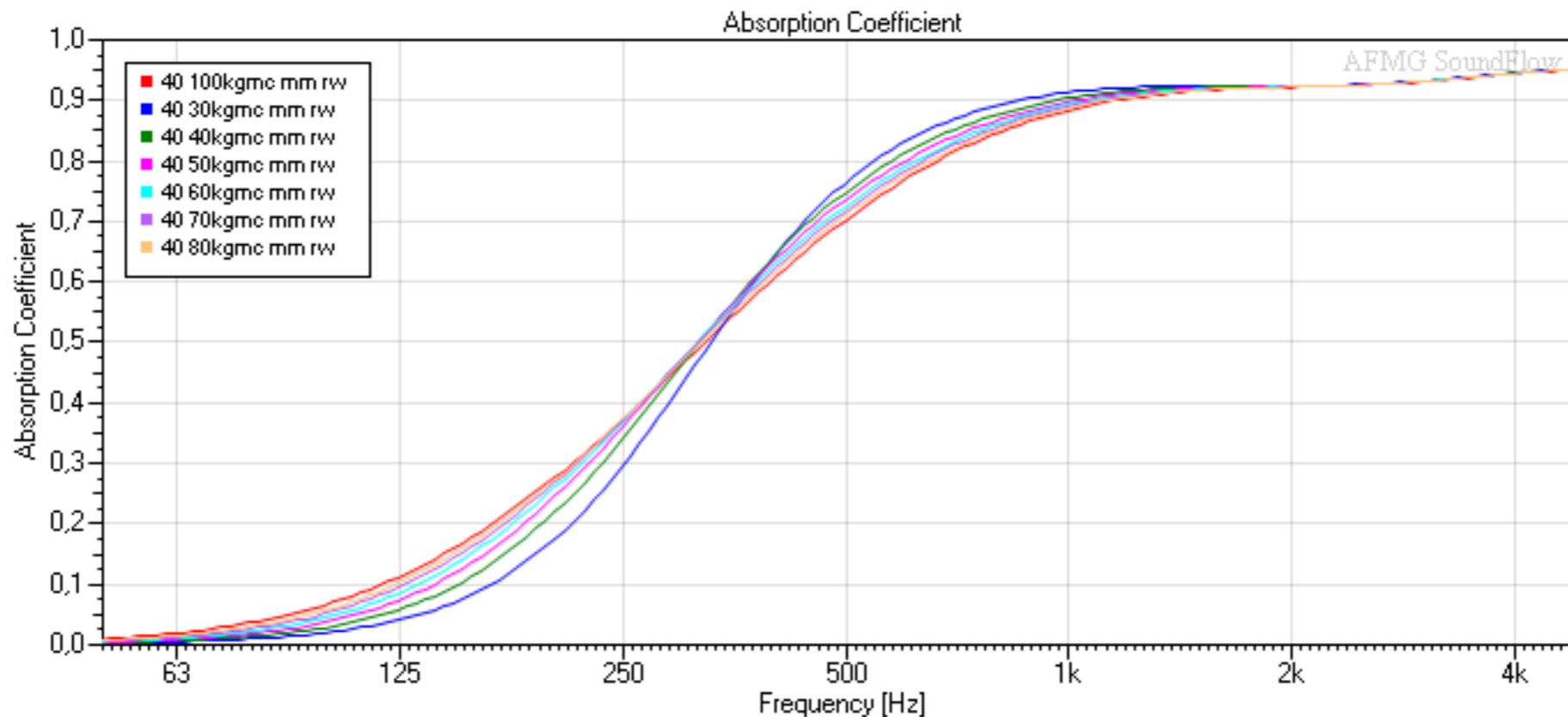
# Effetto della camera d'aria nell'assorbimento

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).

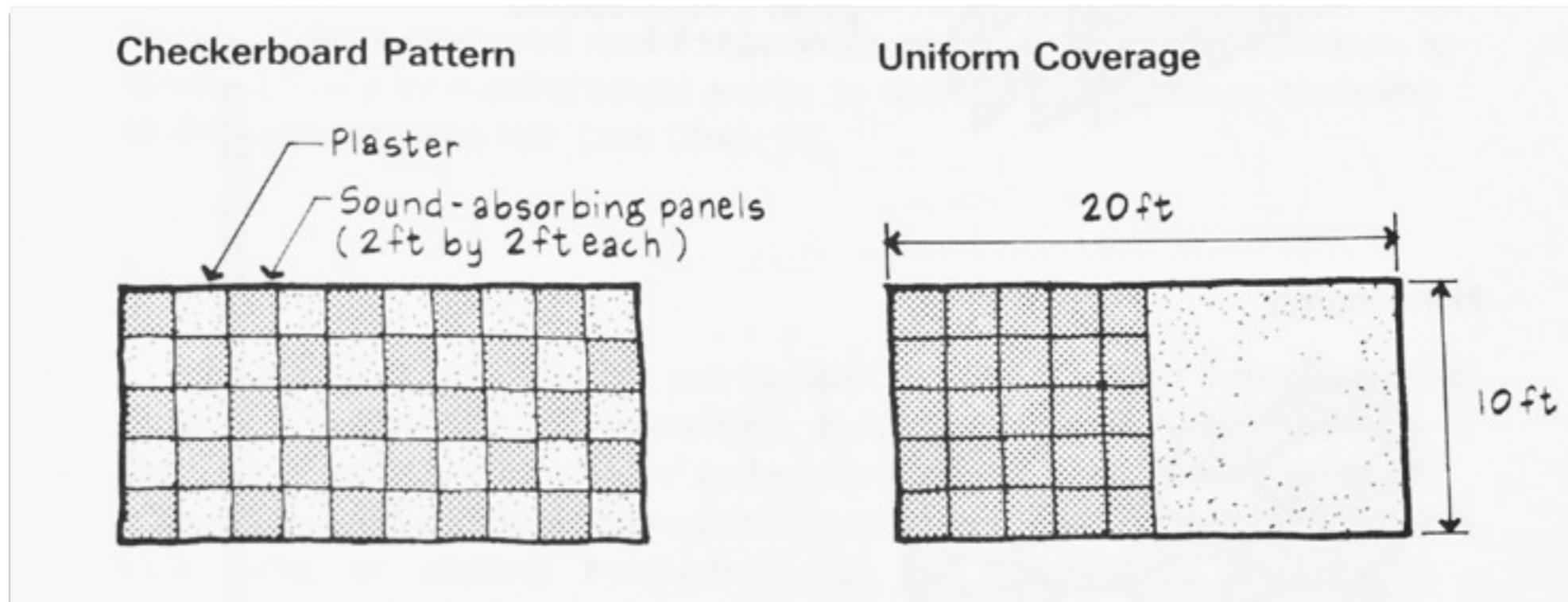


# Effetto della densità nell'assorbimento

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.



# “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.

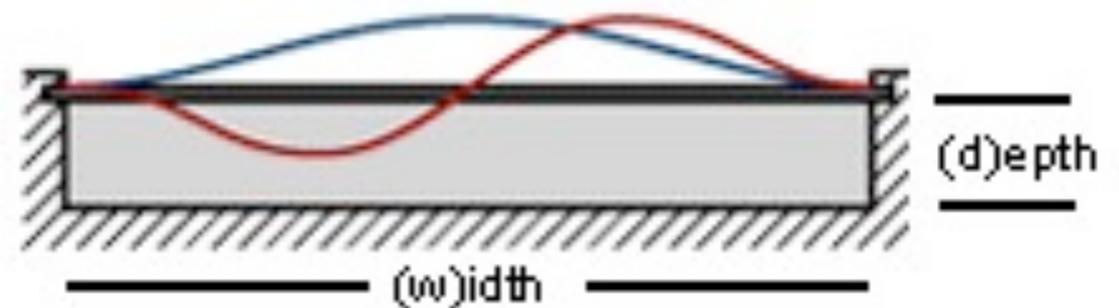
# 2. Assorbitori a membrana

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.

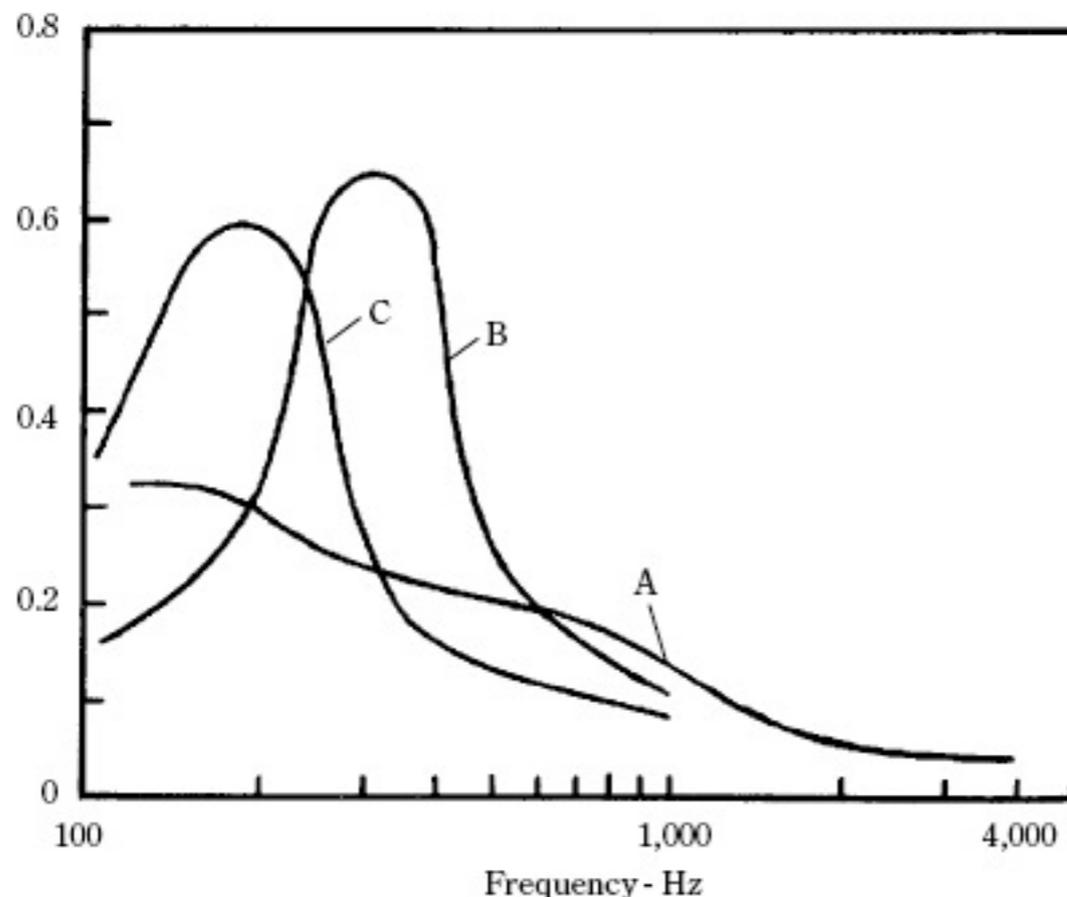
$$f_0 = \frac{62}{\sqrt{\rho_A \cdot d}}$$

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

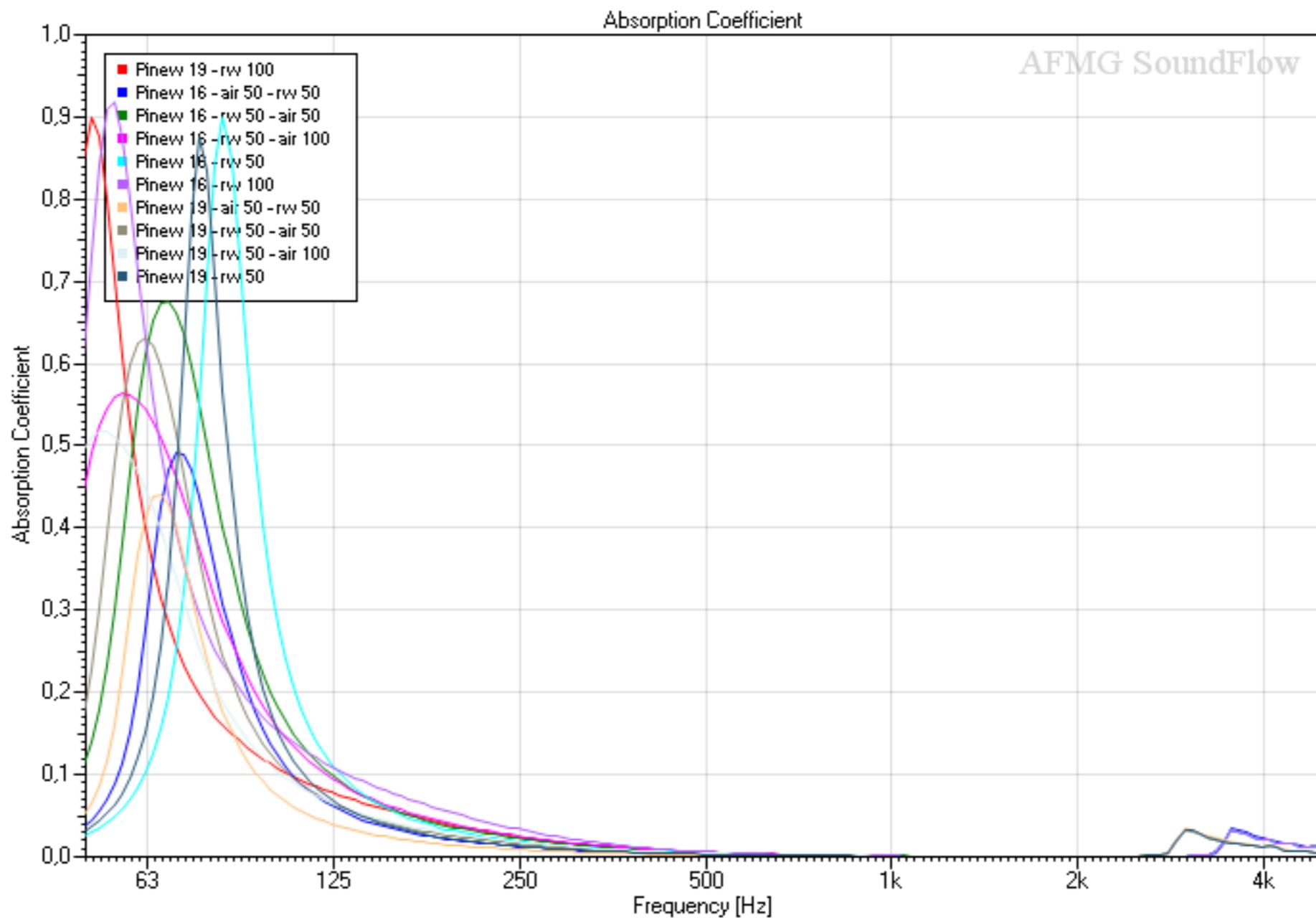
$d$  = spessore della camera d'aria (cm)



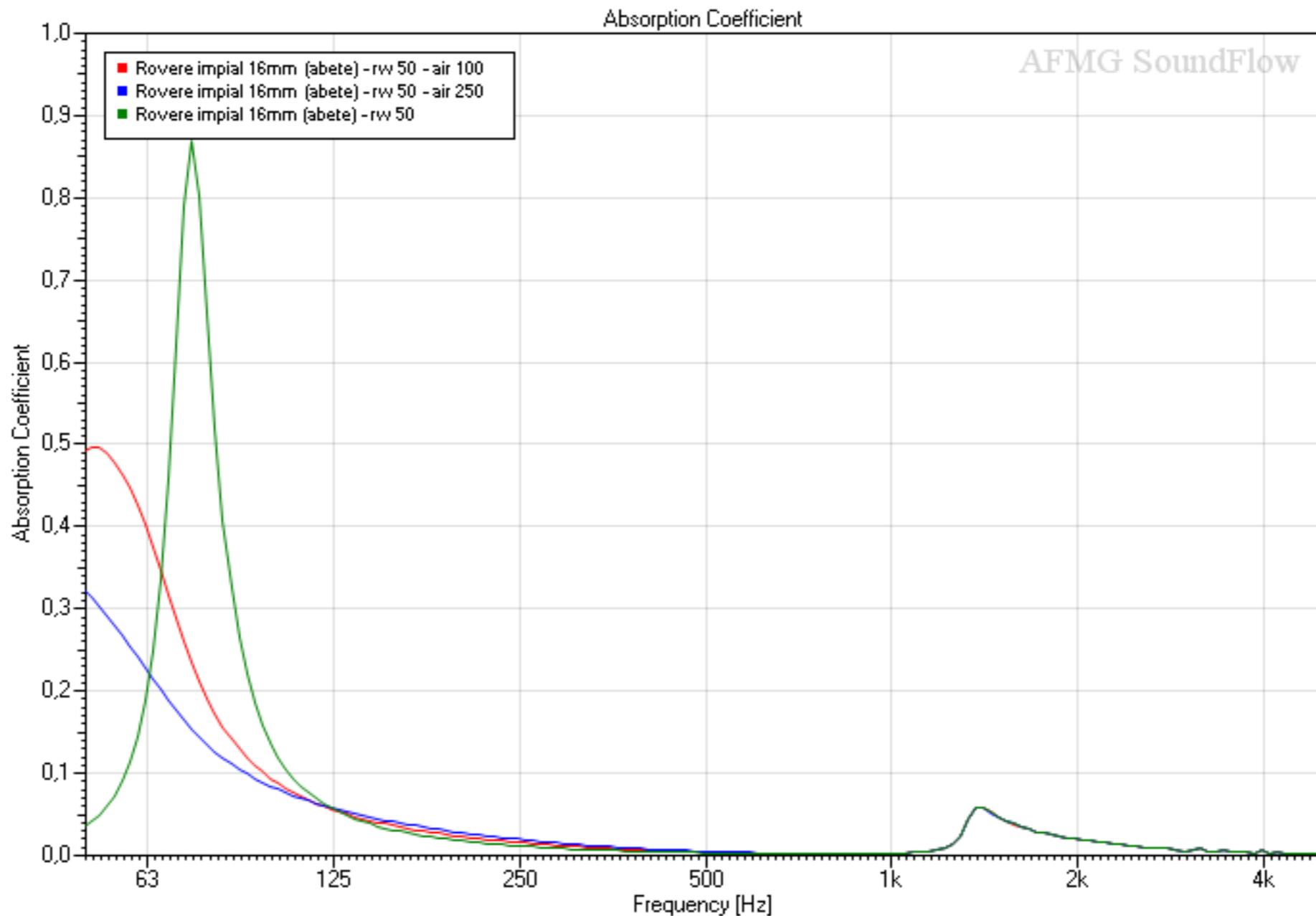
- Sistema massa-aria-massa
- Si assorbe una frequenza particolare
- Se si aggiunge nell'intercapedine del materiale fonoassorbente si può allargare in frequenza la campana per la quale avviene assorbimento
- assorbe parte del suono che trasforma in calore per il flettersi delle sue fibre



- (A) compensato 3/16" con 2" di aria  
 (B) compensato 1/16" con 1" lana di roccia e 1/4" aria  
 (C) come (B) ma per un pannello di 1/8"



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.

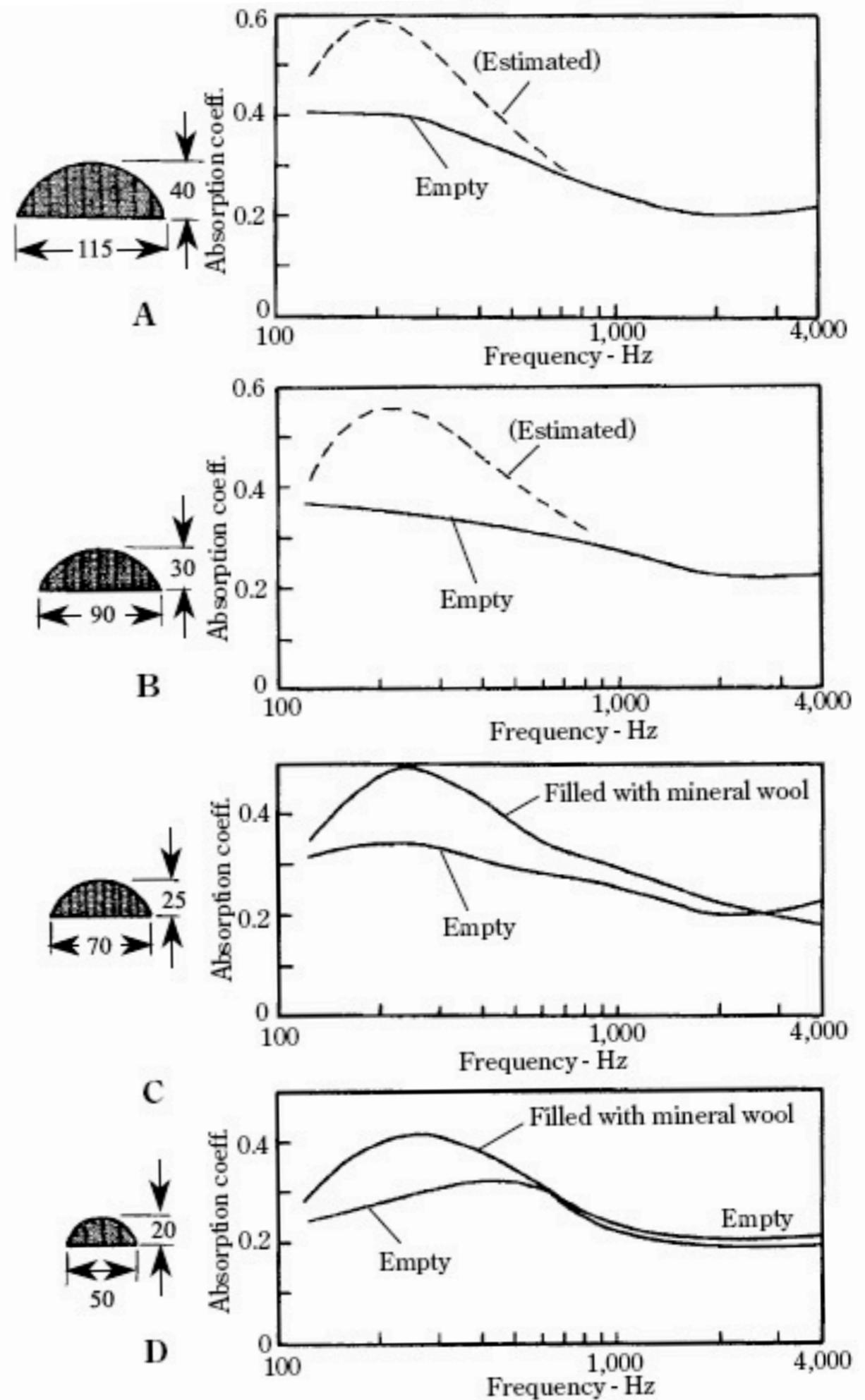


Tre diversi pannelli risonanti in rovere impiallacciato su abete: nella legenda il primo numero indica lo spessore in mm del pannello, la sigla rw indica la lana di roccia e il suo spessore e la sigla air indica la camera d'aria e il suo spessore.

# Assorbitori policilindrici

- sono diffusori (ad alte freq.) e assorbitori (alle medio-basse)
- la frequenza propria dei policilindrici è approssimativamente 125 Hz più alta di quella relativa ad un pannello piatto con le stesse caratteristiche (densità, spessore)
- Il policilindrico inoltre irradia il suono con un angolo di circa 120° contro i 20° 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

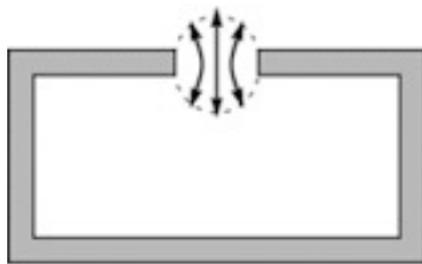


# 3. Assorbitori per Risonanza

- 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

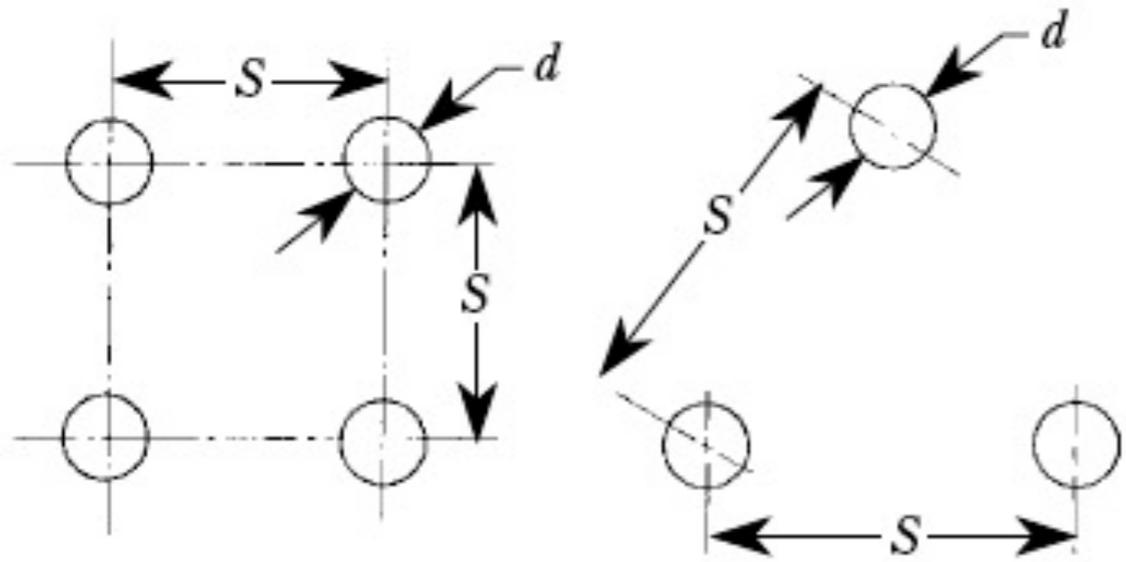
- Possiamo vedere questa struttura come un sistema di risonatori accoppiati.
- Se il suono giunge perpendicolare al pannello perforato, tutti i piccoli risonatori sono in fase. Per le onde sonore che arrivano dal lato, l'assorbimento è meno efficiente. Questa perdita può essere minimizzata sezionando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

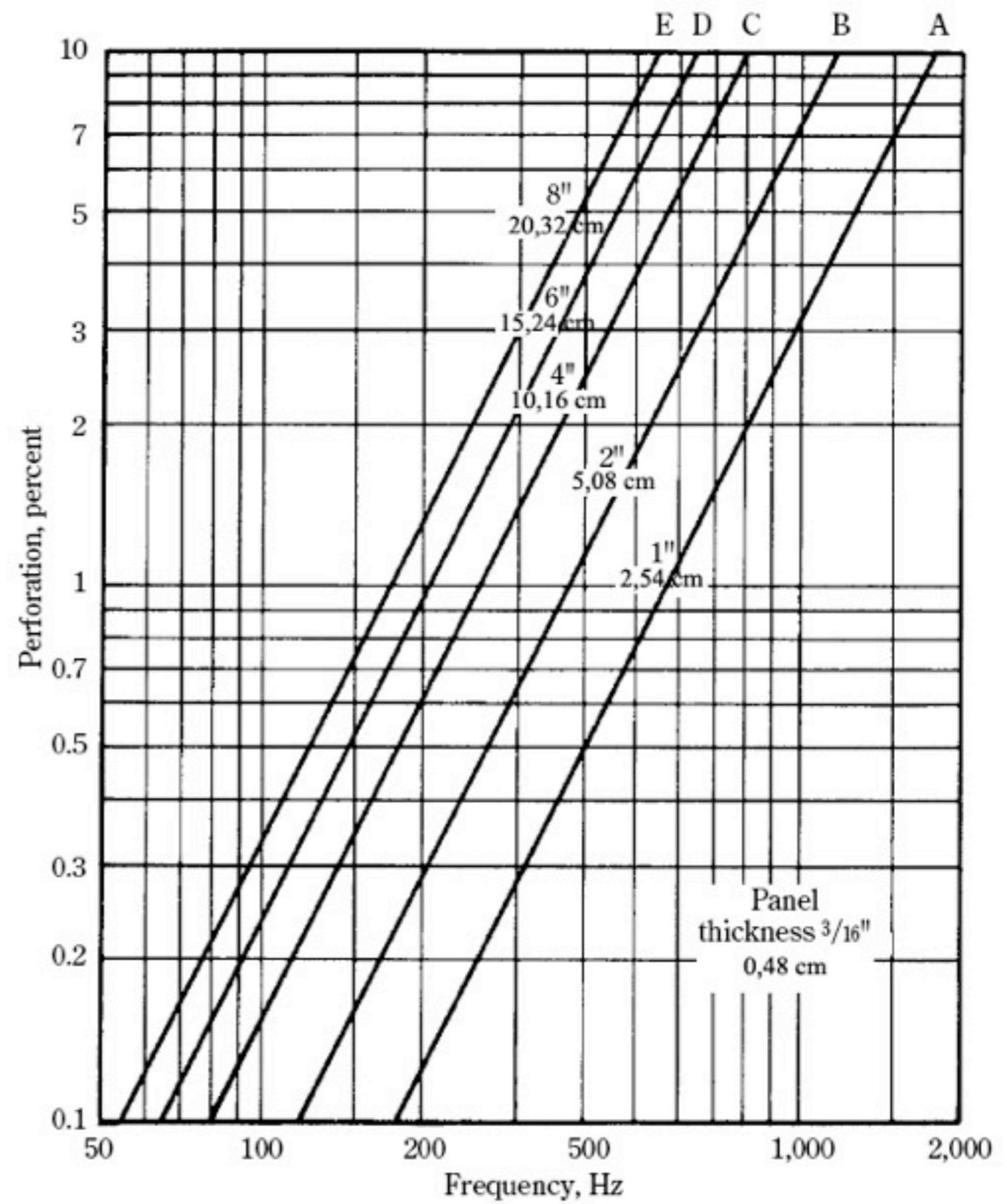
$t$  [cm] = lunghezza effettiva dei buchi, con fattore di correzione applicato (spessore pannello + 0.8 x diametro buco)

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



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

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



# 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]

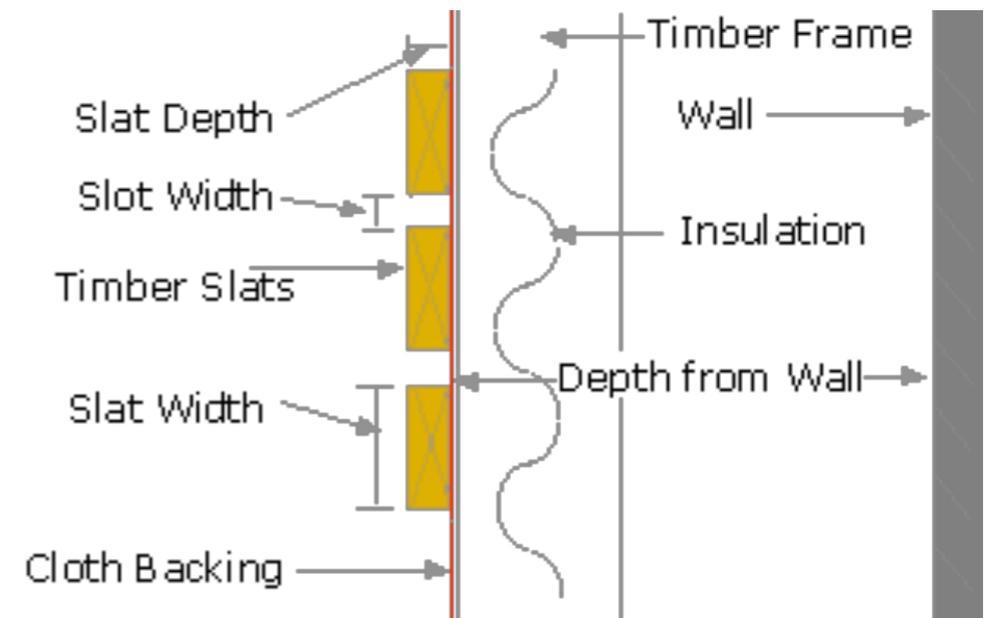
1.2 = mouth correction [cm]

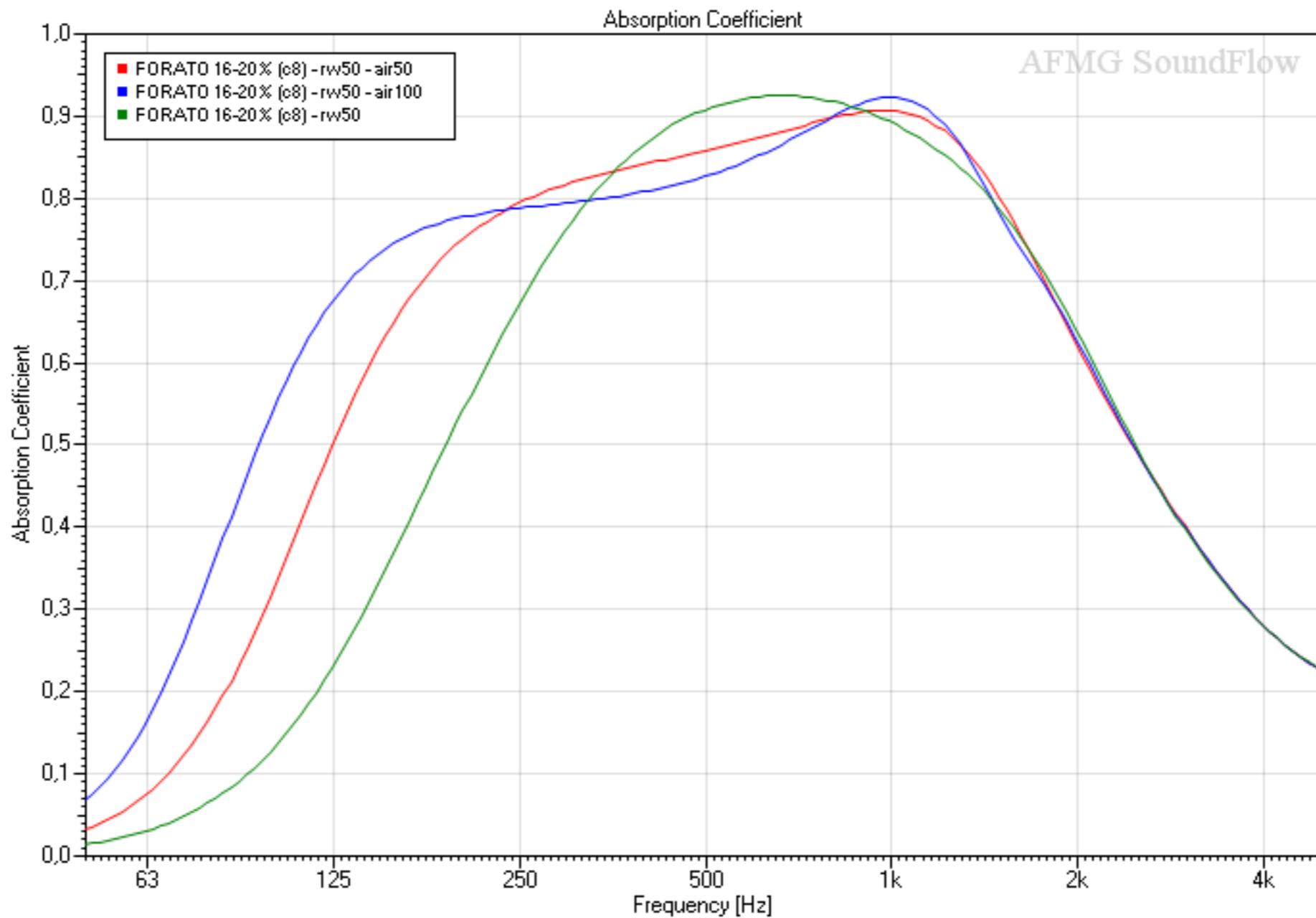
$D$  = cavity depth [cm]

$w$  = slat width [cm]

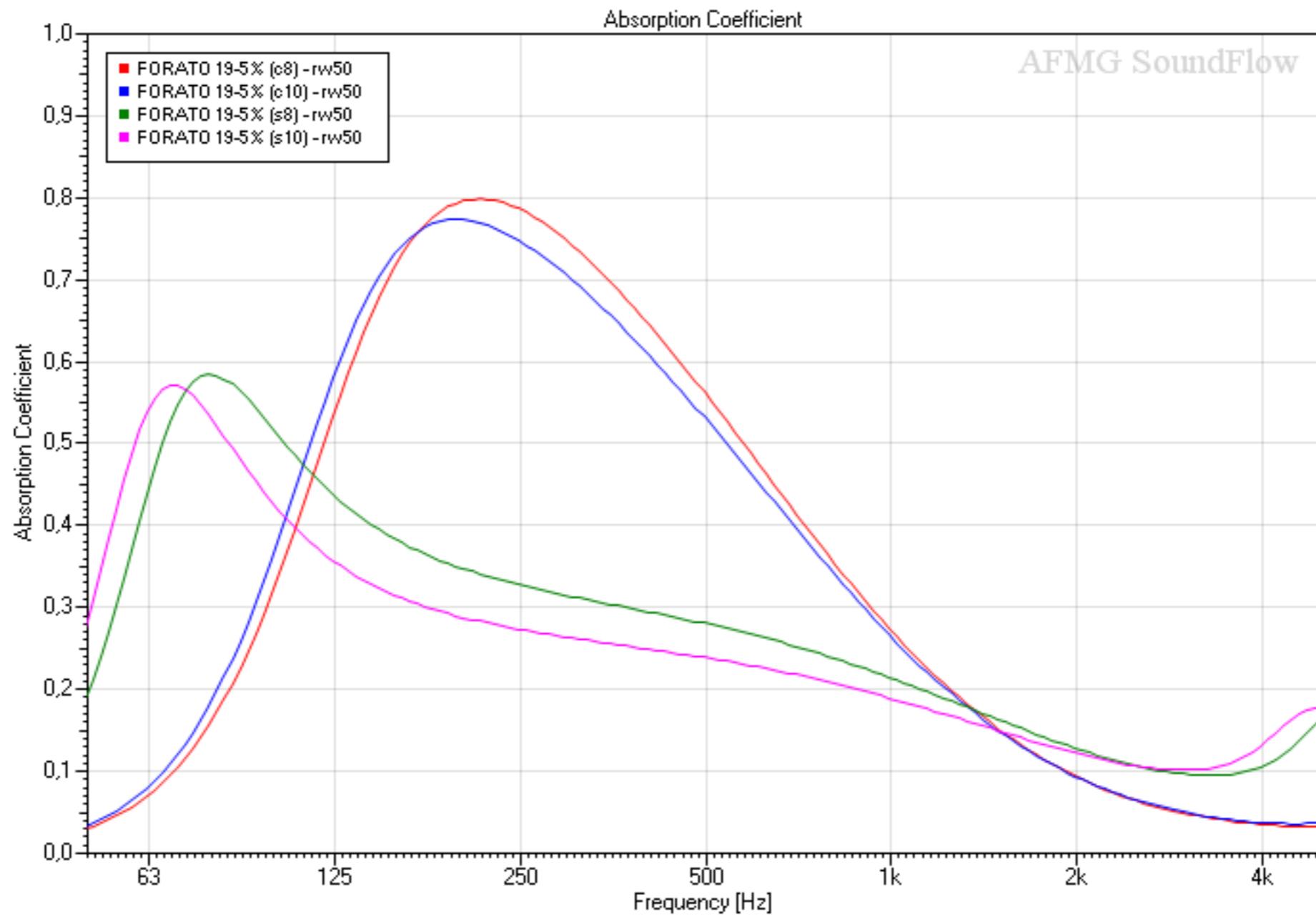
5469 =  $c/(2*\pi)$

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

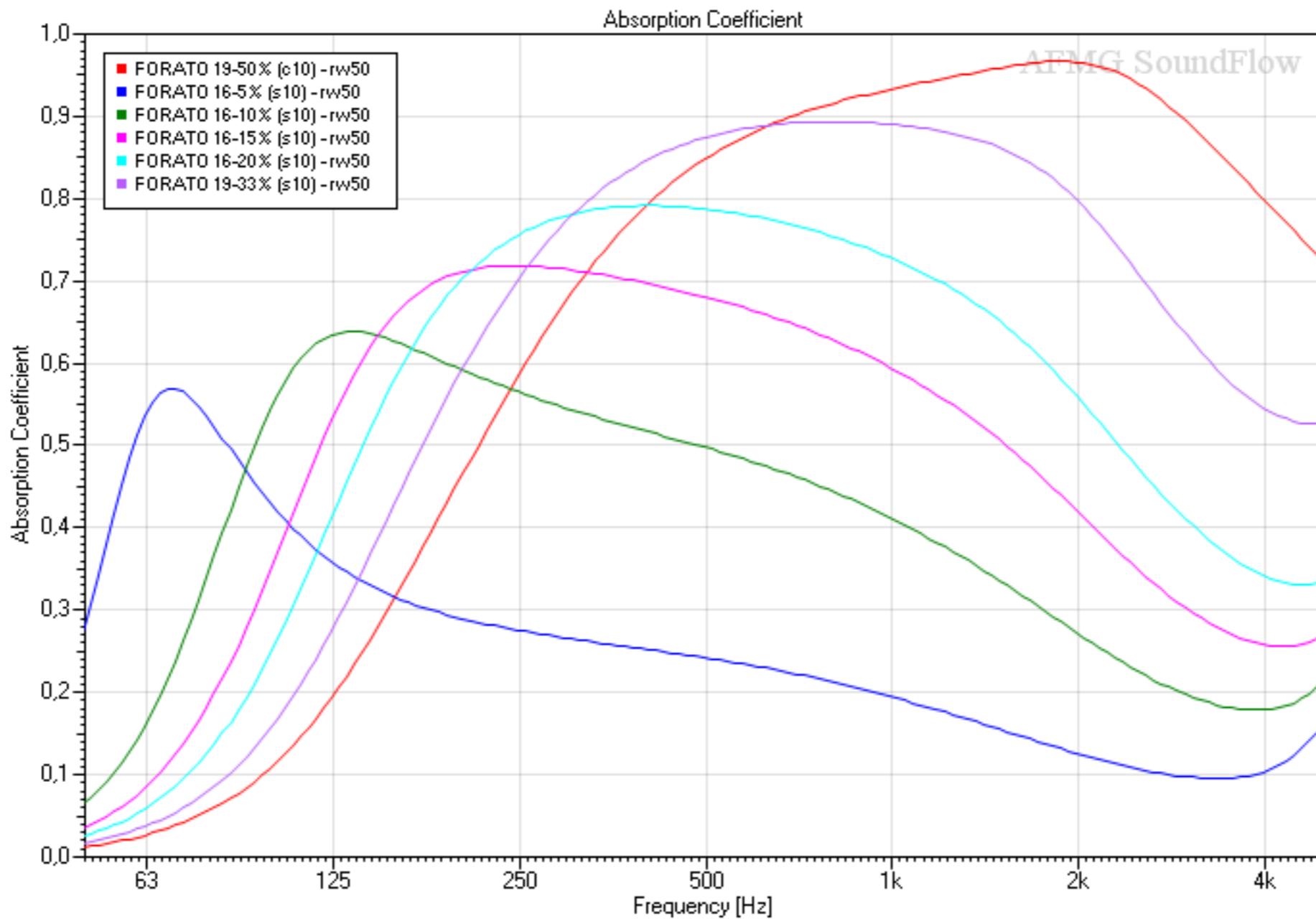




Tre diversi pannelli forati risonanti di stesso spessore (16 mm) e % e tipo di foratura (20% a stecche), montaggio diverso: la sigla rw indica la lana di roccia e il suo spessore e la sigla air indica la camera d'aria e il suo spessore.



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).

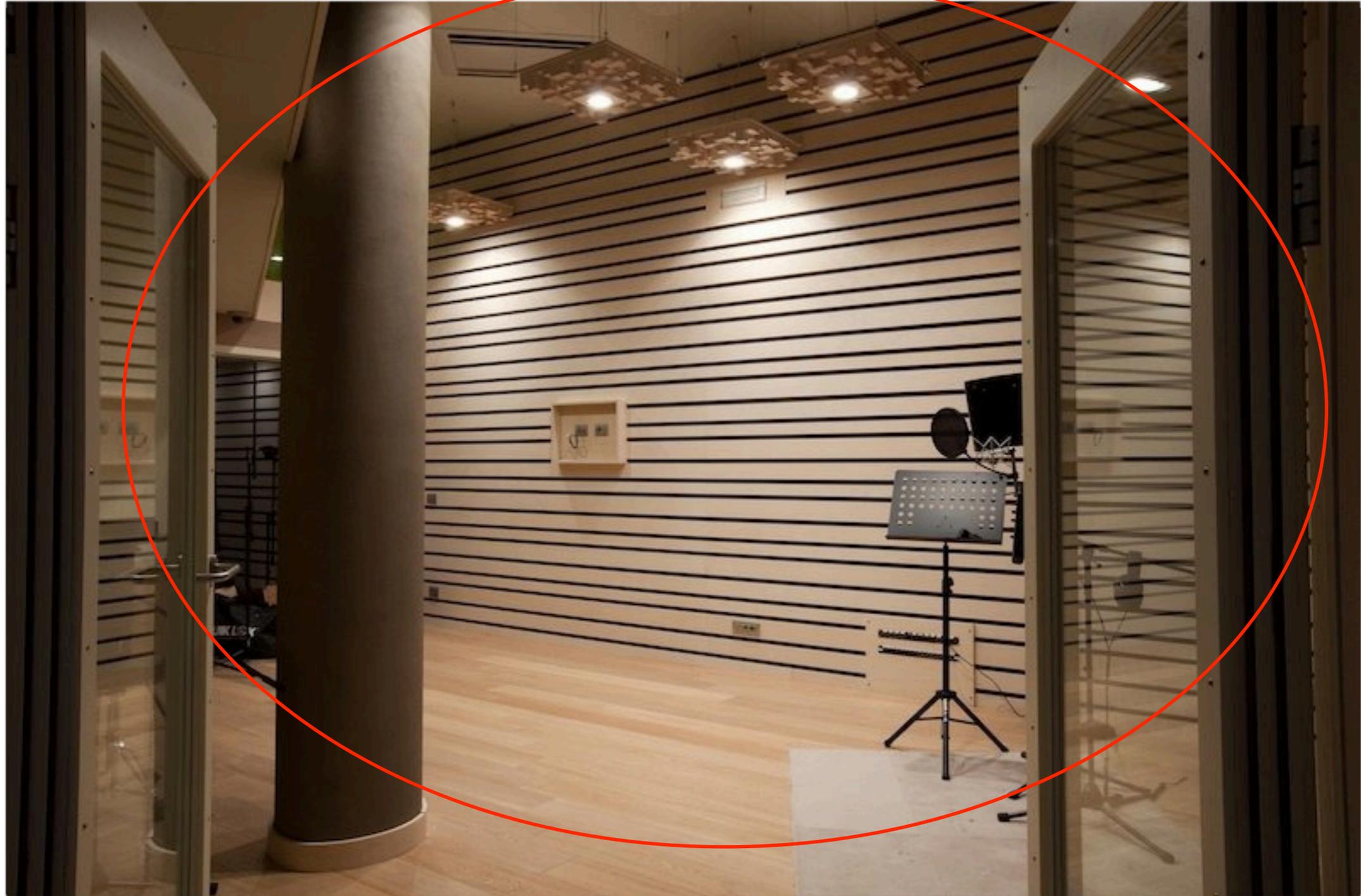


Pannelli forati risonanti [stesso montaggio e materiale fonoassorbente (lana di roccia 50 mm), cambia la percentuale di foratura, il tipo (c = circolare, s = a stecche) e lo spessore del pannello]: nella legenda il primo numero indica lo spessore in mm del pannello, poi c'è la percentuale di foratura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

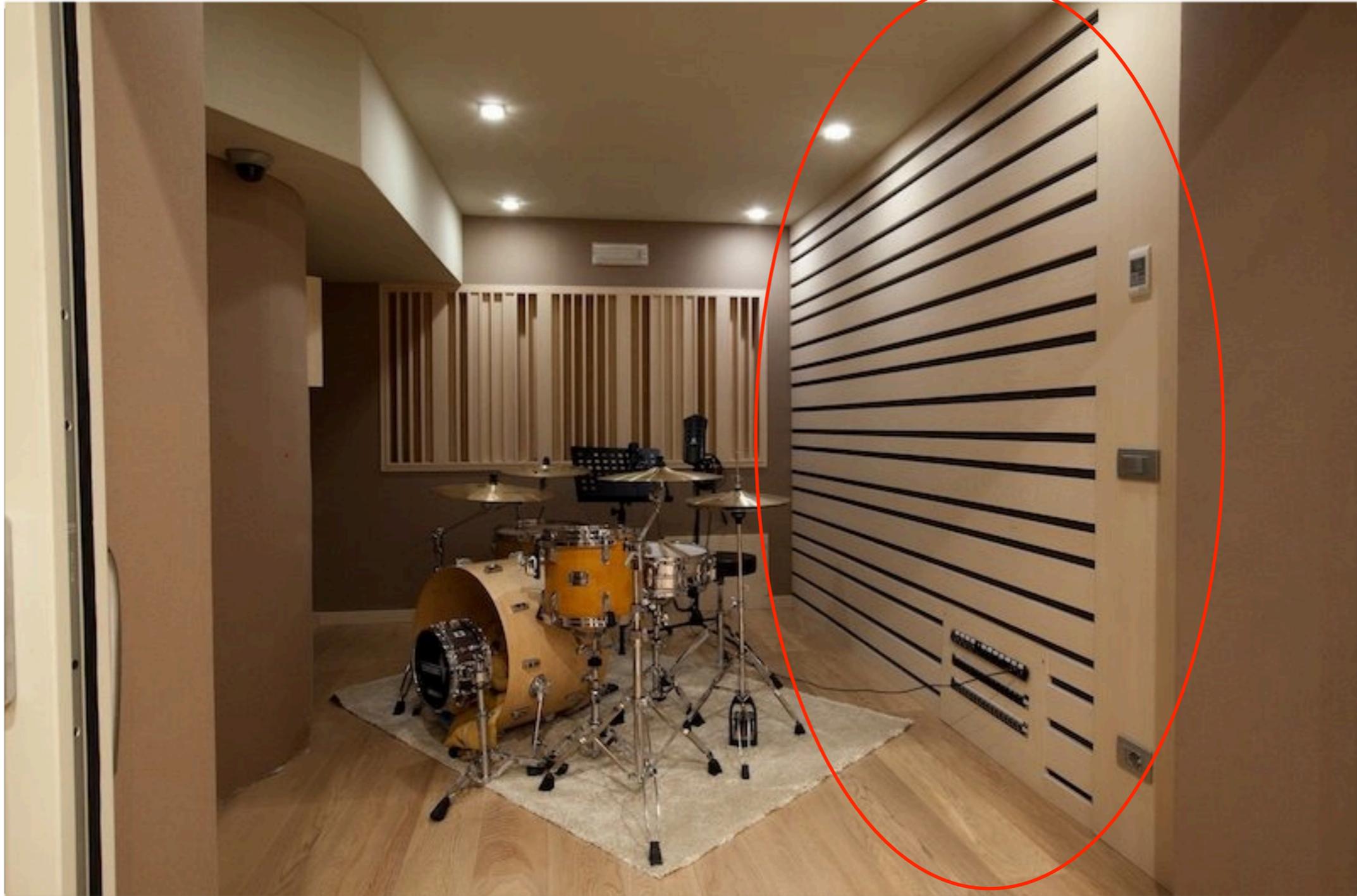
# Esempi di assorbitori forati e a stecche:



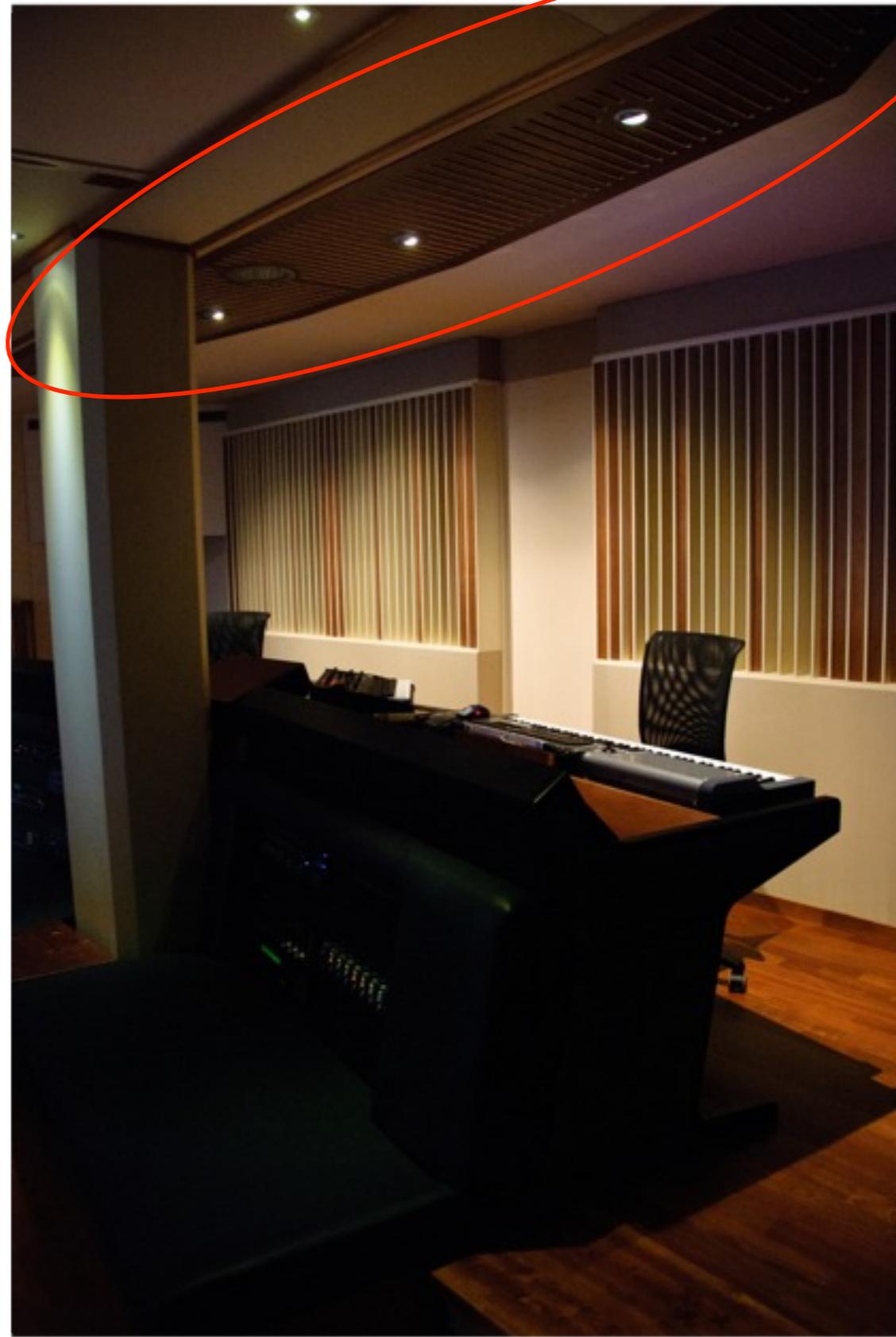
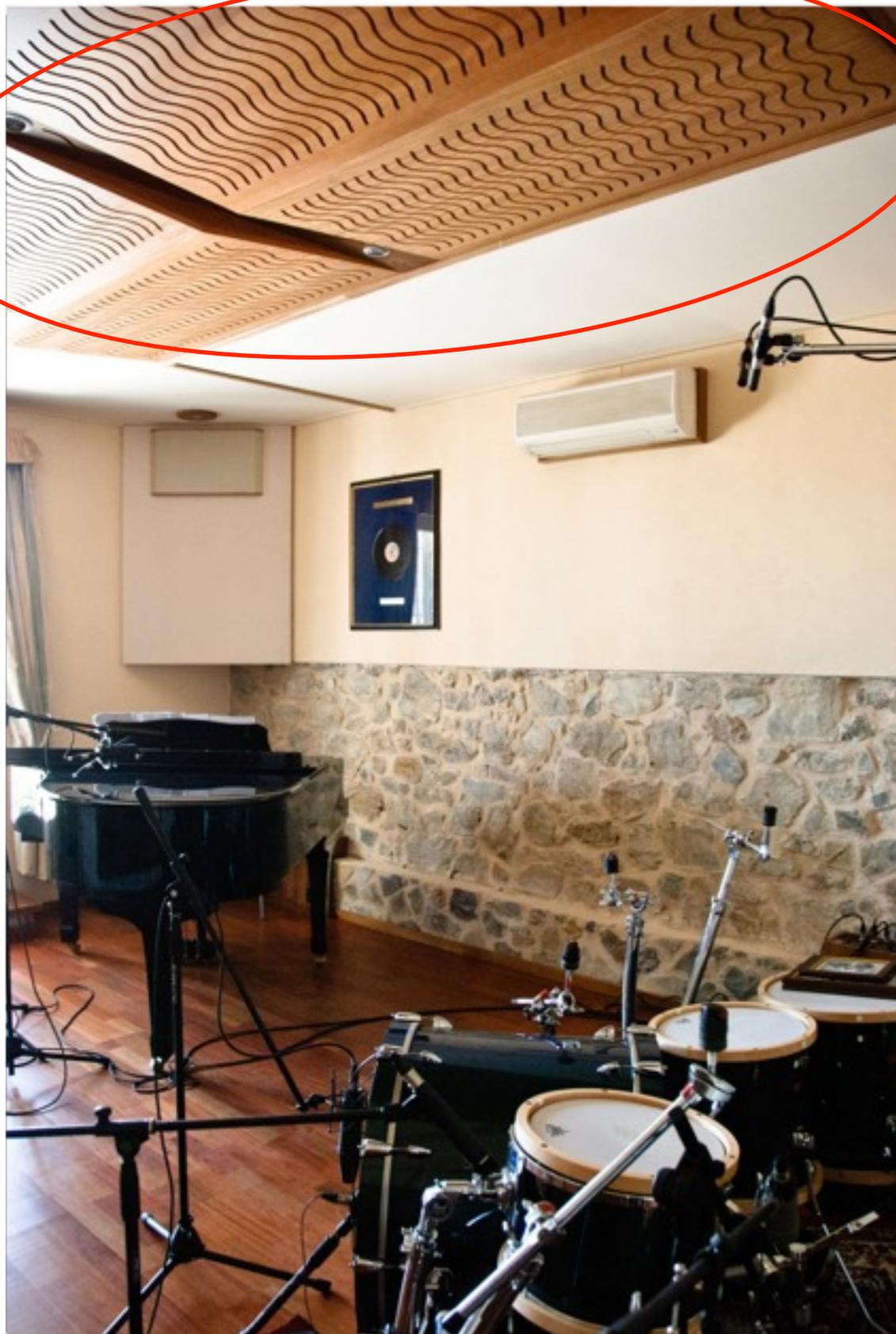
# Esempi di assorbitori a stecche:



# Esempi di assorbitori a stecche:



# Esempi di assorbitori forati e a stecche:

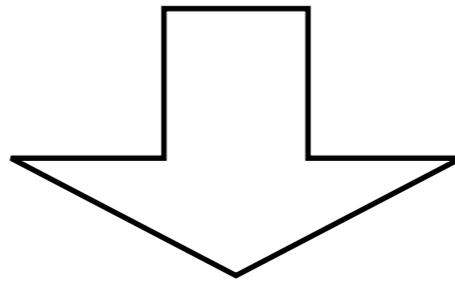


# Esempi di assorbitori forati e a stecche:



# Onde Acustiche

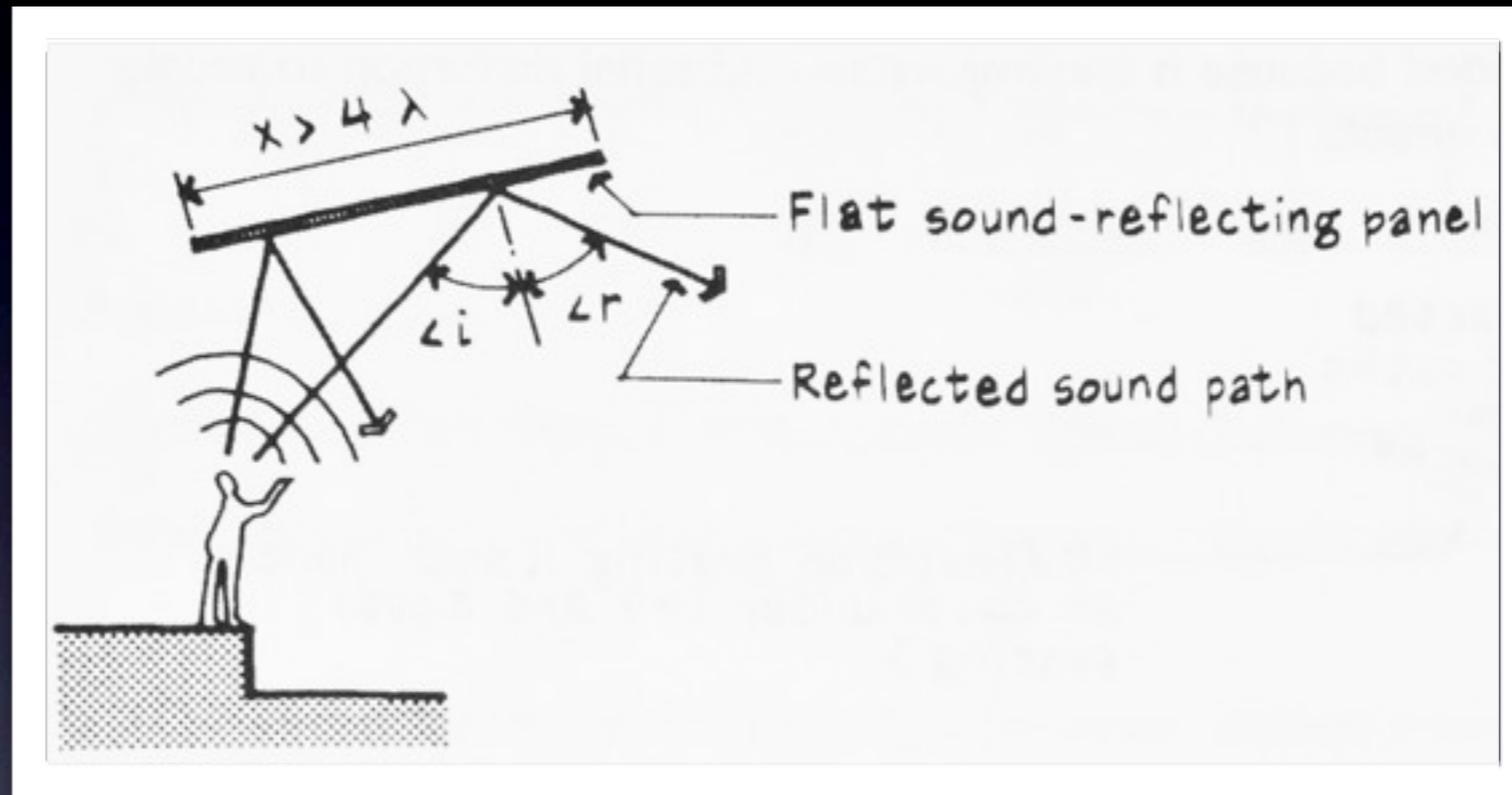
Il suono è un fenomeno di tipo ondulatorio



è soggetto ai tipici comportamenti ondulatori:

Riflessione  
Rifrazione  
Diffrazione  
Interferenza

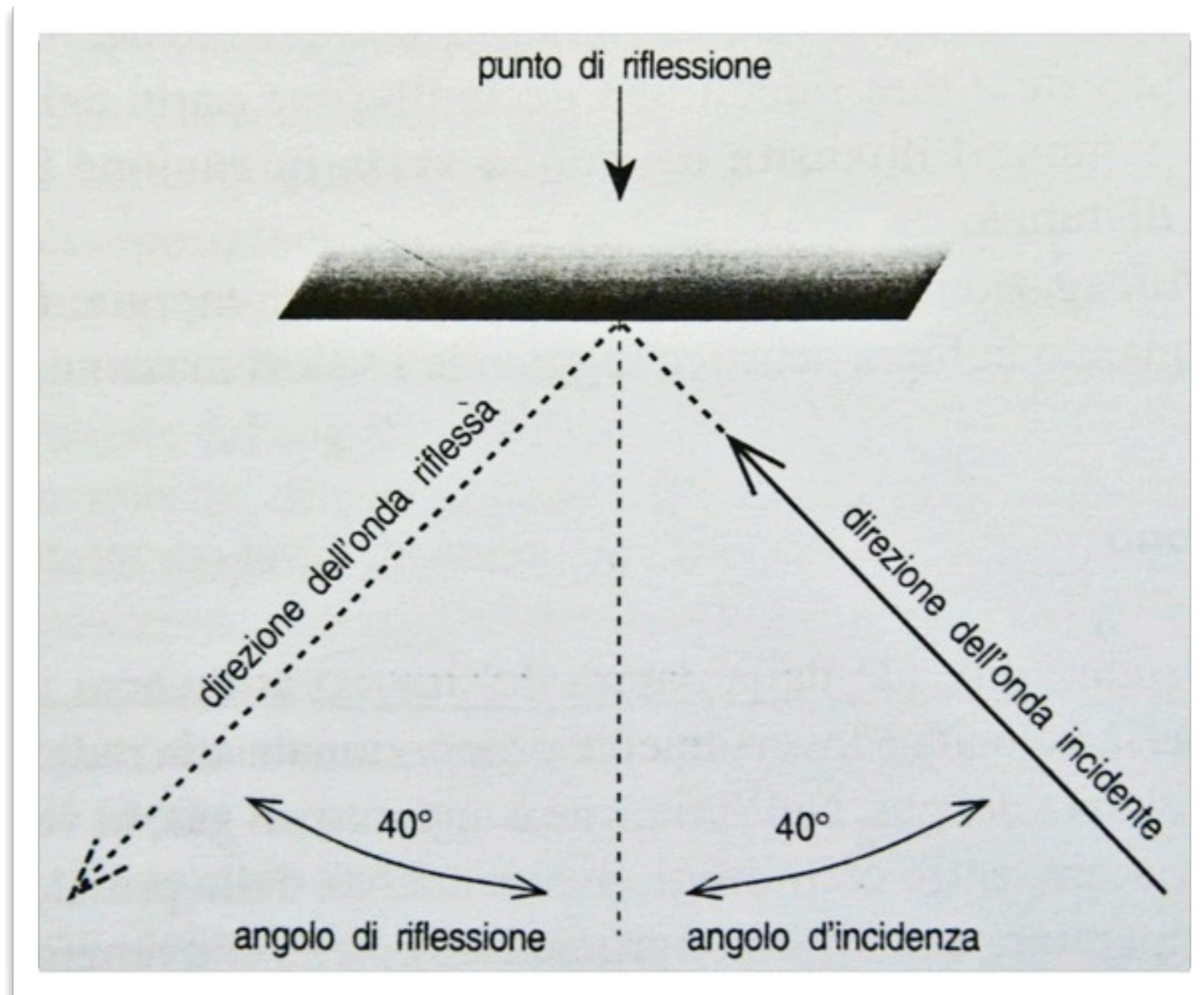
# Riflessione acustica



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  $r$ .

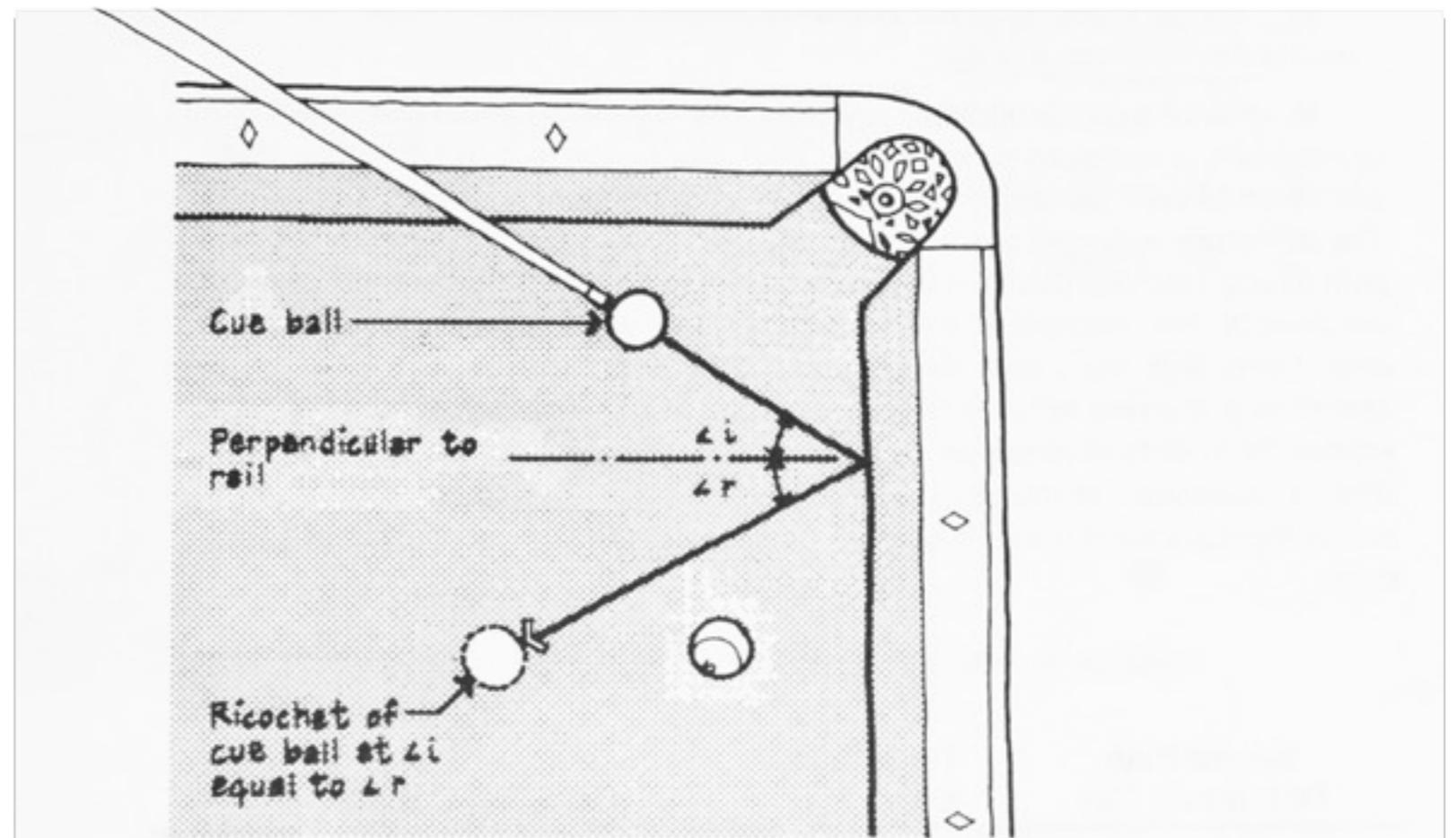
Ad esempio, essendo 0,343 m la lunghezza d'onda di un'onda acustica di 1000 Hz, una superficie di  $4\lambda \times 0,343 \text{ m} = 1,372 \text{ m}$  rifletterà onde con frequenze di 1000 Hz e superiori.

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:

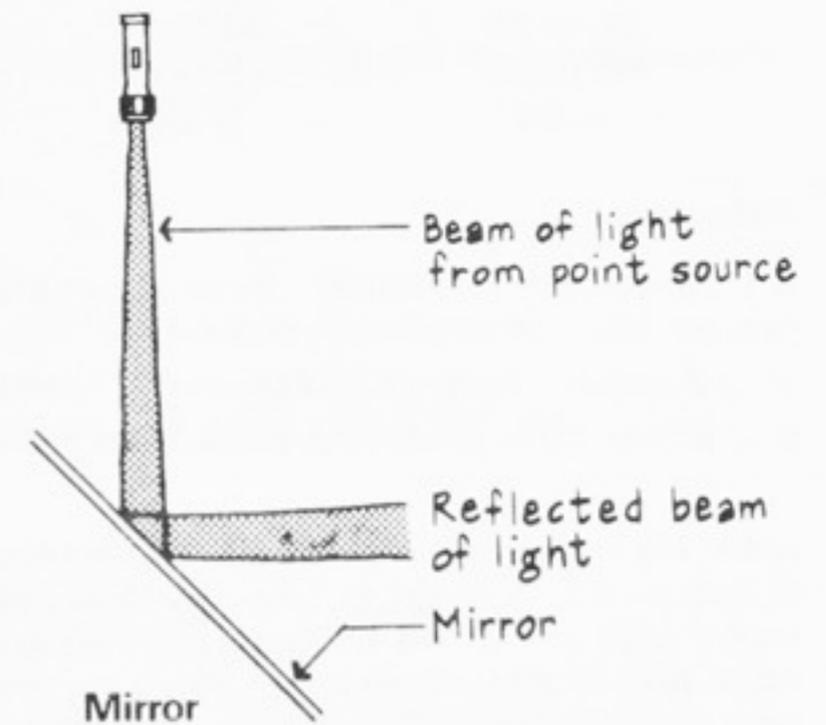


Dalle caratteristiche della superficie riflettente, dipende l'intensità e la qualità della riflessione. In ogni caso, la parte di energia che non viene riflessa è assorbita oppure rifratta.

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



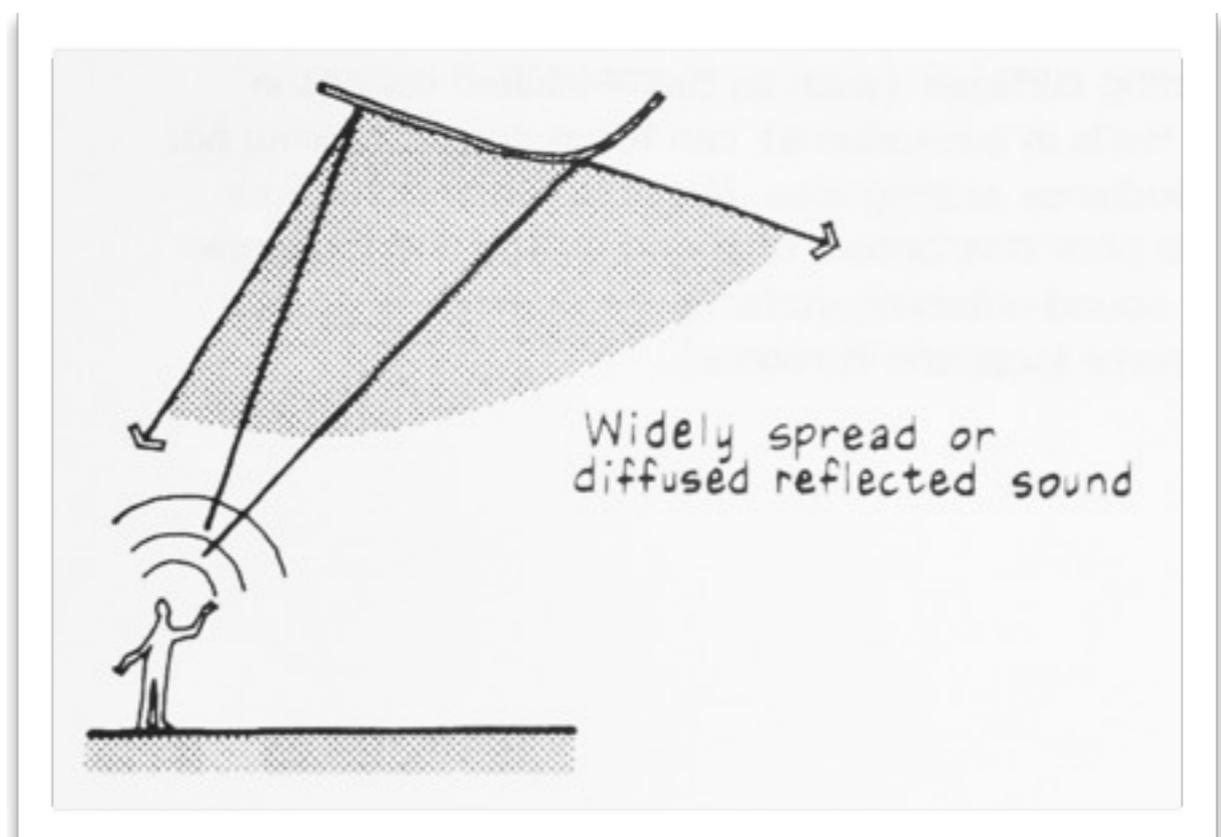
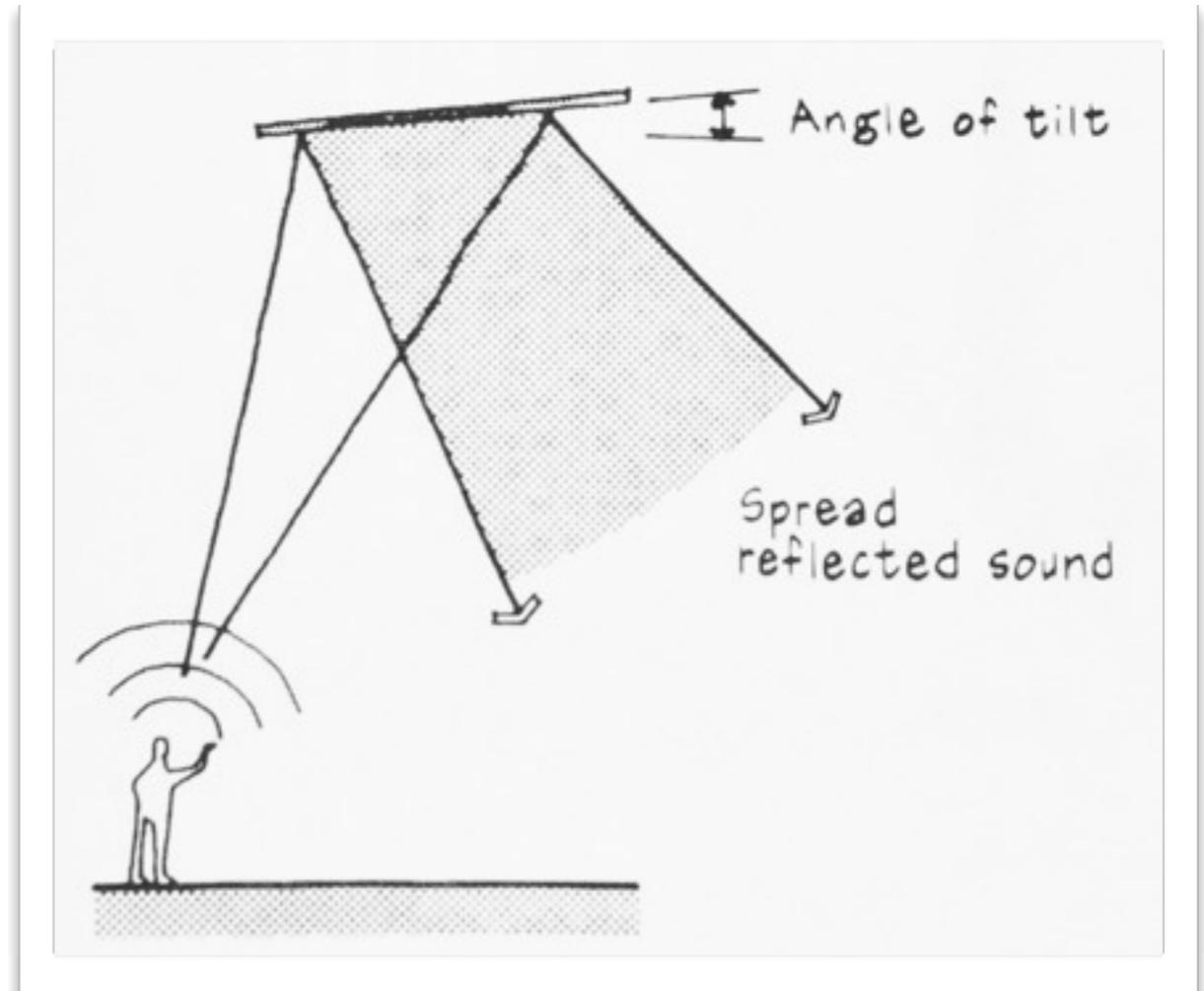
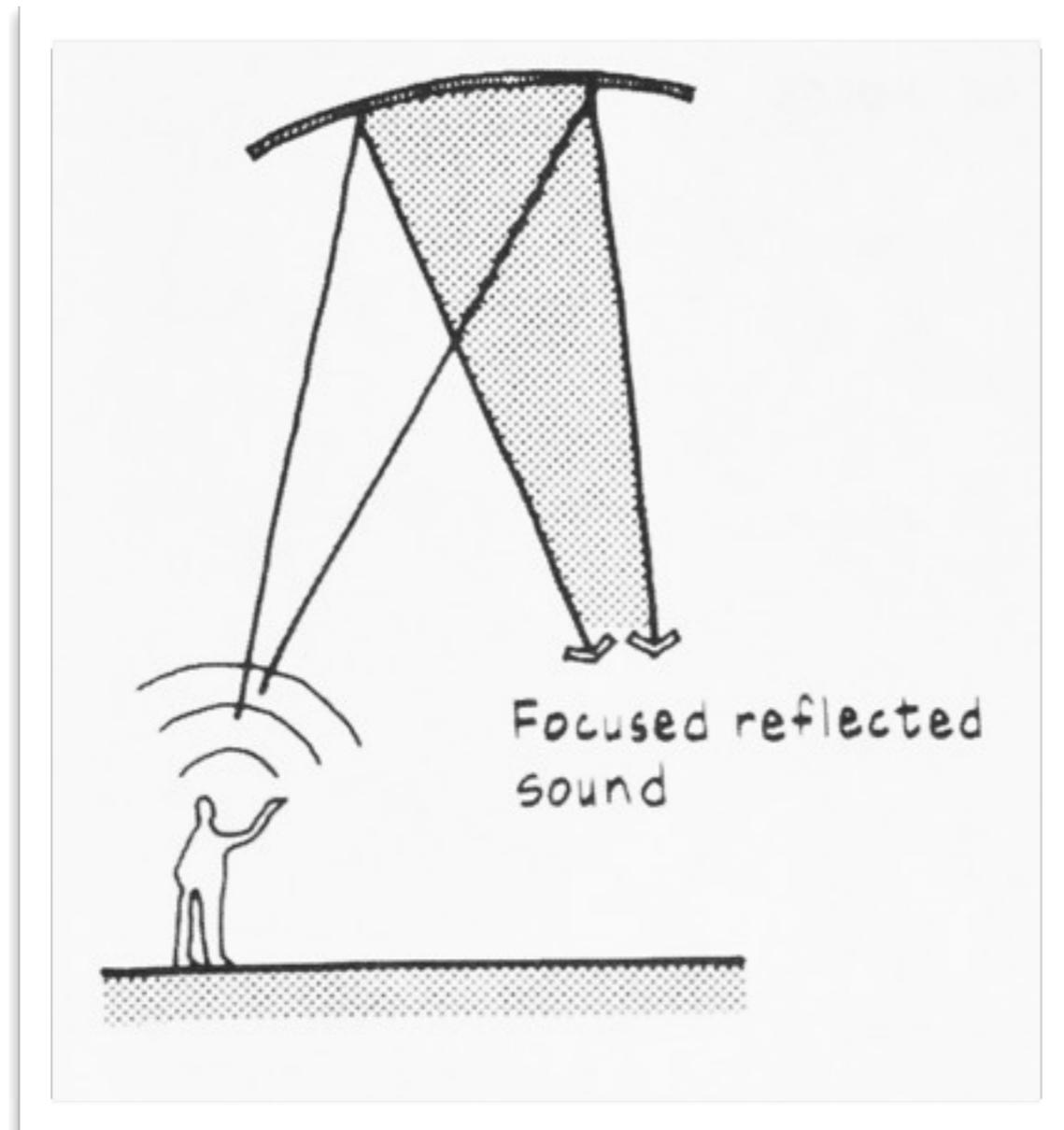
Billiard Table



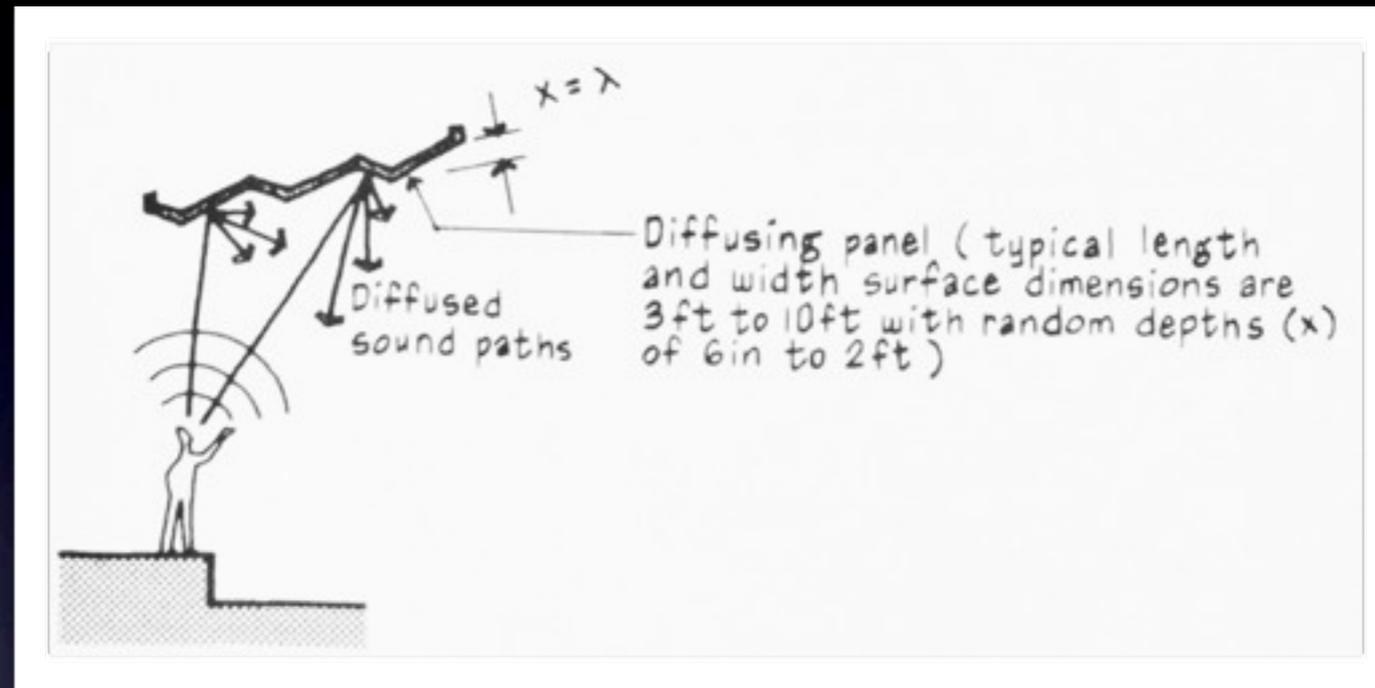
La riflessione speculare è molto utile per indirizzare le riflessioni dove vogliamo noi.

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

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



# Diffusione acustica

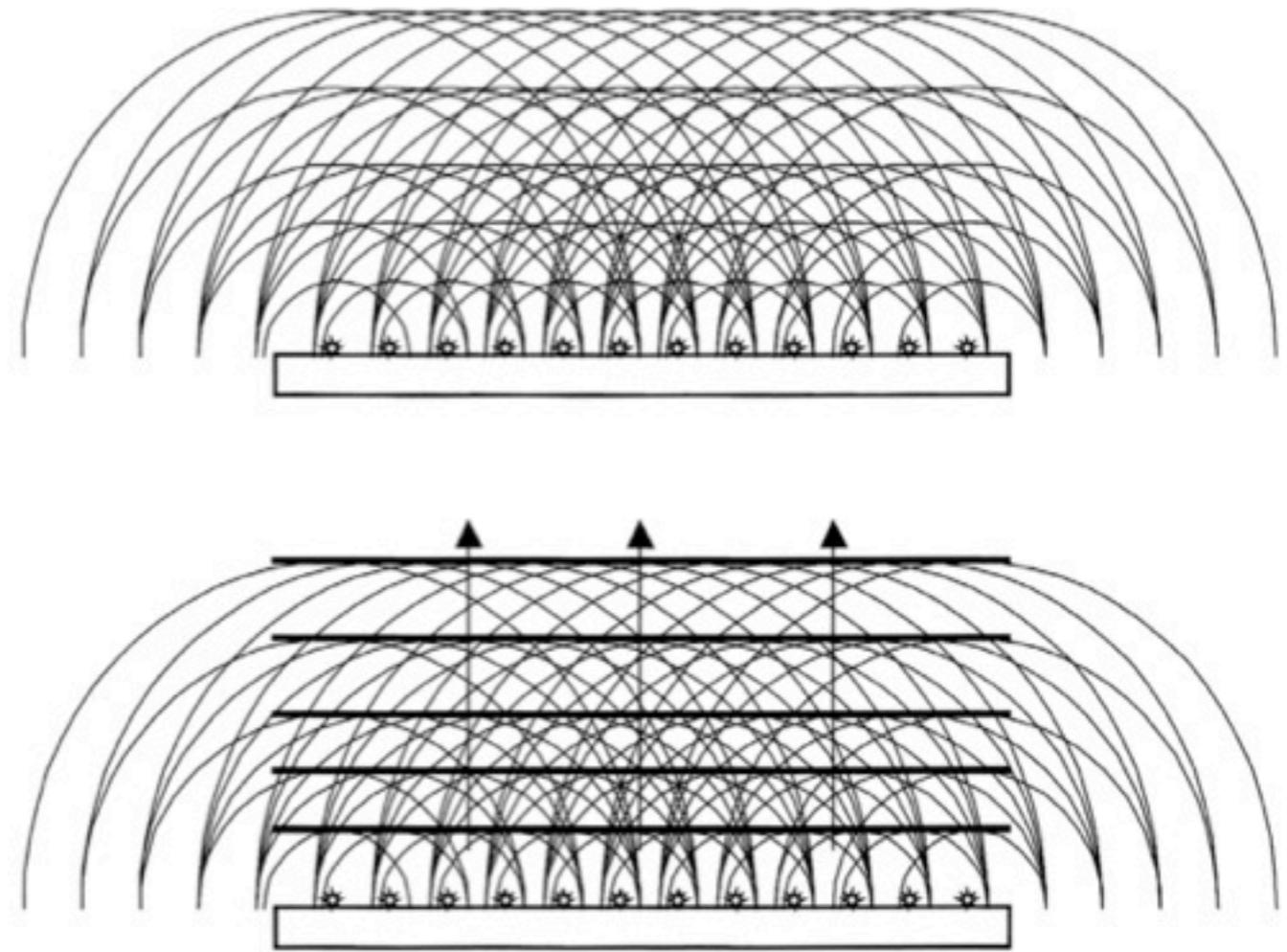


La diffusione acustica è la redistribuzione random (o “scattering”) di un’onda sonora da una superficie.

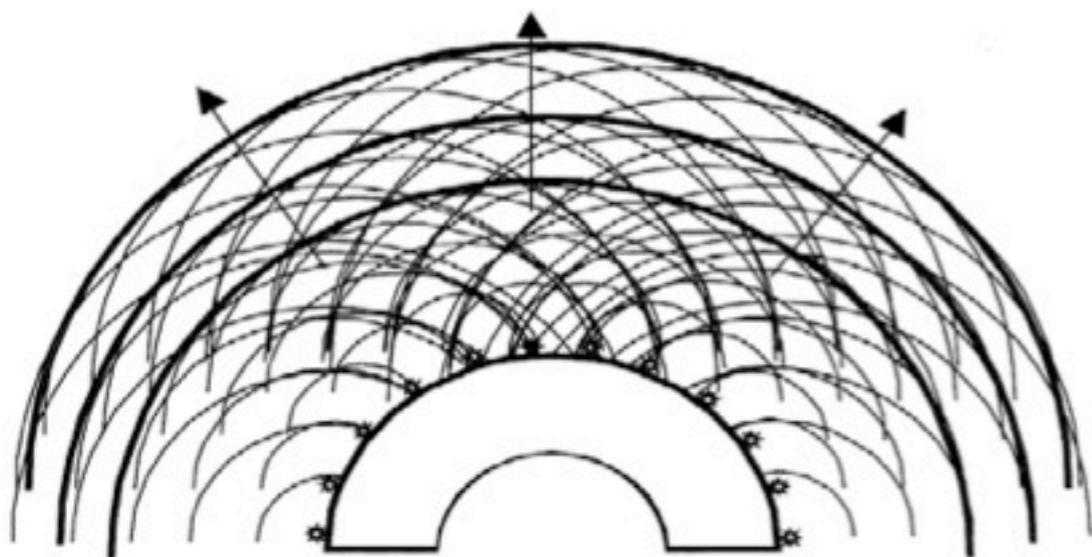
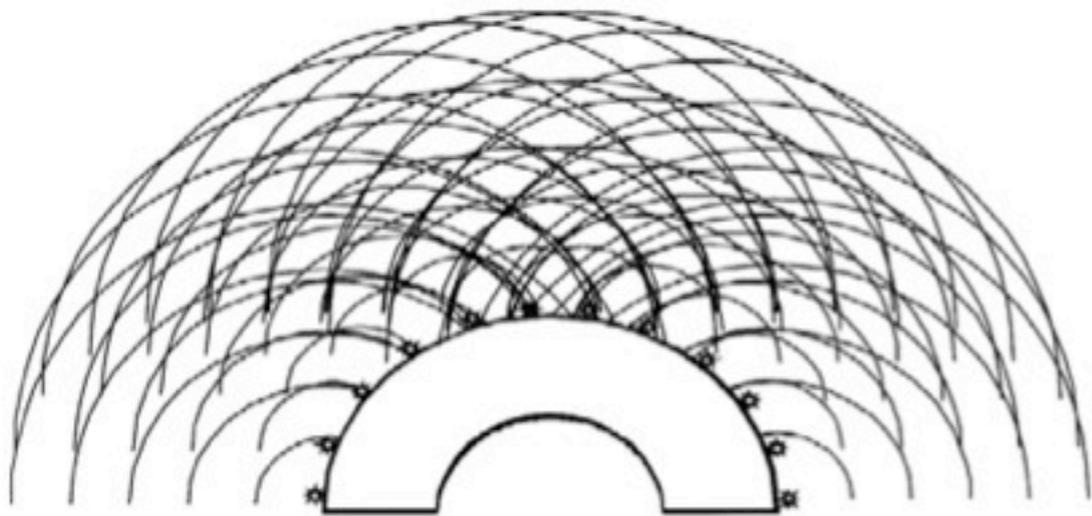
Avviene quando la superficie solida ha delle profondità di spessore comparabile alle lunghezze d’onda dell’onda incidente. In questo caso non si ha riflessione speculare ma il suono viene sparpagliato in tutte le direzioni.

# Principio di Huygens

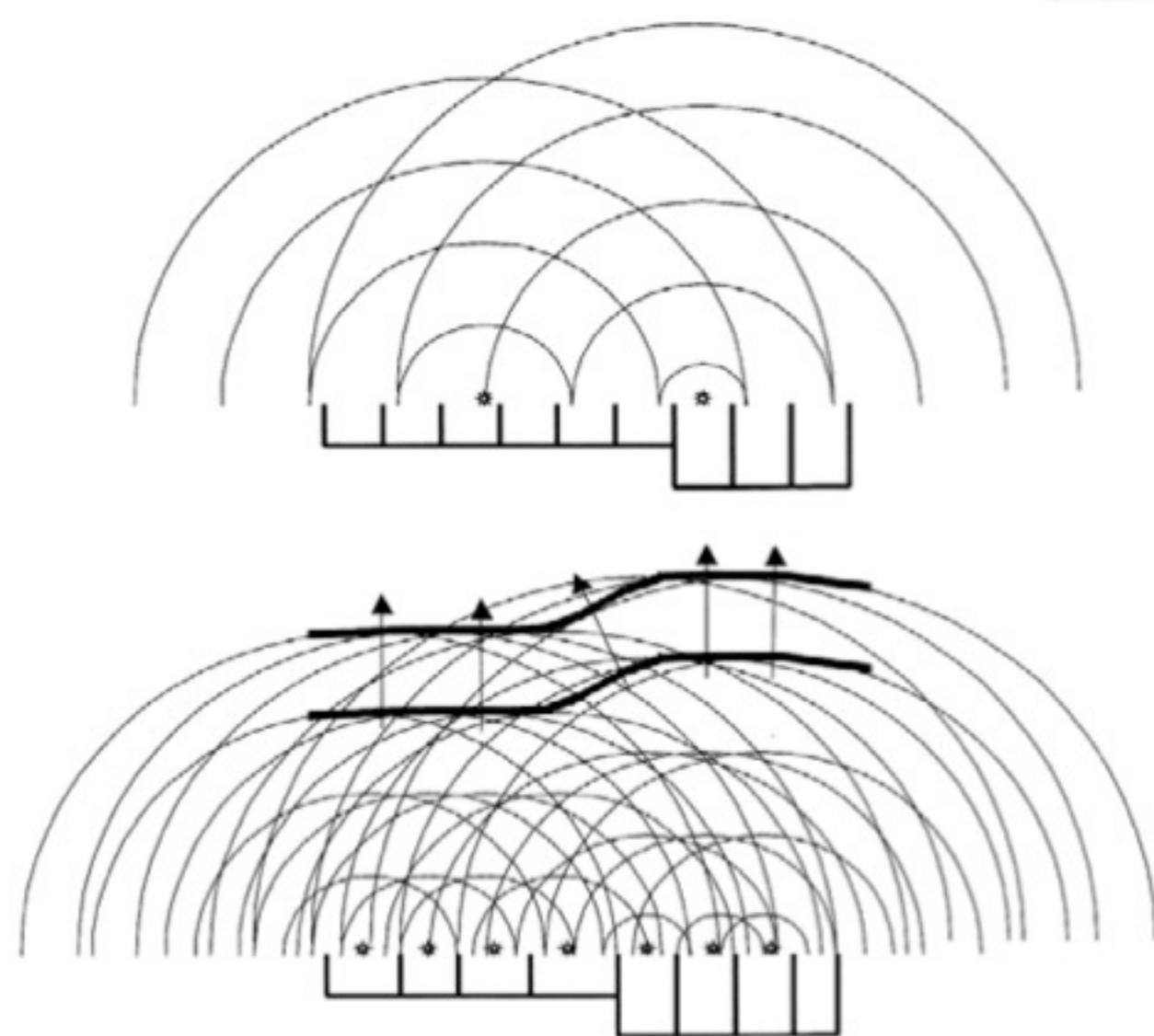
Ogni elemento  $d\Sigma$  di un fronte d'onda  $\Sigma$  si può considerare formalmente come una sorgente secondaria di onde sferiche in fase con la primaria e di ampiezza proporzionale a quella dell'onda primaria e all'area  $d\Sigma$ .  
La perturbazione prodotta in un punto dello spazio si può sempre ottenere come sovrapposizione di tutte le onde sferiche secondarie che raggiungono quel punto.



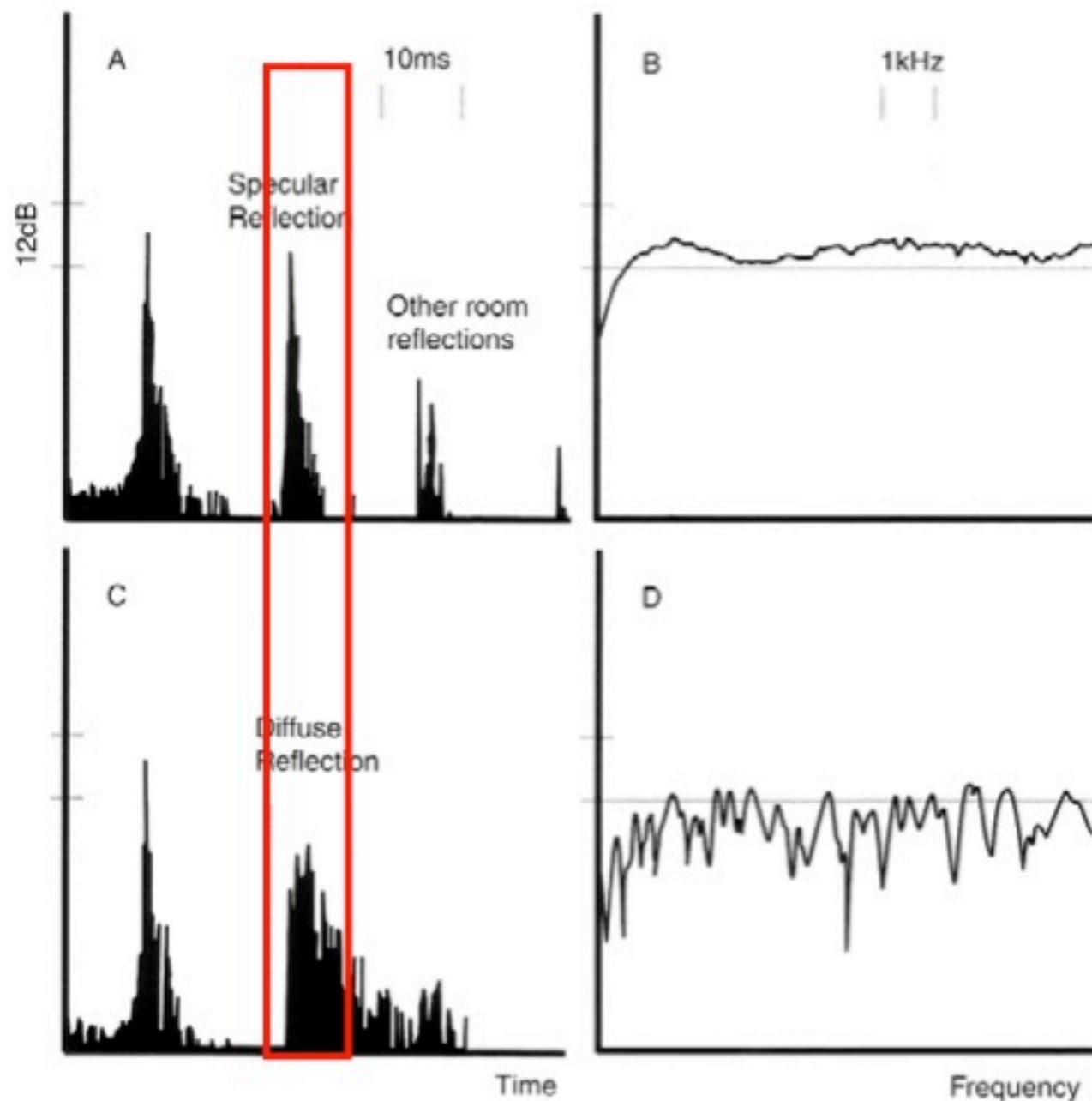
Fronte d'onda per un'onda piana riflessa da una superficie piana ricostruito sfruttando il principio di Huygens.



Costruzione secondo il principio di Huygens di un'onda piana riflessa da una superficie semicilindrica: **il fronte d'onda è semicilindrico.**



Costruzione secondo il principio di Huygens di un'onda piana riflessa da un diffusore di Schroeder semplificato: oltre ad una **dispersione spaziale** questo tipo di diffusore genera anche una **dispersione temporale.**



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).

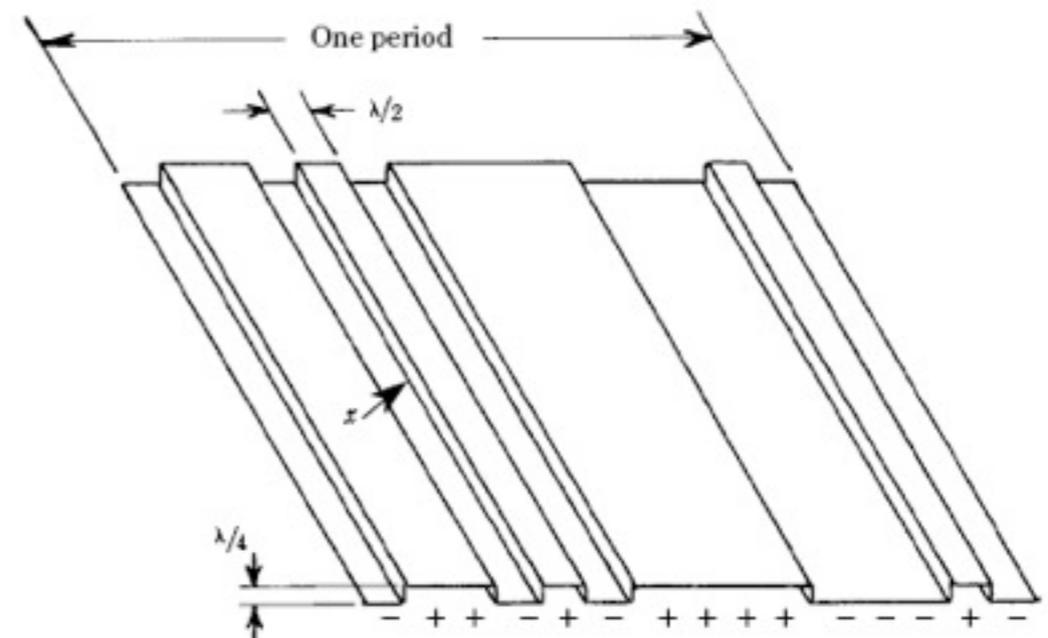
La diffusione del suono in un ambiente chiuso crea una “coda” naturale nel decadimento sonoro che viene molto apprezzata soprattutto in ambito musicale.

# Diffusione acustica

- Superfici convesse (poly), triangolari etc.
- Diffusore di Schroeder
- QRD, linea RPG di D'Antonio
- Diffusione a linee curve elaborate con simulazioni di calcolo numerico
- Binary Amplitude Diffusers
- Qualsiasi tipo di superficie random o pseudo-random con discrepanze.

# Diffusore di Schroeder

- Schroeder notò che una piastra metallica con la forma relativa ad una pattern che segue una sequenza MLS, per opera della diffrazione, diffonde il fascio incidente di un angolo molto più ampio di qualsiasi altro diffusore.
- se lo spessore è di  $\lambda/2$ : non accade niente
- se lo spessore è di  $\lambda/4$ : diffusione
- se lo spessore è di  $\lambda/2$  ma anche solo un listello viene coperto: non accade niente



# QRD Quadratic Residue Diffusers

- reticolo di diffrazione di fase e diffonde il suono piuttosto uniformemente in tutte le direzioni
- utilizzando queste evidenze sperimentali si è potuto progettare un dispositivo che permetta il phase-shift (o time-shift)
- per far ciò si è pensato ad una disposizione di buche e spessori 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

$$d = n^2 \text{ mod } p$$

$d$  : profondità di ogni buca

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

$p$  : numero primo

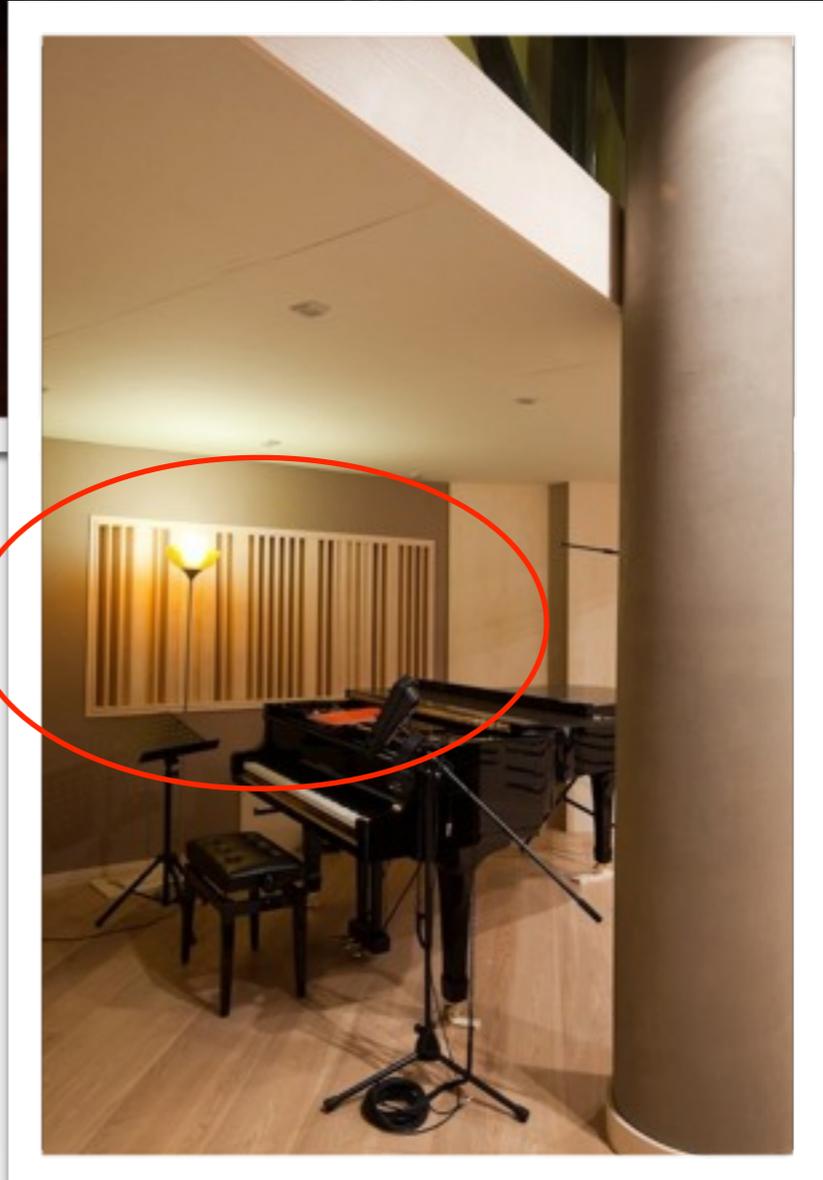
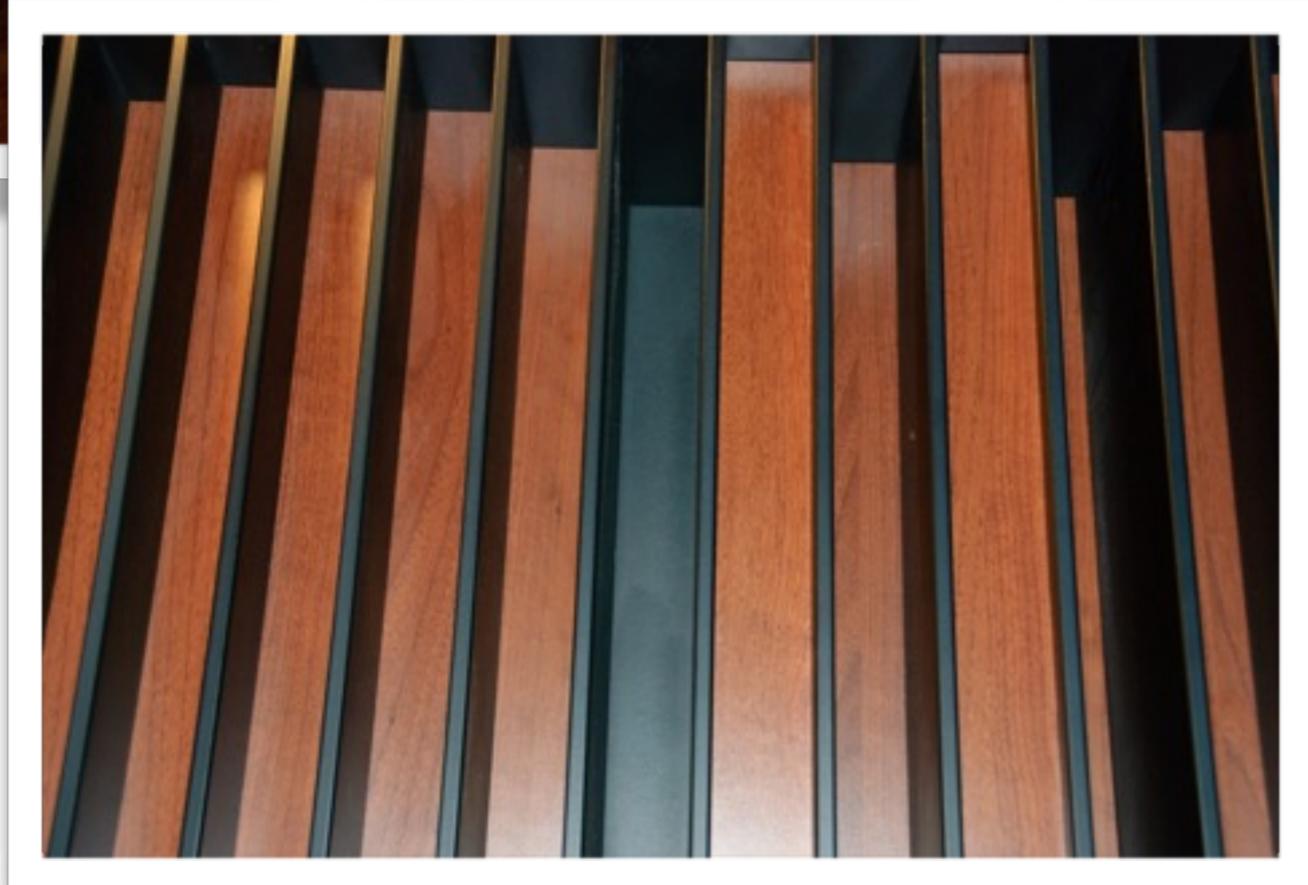
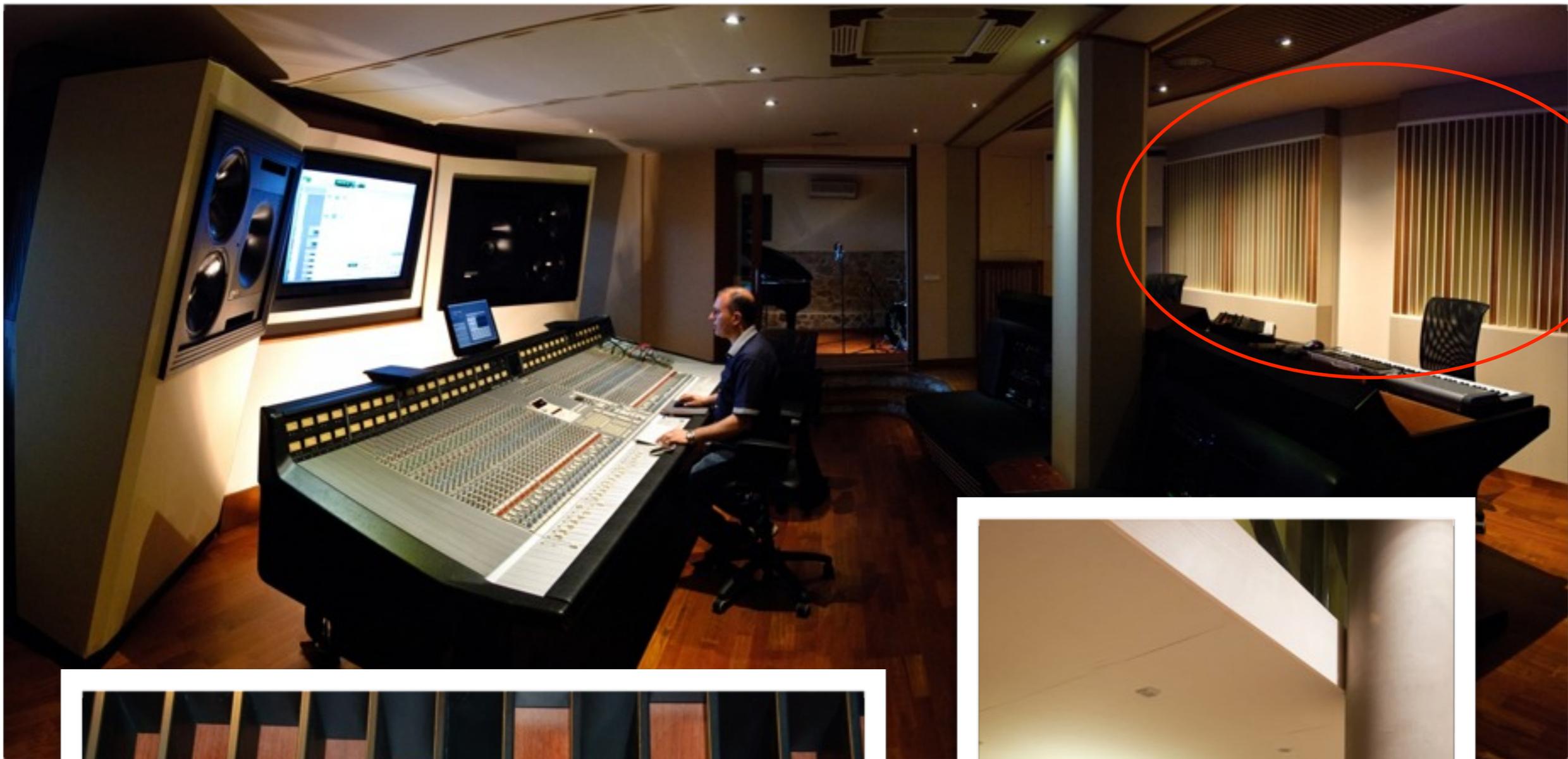
Quadratic-residue sequences

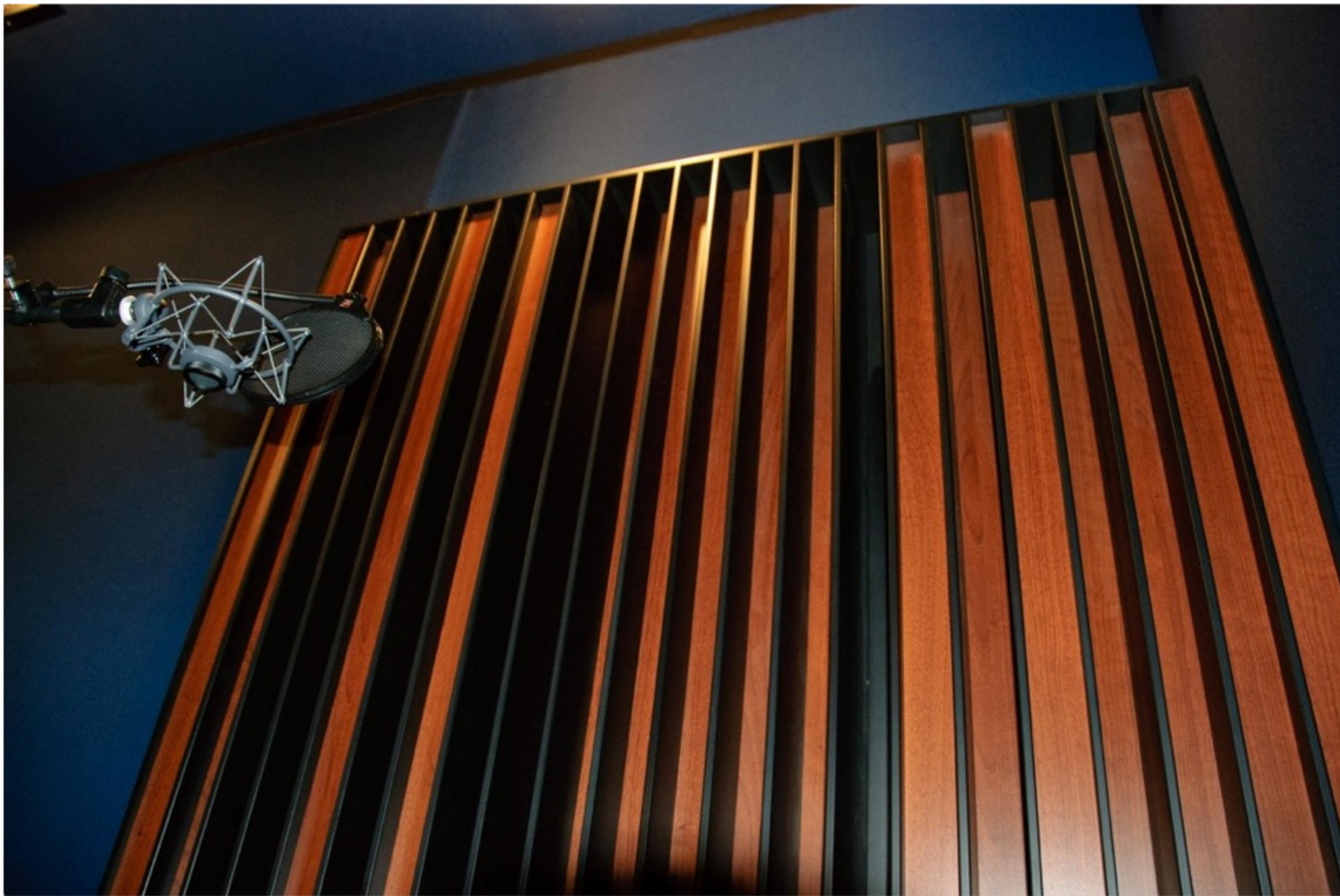
$n$	$p$						
	5	7	11	13	17	19	23
0	0	0	0	0	0	0	0
1	1	1	1	1	1	1	1
2	4	4	4	4	4	4	4
3	4	2	9	9	9	9	9
4	1	2	5	3	16	16	16
5	0	4	3	12	8	6	2
6		1	3	10	2	17	13
7		0	5	10	15	11	3
8			9	12	13	7	18
9			4	3	13	5	12
10			1	9	15	5	8
11			0	4	2	7	6
12				1	8	11	6
13				0	16	17	8
14					9	6	12
15					4	16	18
16				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

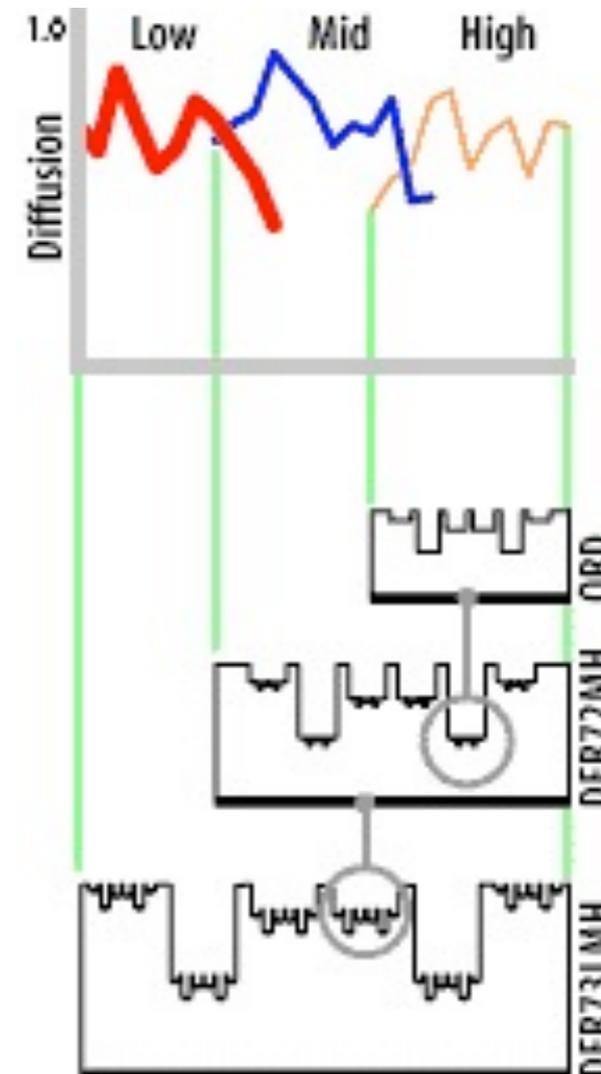
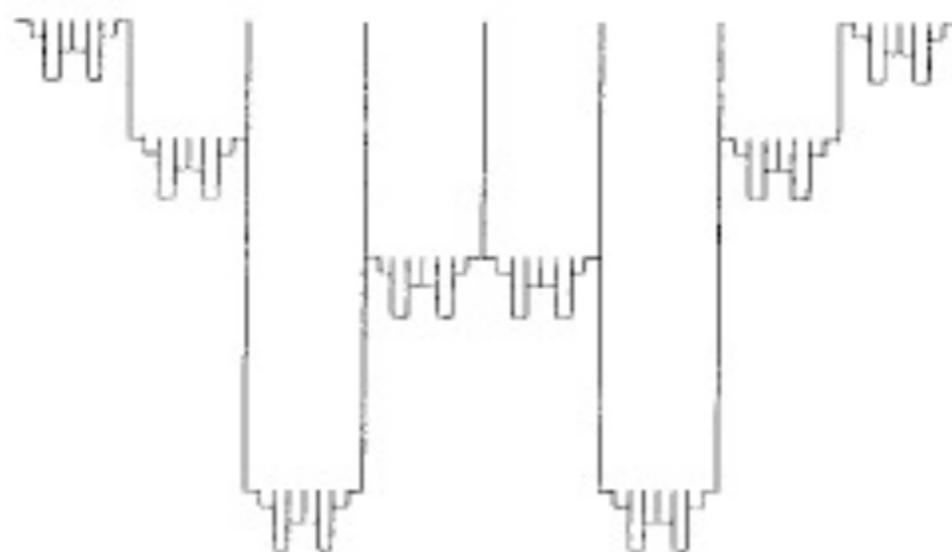
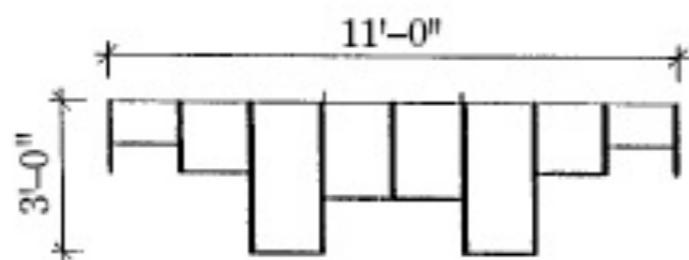
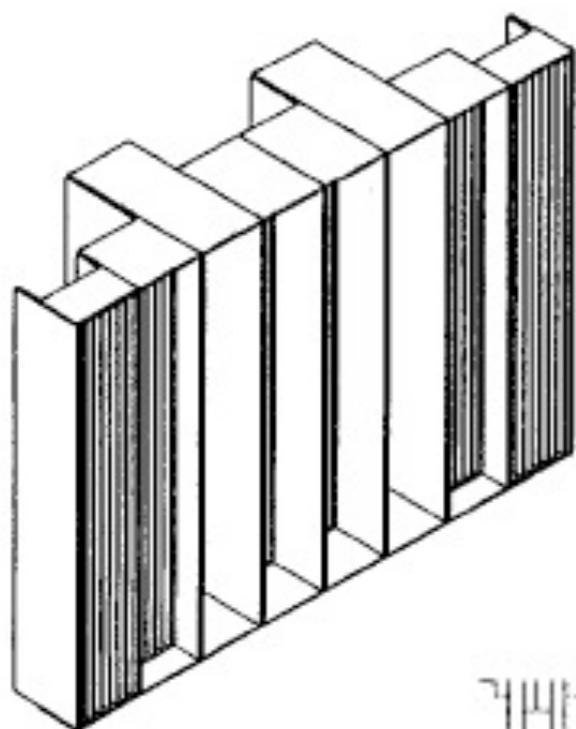
$n$  = integer

$p$  = 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.



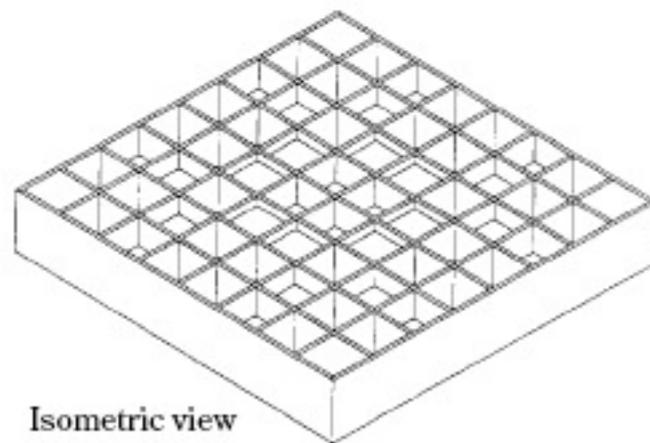


Patented: 2, 027, 658; 5, 027, 920; 4, 964, 486

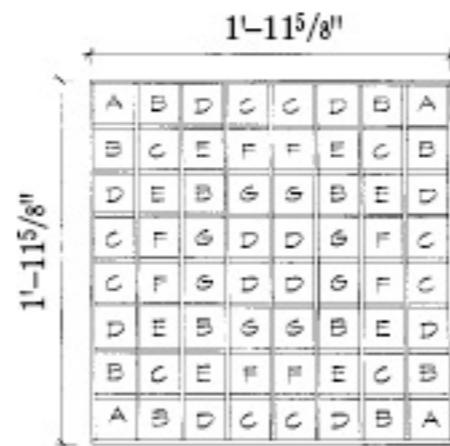


# Diffusori in 2d

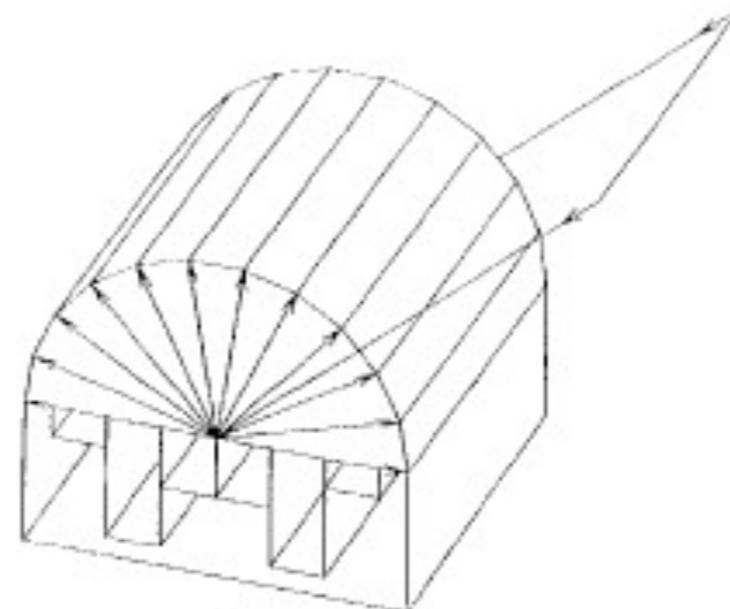
La distribuzione spaziale delle riflessioni provocate da questo tipo di diffusori è a semicerchio ossia in due dimensioni. Per avere una distribuzione sferica bisognerà utilizzare diffusori in tre dimensioni come l'Omniffusor RPG.



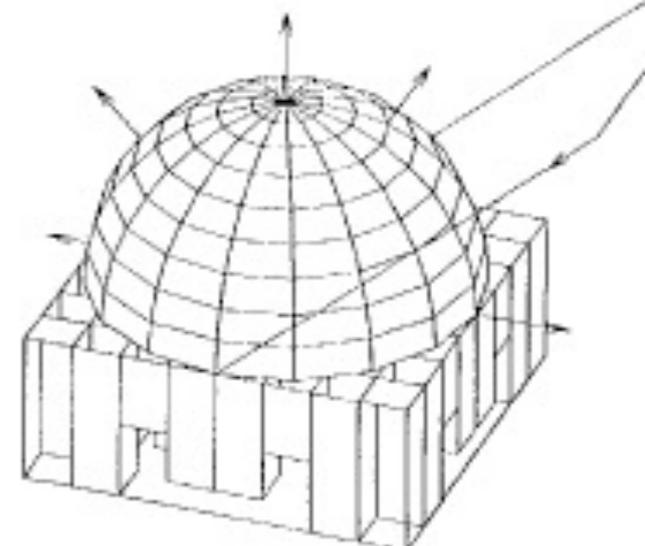
Isometric view



Front elevation



A



B

Schema dell'omniffusor

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



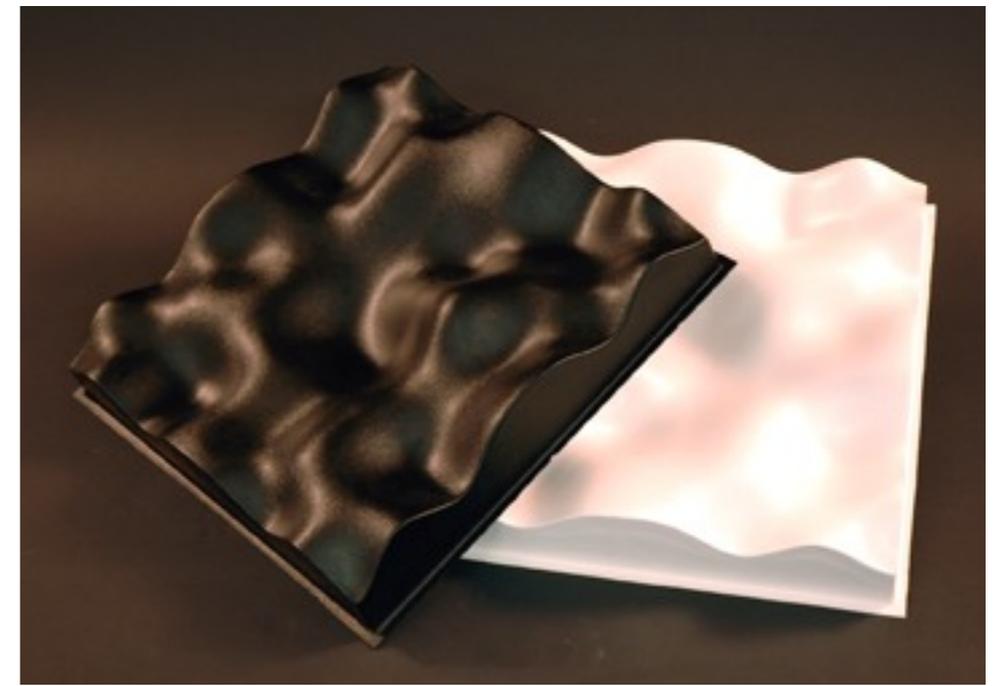
# Diffusori a linee curve

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.

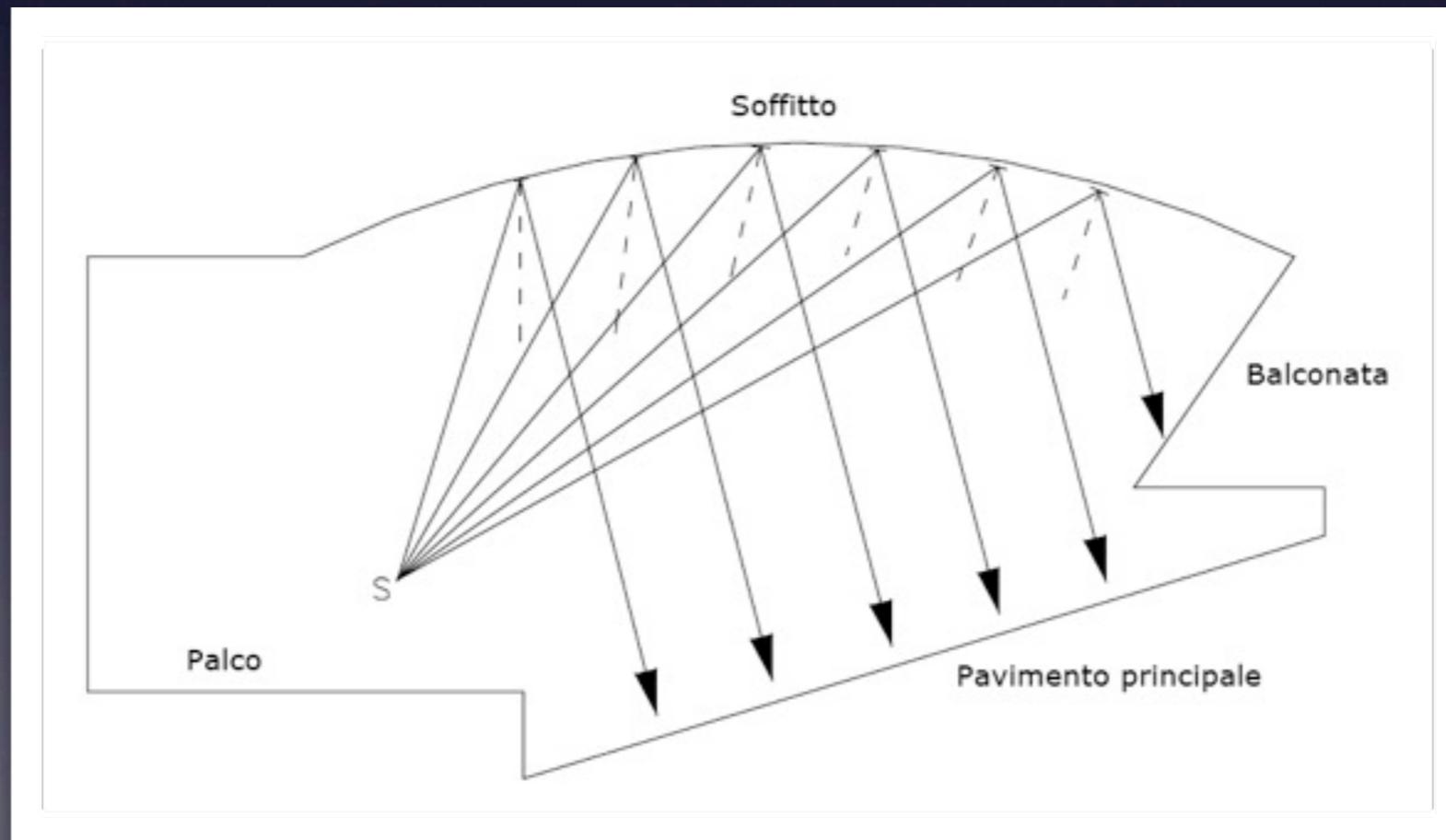
Con simulazioni al computer basate sul calcolo numerico si possono trovare forme curve ottimizzate per la diffusione.



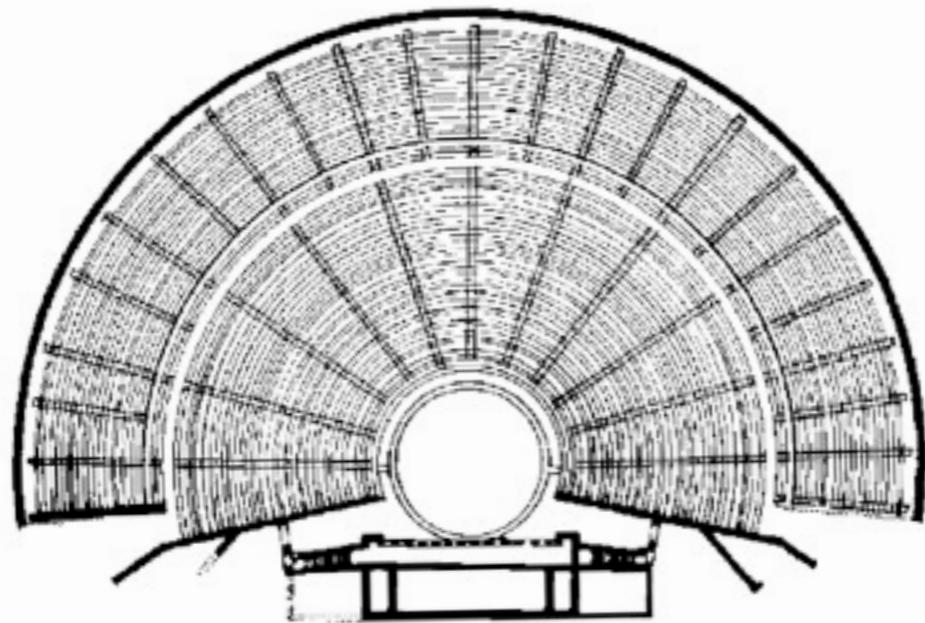


# Room Acoustics: Acustica negli ambienti chiusi

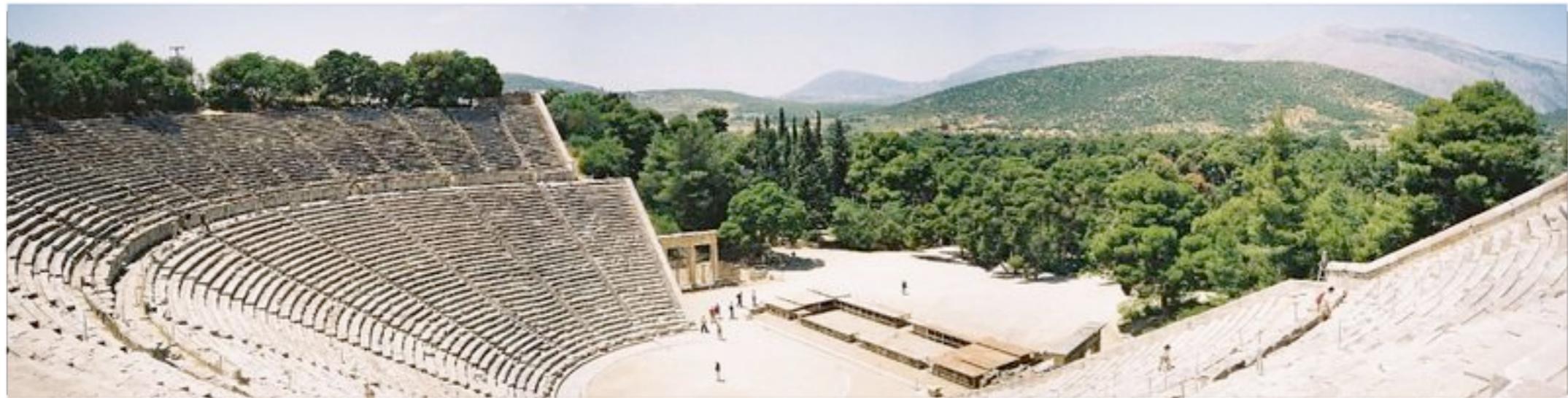
Scienza che studia la propagazione del suono in locali chiusi o comunque in presenza di oggetti capaci di causare effetti significativi di assorbimento e riflessione.



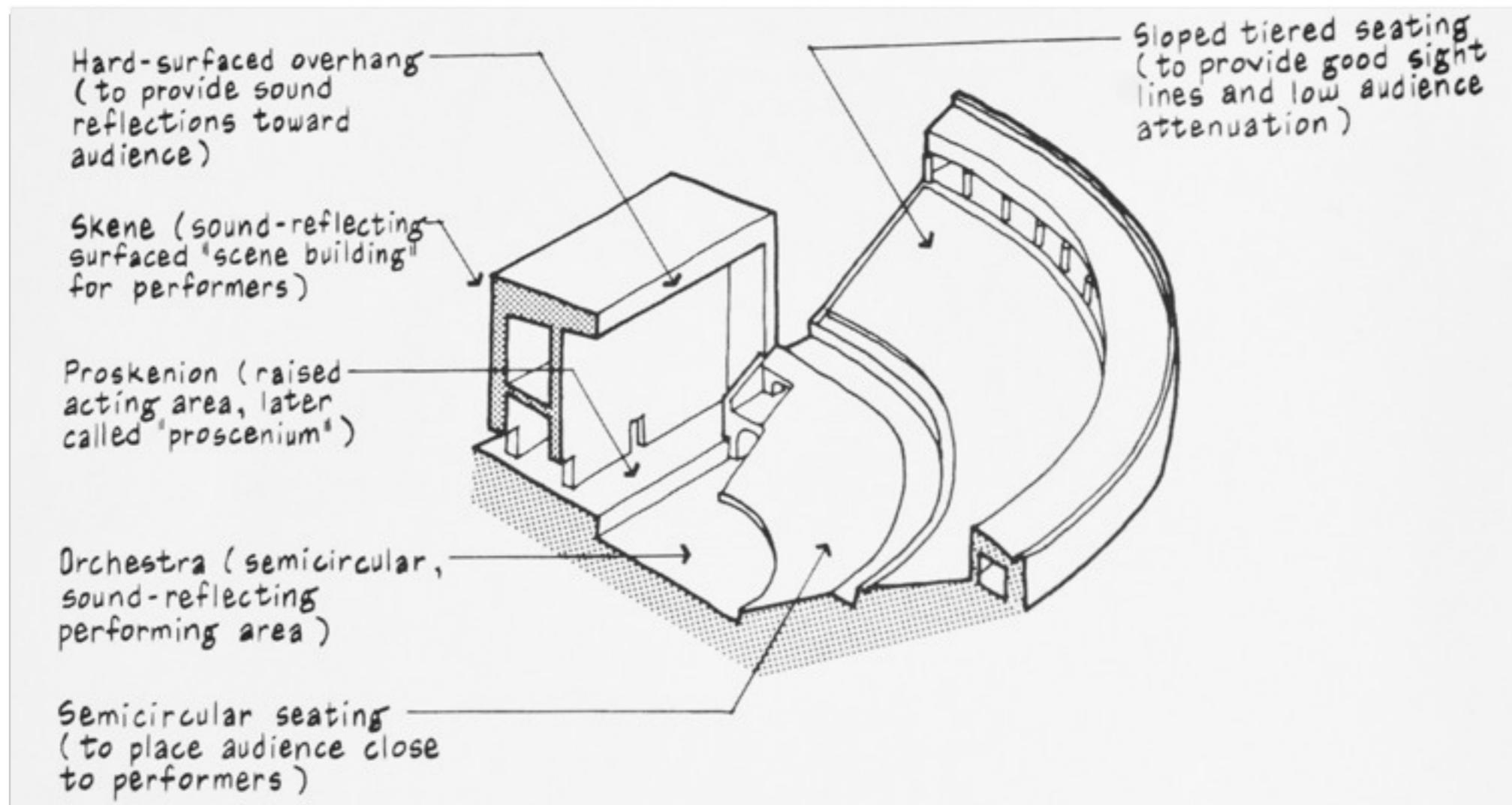
# Nell'antichità: i primi teatri



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:

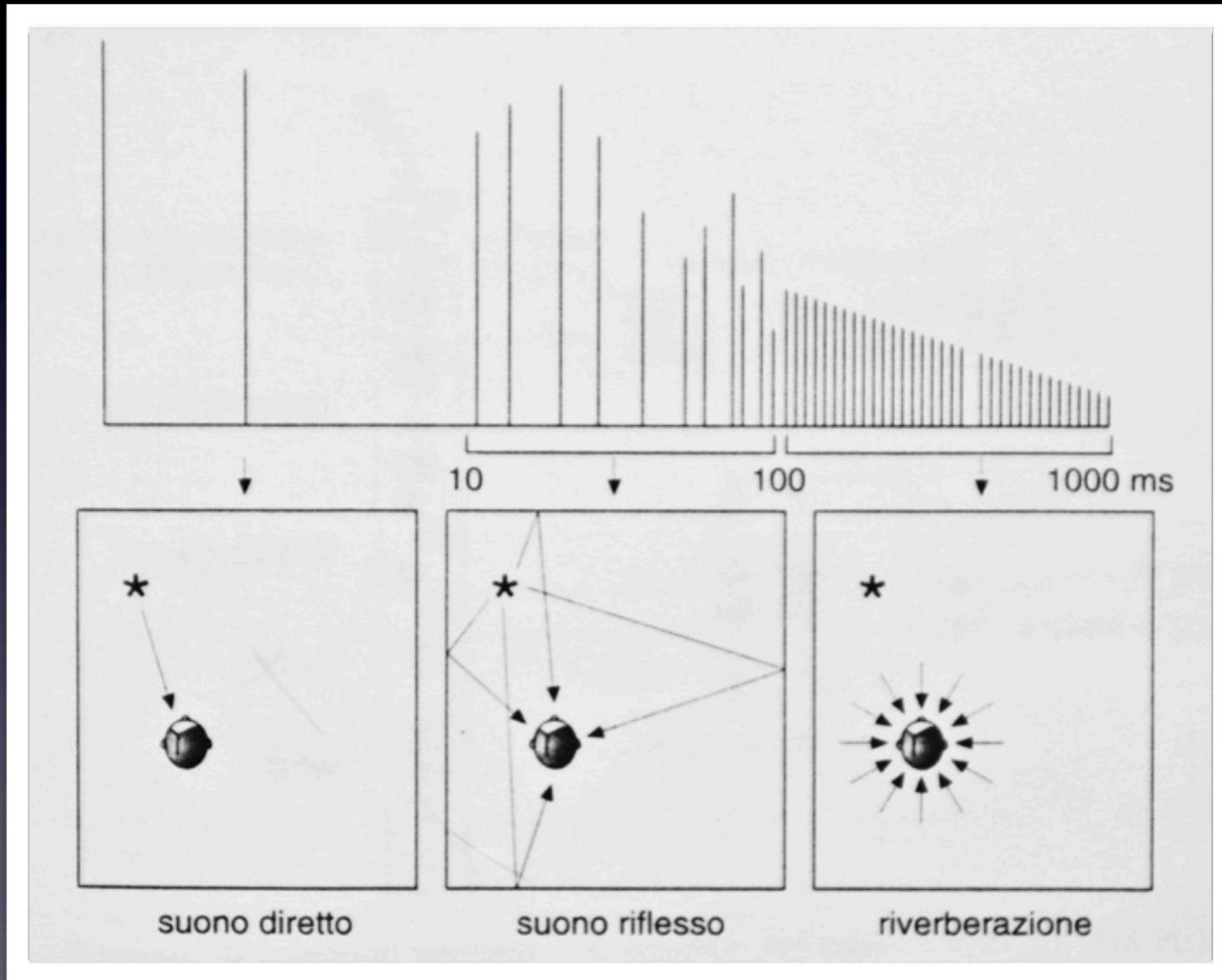
$$RT60 [s] = 0.161 \frac{V [m^3]}{A [m^2]}$$

# Legge di Sabine

la formula di Sabine presuppone  
alcune condizioni:

- densità di energia costante da punto a punto
- assorbimento acustico da parte dell'aria nullo
- il suono si attenua in modo esponenziale

# Suono in un ambiente chiuso



# Suono diretto

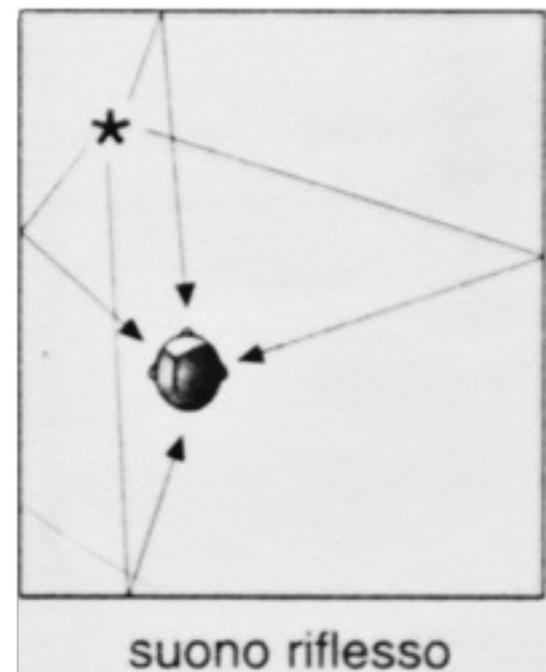
Il **Suono diretto** trasmette informazioni relative a:

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.



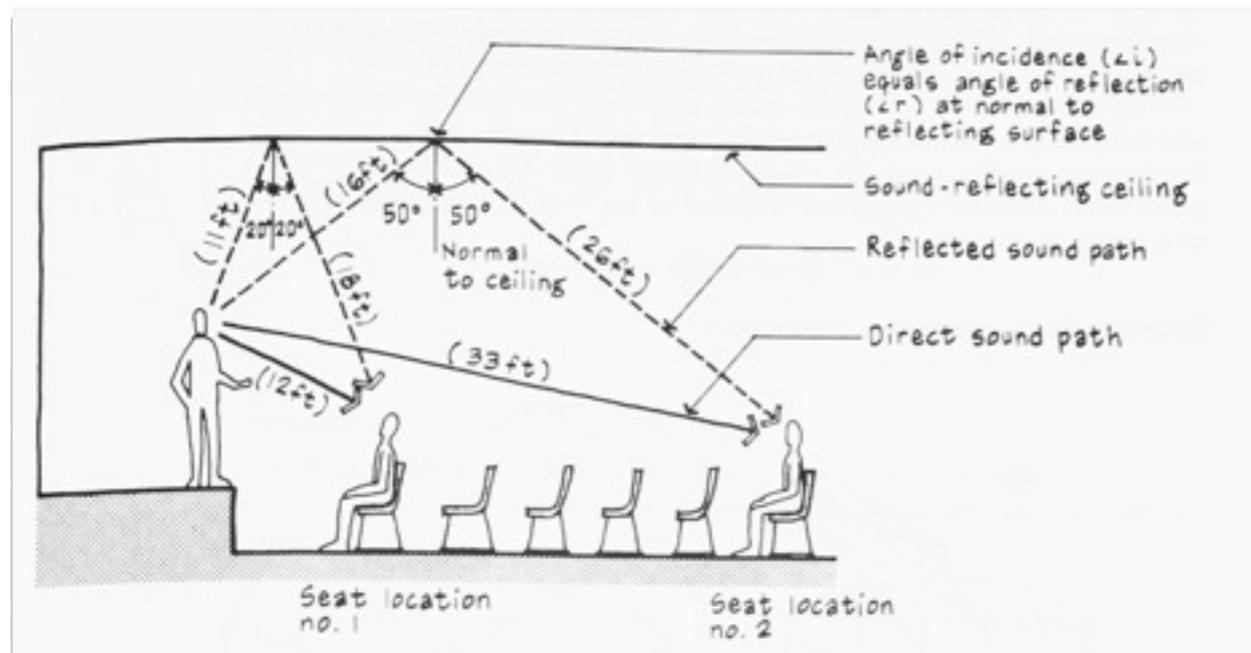
# Prime Riflessioni



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.

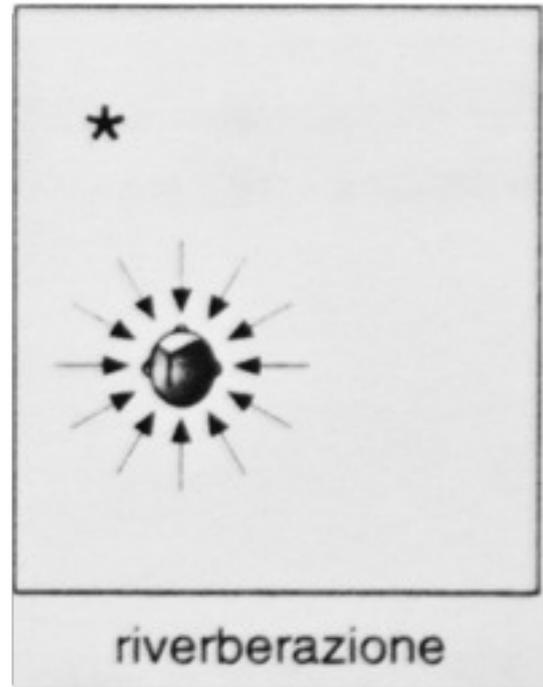
Queste onde ravvicinate sono dette **riverberazione**: la riverberazione è caratterizzata da una diminuzione graduale di ampiezza e dal fatto che conferisce calore e corposità al suono; inoltre contribuisce anche alla sua intensità.

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 enfattizzazione 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**

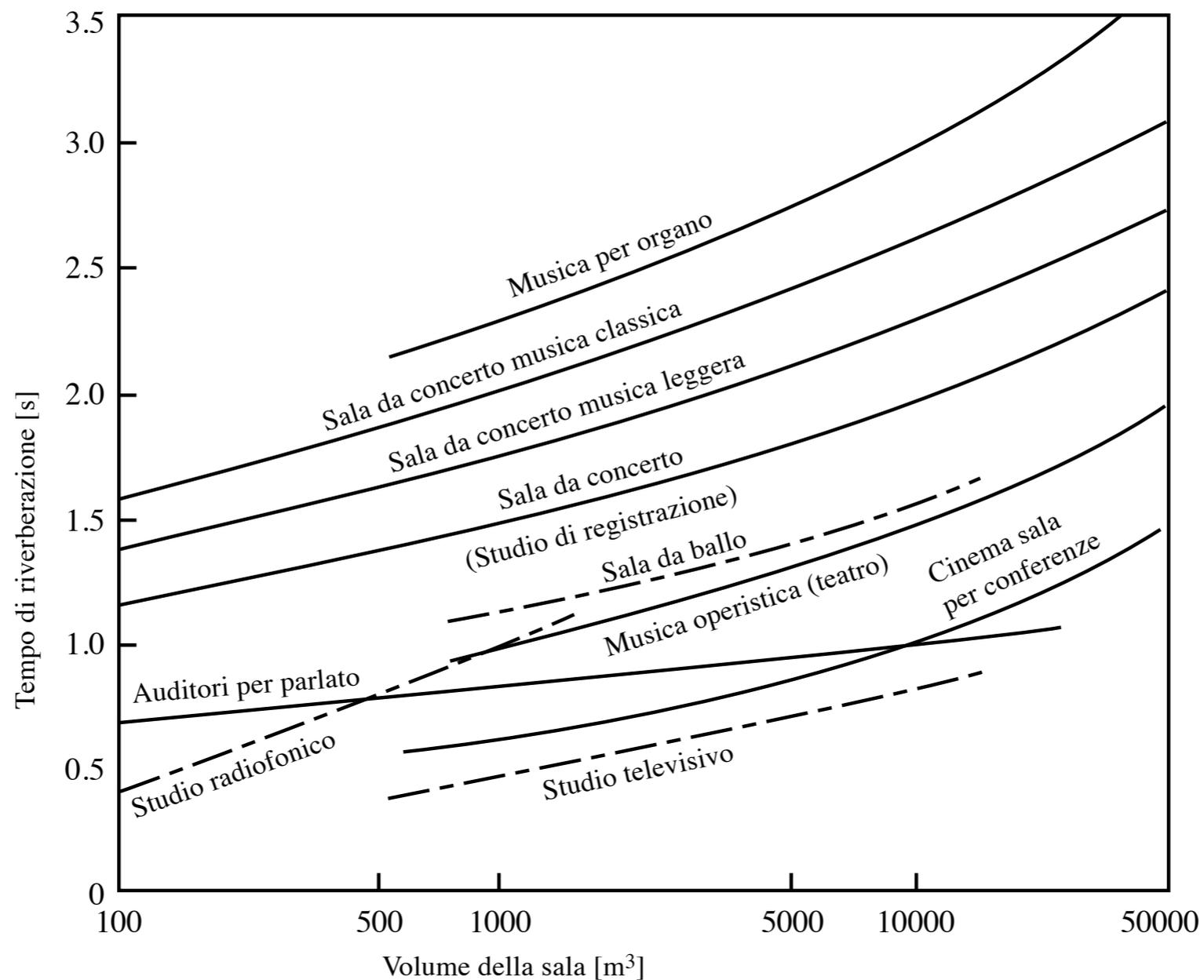
# Tempo di riverberazione ottimale

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.**



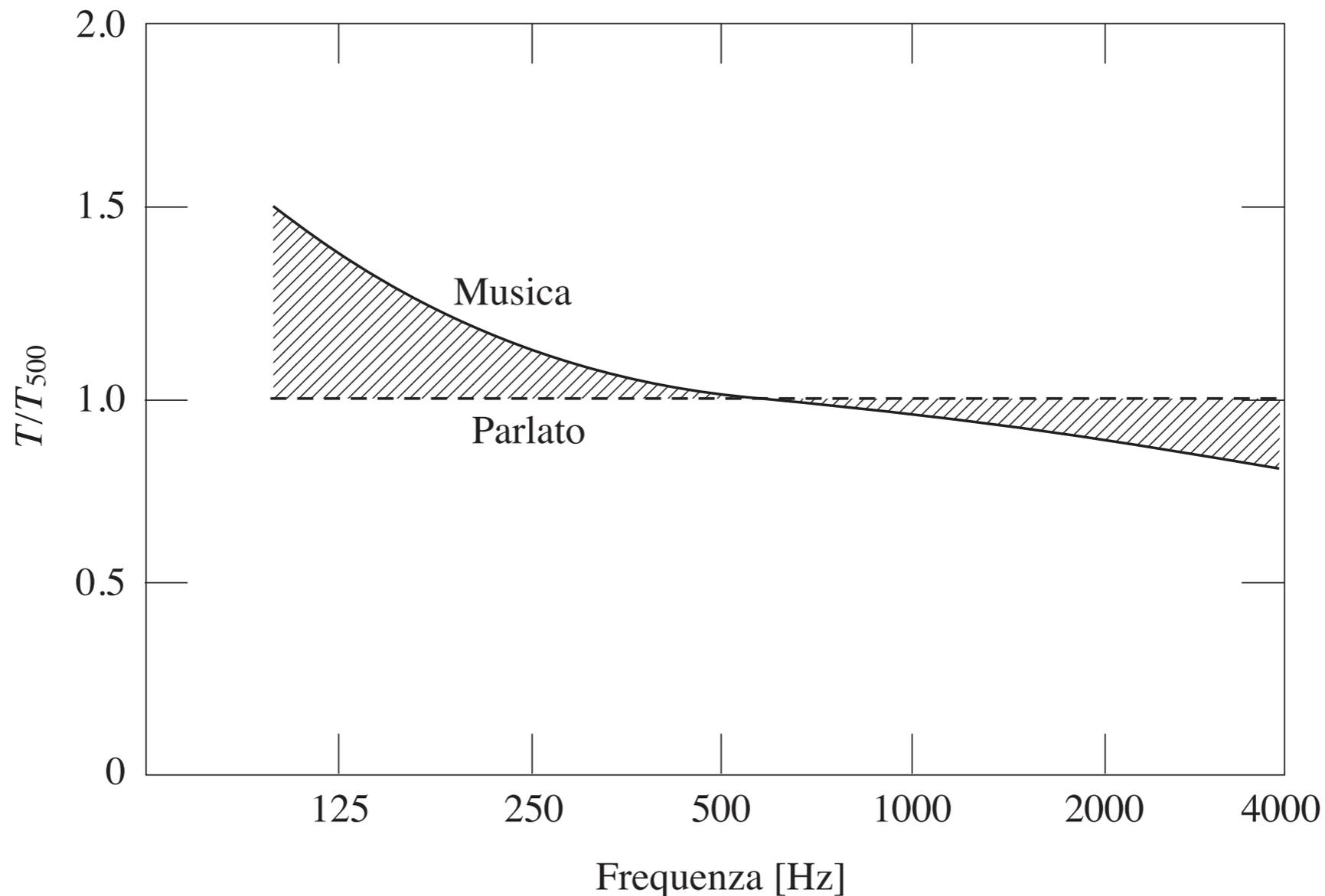
il valore ottimale cresce all'aumentare del volume della sala per una determinata destinazione d'uso:

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

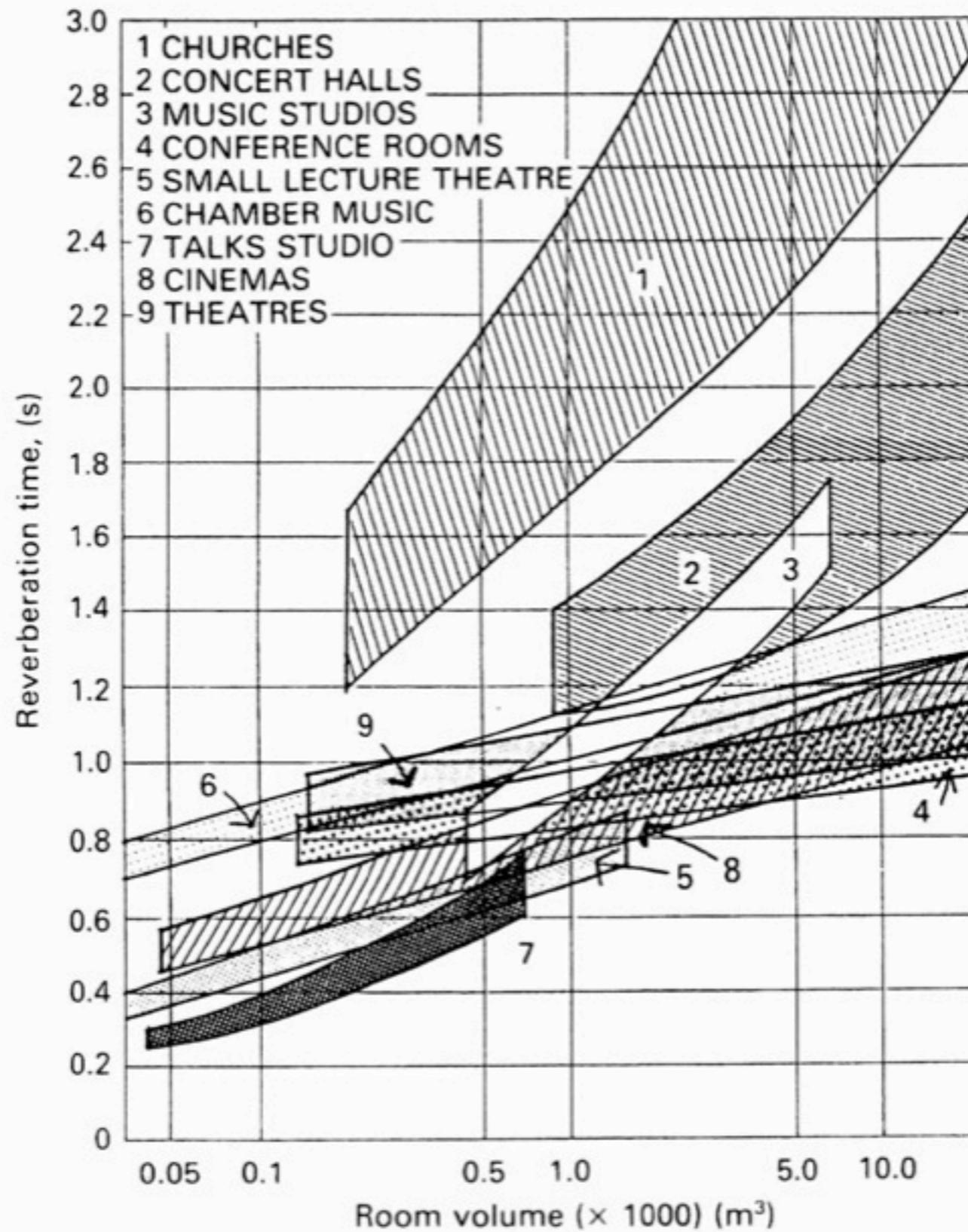
$$RT60_{parlato} = 0.1 V^{1/3}$$

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

# 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

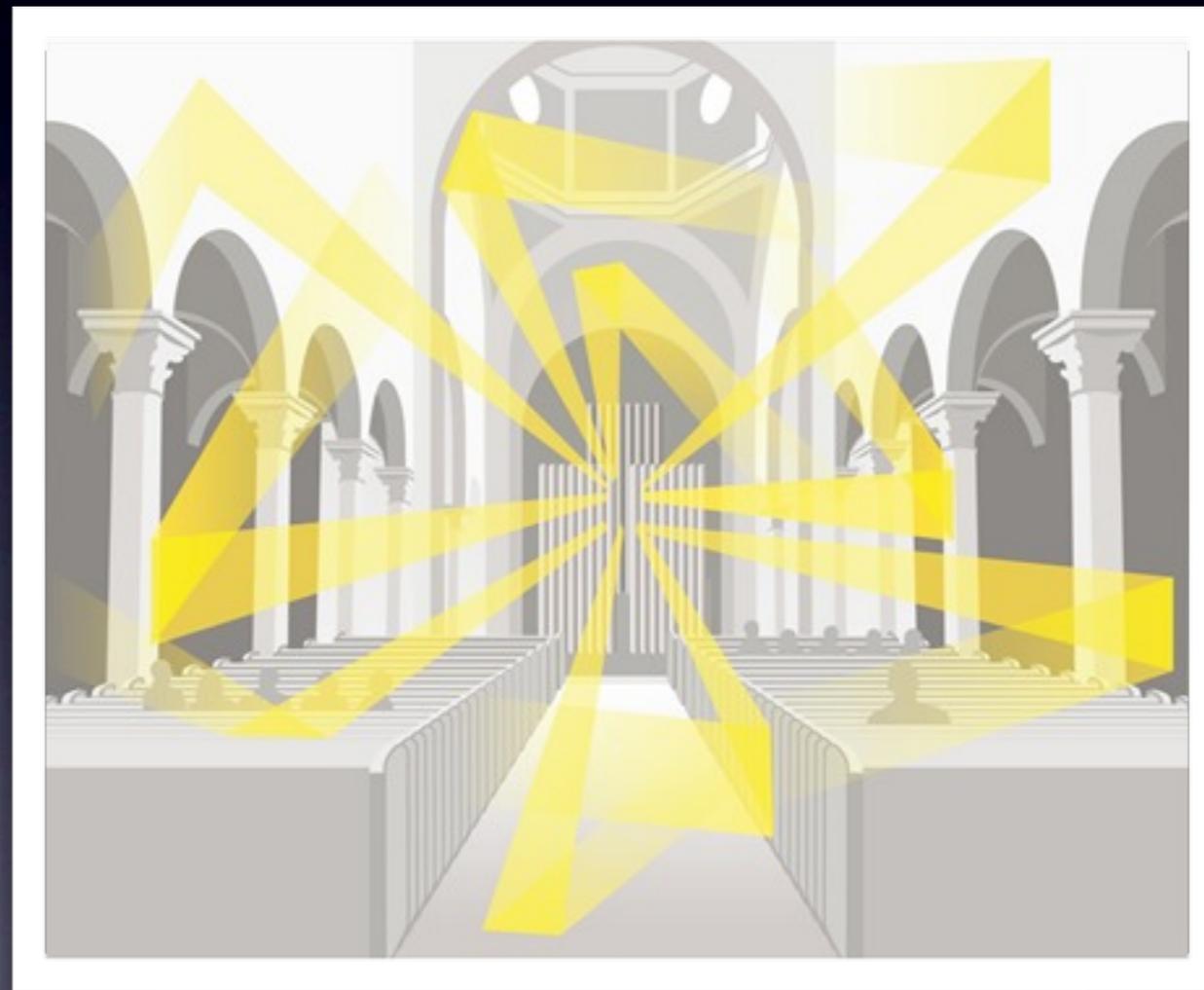


# Valori di RT60 relativi a importanti sale acusticamente efficienti

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

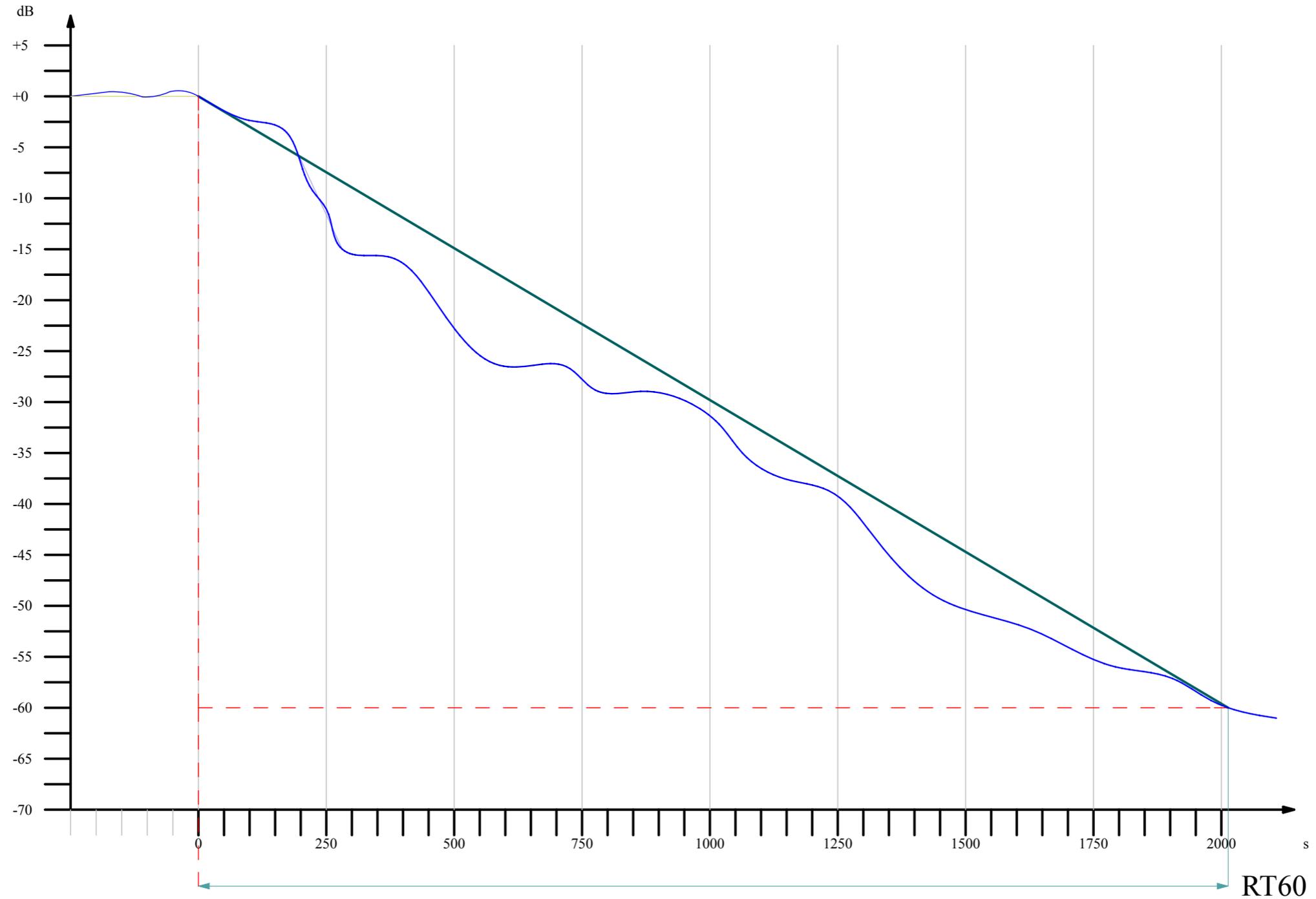
Fig. 1.3. Tempi di riverberazione alle varie frequenze di alcune sale da concerto (da KINSLER, *Fundamentals of Acoustics* 4<sup>a</sup> ed.).

# Tempi di riverberazione



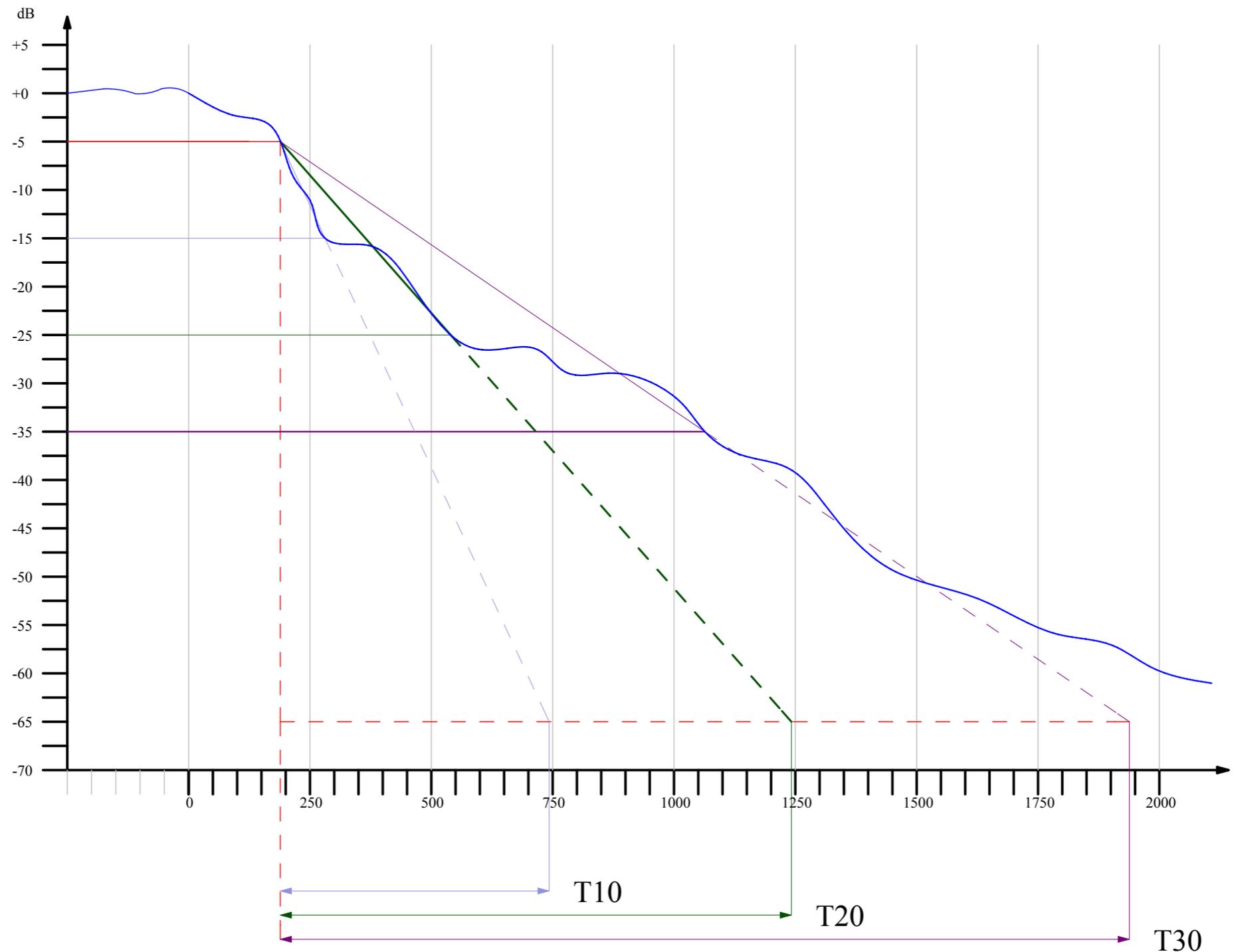
parametri relativi ai tempi di riverberazione tratti dalla  
normativa ISO3382

# RT60



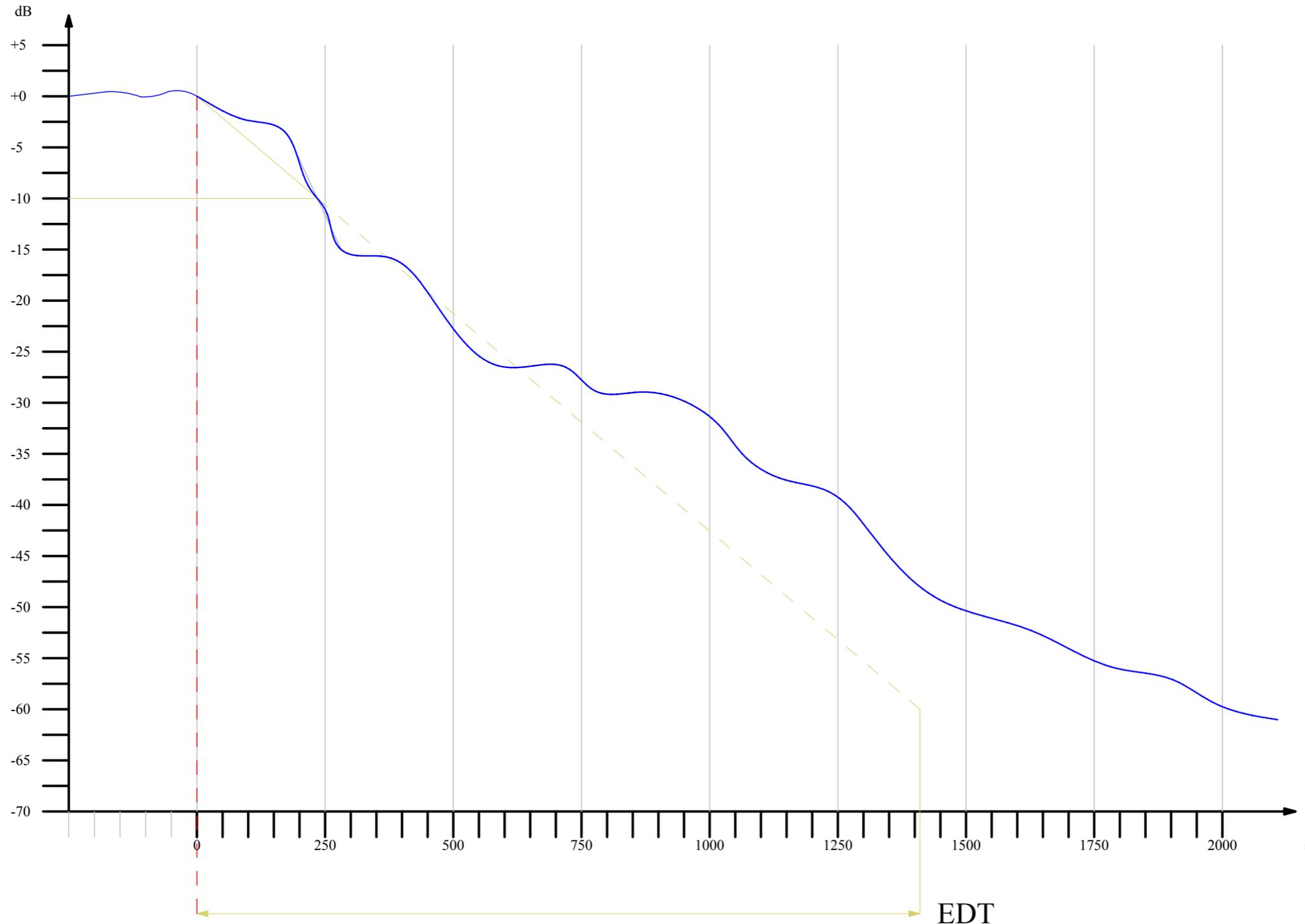
# T10 - T20 - T30 - TX

è pari a  $60/X$  volte il tempo di riverberazione calcolato sul decadimento da -5 dB a  $-(X+5)$  dB



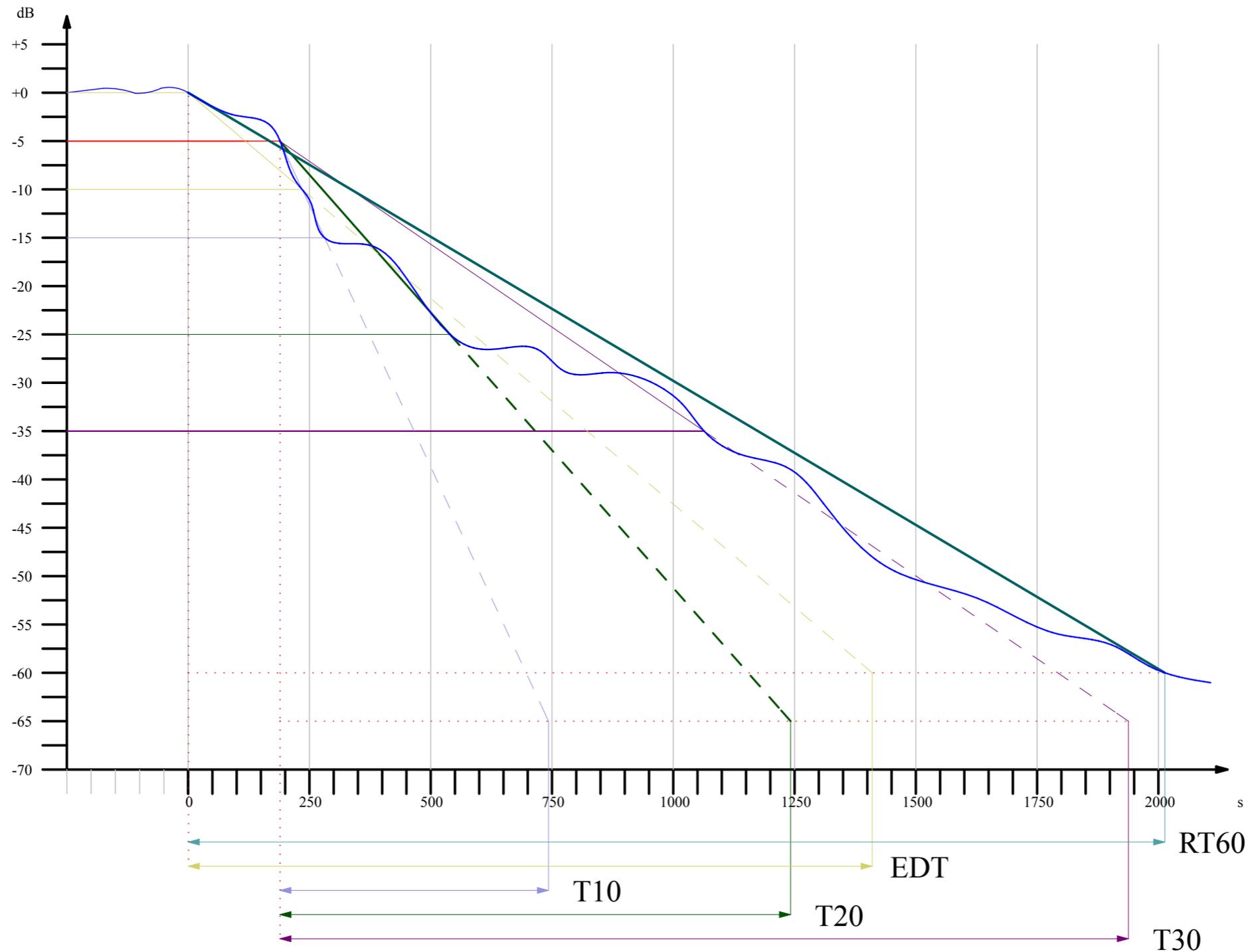
# EDT

è pari a sei volte il tempo di riverberazione calcolato sui primi 10 dB del decadimento sonoro (misurato da 0 ÷ -10 dB)



# Visualizzazione Totale

Tutti i tempi di riverberazione per questo decadimento



Un decadimento di un campo acustico perfettamente diffuso è di tipo esponenziale (come il fenomeno della riverberazione) e quindi è una retta nella scala dei dB: in questo caso tutti i parametri per stimare il tempo di riverberazione sono uguali (EDT, RT60, Txx).

- **Il confronto tra i vari parametri ci dà una stima della diffusione dell'ambiente.**
- Se un ambiente è ad esempio di due volumi si nota parecchio la discrepanza tra i parametri lunghi e brevi.
- È fondamentale studiare anche il comportamento in frequenza dell'RT.

# Considerazioni su RT

- T20 e T30 sono poco variabili con la posizione invece l'EDT risente del suono diretto e delle prime riflessioni e quindi è molto più variabile.
- L'EDT è un parametro più vicino dell'RT60 alla **percezione soggettiva della riverberazione** durante le esecuzioni musicali, alla **chiarezza** degli attacchi e ad altre sensazioni psicoacustiche soggettive.
- Le sale per la musica tendono ad avere una riverberazione uniforme con la frequenza mentre le sale d'opera presentano in genere più riverberazione alle frequenze gravi.
- Le sale con estese superfici di legno presentano la massima riverberazione alle frequenze medie.
- Alle frequenze acute ( $\geq 4\text{KHz}$ ) RT diminuisce sempre a causa dell'assorbimento dell'aria.

# 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.

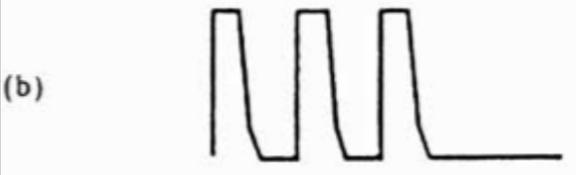
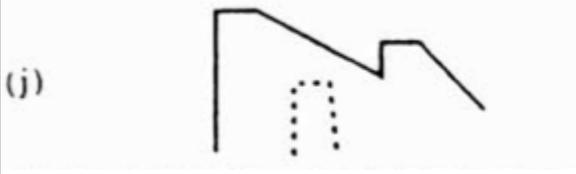
Dagli anni '70 circa si cominciarono ad investigare gli aspetti spaziali del suono con:

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>t<sub>s</sub></sub> TIACC Clarity RASTI  
L<sub>f</sub> IAACC C50 BR  
Dir SPL C80  
Definition  
ITD  
G  
W<sup>I</sup>ACC Duol<sup>I</sup>uon<sup>I</sup>ti  
Tot SPL 50

AI<sup>STI</sup><sub>cons</sub>

	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 irrilevante pienezza dei toni	(b) 	Alta definizione irrilevante pienezza dei toni
	lungo	medio	(c) 	Alta definizione una piccola pienezza dei toni	(d) 	Alta definizione una piccola pienezza dei toni
	lungo	piccolo	(e) 	Media definizione alta pienezza dei toni	(f) 	Bassa definizione alta pienezza dei toni
Toni a diverse loudness	lungo	medio	(g) 	Alta definizione una piccola pienezza dei toni	(h) 	Alta definizione una piccola pienezza dei toni
	lungo	piccolo	(i) 	Bassa definizione alta pienezza dei toni	(j) 	Molto bassa definizione alta pienezza dei toni

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, $t_s$ , G)
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 (IACC, $L_f$ , ASW, LEV, $W_{IACC}$ , $T_{IACC}$ )
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)

# Bass Ratio

$$BR = \frac{RT_{125\text{ Hz}} + RT_{250\text{ Hz}}}{RT_{500\text{ Hz}} + RT_{1\text{ kHz}}}$$

- È un rapporto di somme di tempi di riverberazione a diverse frequenze.
- È una misura del *calore* del suono e della pienezza dei toni gravi.
- Le sale migliori si collocano nell'intervallo  $1.20 < BR < 1.25$ .

# Brilliance

$$BRILLIANCE = \frac{RT_{500\text{ Hz}} + RT_{1\text{ kHz}}}{RT_{2\text{ kHz}} + RT_{4\text{ kHz}}}$$

- È un rapporto di somme di tempi di riverberazione a diverse frequenze.
- È una misura della *brillantezza* del suono.

# Tempo di ritardo iniziale ITDG

- È il ritardo in ms tra l'arrivo del suono diretto e la prima riflessione importante.
- È correlato alla sensazione di *intimità* tra esecutore e pubblico (prossimità acustica).
- Si può calcolare a priori in base al disegno della sala considerando un punto centrale della platea.
- I valori ottimali non devono essere superiori a 35 ms.
- Valori per cui ITDG < 50 ms sono pessimi per la parola mentre il limite di tolleranza si alza a 70 ms per la musica.

# Criteri energetici

Per la **fusione temporale**, l'orecchio non riesce a distinguere separatamente suoni che si verificano molto ravvicinati nel tempo (circa 50 ms parlato, 80 ms musica)

## SI DEFINISCE:

**ENERGIA UTILE:** arriva prima dei 50 ms dal suono diretto (i contributi delle riflessioni entro questo tempo si “sommano” al suono diretto)

**ENERGIA DANNOSA:** arriva dopo i 50 ms dal suono diretto (oltre a non enfatizzare, può creare disturbi alla percezione sonora)

# Chiarezza - C50/C80

indice di chiarezza per il parlato/musica  
espressa in dB

È il rapporto logaritmico tra l'energia ricevuta entro 50/80 ms e l'energia dannosa.

$$C50 / 80 = 10 \log \frac{\text{Energia Utile}}{\text{Energia Dannosa}} = \frac{\int_{0\text{ms}}^{50/80\text{ms}} p^2(t) dt}{\int_{50/80\text{ms}}^{+\infty} p^2(t) dt}$$

- La C80 identifica la facilità nel percepire note in rapida successione, diverse linee musicali suonate simultaneamente e interpreta sensazioni soggettive legate alla percezione della **chiarezza** degli attacchi, **trasparenza**, **localizzazione** della sorgente e definizione del suono.
- Il limite di integrazione t viene fissato a 50 ms per la parola e a 80 ms per la musica.

# PROBLEMA:

La Chiarezza diminuisce con la distanza e varia molto anche tra posizioni non lontane perché riflessioni importanti a cavallo del limite ne condizionano l'andamento.

## Valori ottimali di C80/C50

(sala vuota media tra 500 Hz e 1 KHz)

### **C80**

#### **Musica**

(-2 ÷ +2) sinfonica, strumentale  
(+1 ÷ +4) lirica  
(+5 ÷ +10) studi di registrazione

**C80 < -4 dB NON IDONEO**

(suono confuso)

**C80 > 2 dB Suono "secco"**

### **C50**

#### **Parlato**

(+5 ÷ +10) Studio Televisivo  
(+2 ÷ +6) Teatro di Prosa  
(+2 ÷ +10) Sala Conferenze

**C50 < 0 dB**

**NON IDONEO**

**0 < C50 < 3 dB**

**DISCRETO**

**C50 > 3 dB**

**BUONO**

# Definizione - D50

espressa in %

È il rapporto tra l'energia ricevuta entro 50 ms e l'energia totale.

$$D50 = \frac{\text{Energia Utile}}{\text{Energia Totale}} = \frac{\int_{0\text{ms}}^{50\text{ms}} p^2(t) dt}{\int_{0\text{ms}}^{+\infty} p^2(t) dt}$$

## Valori ottimali di D50

(sala vuota media tra 500 Hz e 1 KHz)

ambienti adatti per il parlato  $D50 > 50\%$

ambienti adatti per la musica  $D50 < 50\%$

# Tempo Baricentrico - $t_s$

espresso in ms

È il tempo in ms a cui arriverebbe l'energia se fosse "impacchettata" in una singola riflessione (analogia con il centro di massa di un solido)

$$t_s = \frac{\int_{0\text{ms}}^{+\infty} t \cdot p^2(t) dt}{\int_{0\text{ms}}^{+\infty} p^2(t) dt} \quad [\text{ms}]$$

## Valori ottimali di $t_s$

(sala vuota media tra 500 Hz e 1 KHz)

ambienti adatti per il parlato  $0 < t_s < 50$  ms

ambienti adatti per la musica  $50 < t_s < 200$  ms

**RIMUOVE IL PROBLEMA DELLA CHIAREZZA.**

# Rinforzo del Suono - G

espresso in dB

È una misura dell'amplificazione acustica che la sala fornisce alla sorgente sonora (senza impianto elettroacustico!). Si stabilisce un riferimento assoluto per la stessa sorgente in modo da poter confrontare tra loro diverse sale.

$$G = 10 \log \frac{\int_{0ms}^{+\infty} p^2(t) dt}{\int_{0ms}^{+\infty} p_{10m}^2(t) dt} \quad [\text{dB}]$$

**Se si misurano le risposte all'impulso:**

Rapporto logaritmico tra l'energia totale nel punto di misura e l'energia fornita dalla stessa sorgente a 10 m di distanza in campo libero

$$G = L_p - L_w + 31 \quad [\text{dB}]$$

**Se si misurano i livelli sonori:**

Differenza algebrica tra il livello di pressione  $L_p$  e la potenza sonora della sorgente più un termine relativo alla distanza di 10 m.  $31 \approx 10 \log(4\pi 10^2)$

Varia con la distanza dalla sorgente.

Discreta corrispondenza tra le due tecniche, specie alle frequenze medie.

# Valori ottimali di G

(sala vuota media tra 500 Hz e 1 KHz)

Sorgente sonora	G [dB]
Orchestra sinfonica Cantanti TOP Solisti TOP	$\geq -4$
Orchestra da camera Cantanti Solisti	$\geq 1$
Oratore allenato Attore allenato	$\geq 6$
Oratore Strumenti deboli (chitarra, flauto)	$\geq 11$

# Parametri di spazialità



# Parametri monoaurali per la spazialità

## ASW (oppure $L_f$ ) - Frazioni Laterali

$$L_f = \frac{\int_{5ms}^{80ms} p_8^2 d\tau}{\int_{0ms}^{80ms} p^2 d\tau}$$

$p_8(t)$  è il segnale misurato con un microfono a figura ad 8 con l'asse nullo verso la sorgente.

$$L_{fc} = \frac{\int_{5ms}^{80ms} p_8(t) \cdot p(t) dt}{\int_{0ms}^{80ms} p(t)^2 dt}$$

La media tra 125 Hz e 1 kHz deve essere  
 $0.1 < L_f < 0.35$   
per le sale da musica

# Parametri binaurali per la spazialità

## Correlazione mutua interaurale (IACC)

Il parametro di *Interaural Cross Correlation* è correlato all'impressione spaziale, all'involuppo e alla larghezza percepita del suono dall'ascoltatore.

Si definisce l'*interaural cross correlation function IACF*:

$$IACF(\tau) = \frac{\int_{t_1}^{t_2} p_l(t) \cdot p_r(t + \tau) dt}{\sqrt{\int_{t_1}^{t_2} p_l^2(t) dt \int_{t_1}^{t_2} p_r^2 dt}}$$

dove  $p_l(t)$  è la risposta all'impulso all'orecchio sinistro e  $p_r(t)$  al destro.

Il parametro IACC è quindi dato da:

$$IACC = \max \text{ value of } |IACF(t)| \text{ per } -1 \text{ ms} < t < 1 \text{ ms}$$

Ci sono ancora approcci differenti per la stima dell'IACC, soprattutto riguardanti la scelta dei tempi limiti  $t_1$  e  $t_2$ . Anche la normativa ISO3382 si afferma che l'utilizzo dell'IACC non è stato ancora accettato uniformemente.

## Forma generale:

$$t_1 = 0 \text{ ms}$$

$$t_2 = +\infty \quad (\text{ossia circa il tempo di riverberazione})$$

IACC generalmente si misura da 125 ÷ 4000 Hz

$$IACF(\tau) = \frac{\int_{0\text{ms}}^{\infty} p_l(t) \cdot p_r(t + \tau) dt}{\sqrt{\int_{0\text{ms}}^{\infty} p_l^2(t) dt \int_{0\text{ms}}^{\infty} p_r^2 dt}}$$

## Altre possibilità:

Si possono considerare solo le prime riflessioni:

$$IACC_E \left\{ \begin{array}{l} t_1 = 0 \text{ ms} \\ t_2 = 80 \text{ ms} \end{array} \right.$$

Oppure solo la parte riverberante:

$$IACC_L \left\{ \begin{array}{l} t_1 = 80 \text{ ms} \\ t_2 = +\infty \end{array} \right.$$

# BERANEK

$(I - IACC_E)$  è correlato con la sensazione di spazialità e apparente larghezza della sorgente:

Sceglie un valore mediato di  $IACC_E$  per tre bande di frequenza medio alta:

$$IACC_{E3} = (IACC_{E,500Hz} + IACC_{E,1000Hz} + IACC_{E,2000Hz}) / 3$$

Category	$IACC_{E3}$	$I - IACC_{E3}$
Excellent to superior	0.28 ÷ 0.38	0.62 ÷ 0.72
Good to excellent	0.39 ÷ 0.54	0.46 ÷ 0.61
Fair to good	0.55 ÷ 0.59	0.41 ÷ 0.45

$(I - IACC_L)$  è correlato con la sensazione di essere avvolto dal suono (involuppo - *enveloped*):

$$(I - IACC_L) = LEV \text{ (listener envelopment)}$$

Category	$LEV = (I - IACC_L)$
Excellent	0.13
Good	0.15

# Parametri di intelligibilità



	<h2 style="text-align: center;">METODI SOGGETTIVI</h2> <p style="text-align: center;">(test in campo con liste di parole e questionari)</p>	<h2 style="text-align: center;">METODI OGGETTIVI</h2> <ul style="list-style-type: none"> <li>- <b>STI</b>: Speech Transmission Index</li> <li>- <b>SIL</b>: Speech Interference Level</li> <li>- <b>SII</b>: Speech Intelligibility Index</li> <li>- <b>%ALcons</b>: Percentage of Articulation Loss on consonants</li> <li>- <b>AI</b>: Articulation Index</li> <li>- <b>U50</b>: Usefull to detrimental ratio</li> </ul>
<h3 style="text-align: center;">Pro</h3>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Molto affidabili</li> <li>- Ben collaudati</li> <li>- Altamente specializzabili</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Metodi in campo veloci e pratici</li> <li>- Alcuni parametri standardizzati</li> <li>- Buona correlazione con l'intelligibilità</li> </ul>
<h3 style="text-align: center;">Contro</h3>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Molto complessi da gestire</li> <li>- Dipendono dall'oratore e (in maniera minore) dal tester</li> <li>- Dipendono dalla lingua</li> <li>- Richiedono molto post-processing</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Misure indirette</li> <li>- Catena di misura ad hoc</li> <li>- Alcune procedure non semplici da implementare e non automatizzate</li> <li>- Misure indipendenti dalla lingua</li> <li>- Specializzate a diversi ambiti</li> </ul>

# STI / RaSTI

(Rapid) Speech transmission Index

La normativa IEC-60268-16 definisce il metodo per la stima dell'intelligibilità del parlato e fornisce un parametro chiamato STI (*Speech Transmission Index*) che è correlato alla sensazione soggettiva di intelligibilità.

La stessa normativa definisce anche un metodo semplificato per la stima dell'intelligibilità che utilizza il parametro RaSTI (*Rapid Speech Transmission Index*).

## STI

Analizza la MTF in 14 frequenze di modulazione  
(0.63 ÷ 12.5 Hz, 1/3 di ottava)  
e in 7 bande d'ottava  
(125 ÷ 8000 Hz, 1/1 ottava)

Il valore di STI è ottenuto sommando e mediando  
la MFT

## RaSTI

Analizza la MTF in 9 frequenze di modulazione  
(0.7 - 1 - 1.4 - 2 - 2.8 - 4 - 5.6 - 8 - 11.2 Hz)  
e in solo 2 bande d'ottava  
(500 e 2000 Hz)

Il valore di RaSTI è ottenuto sommando e  
mediando la MFT

# %ALcons

## Percentage of Articulation Loss on consonants

Questo parametro è stato definito dal lavoro sperimentale di Peutz.

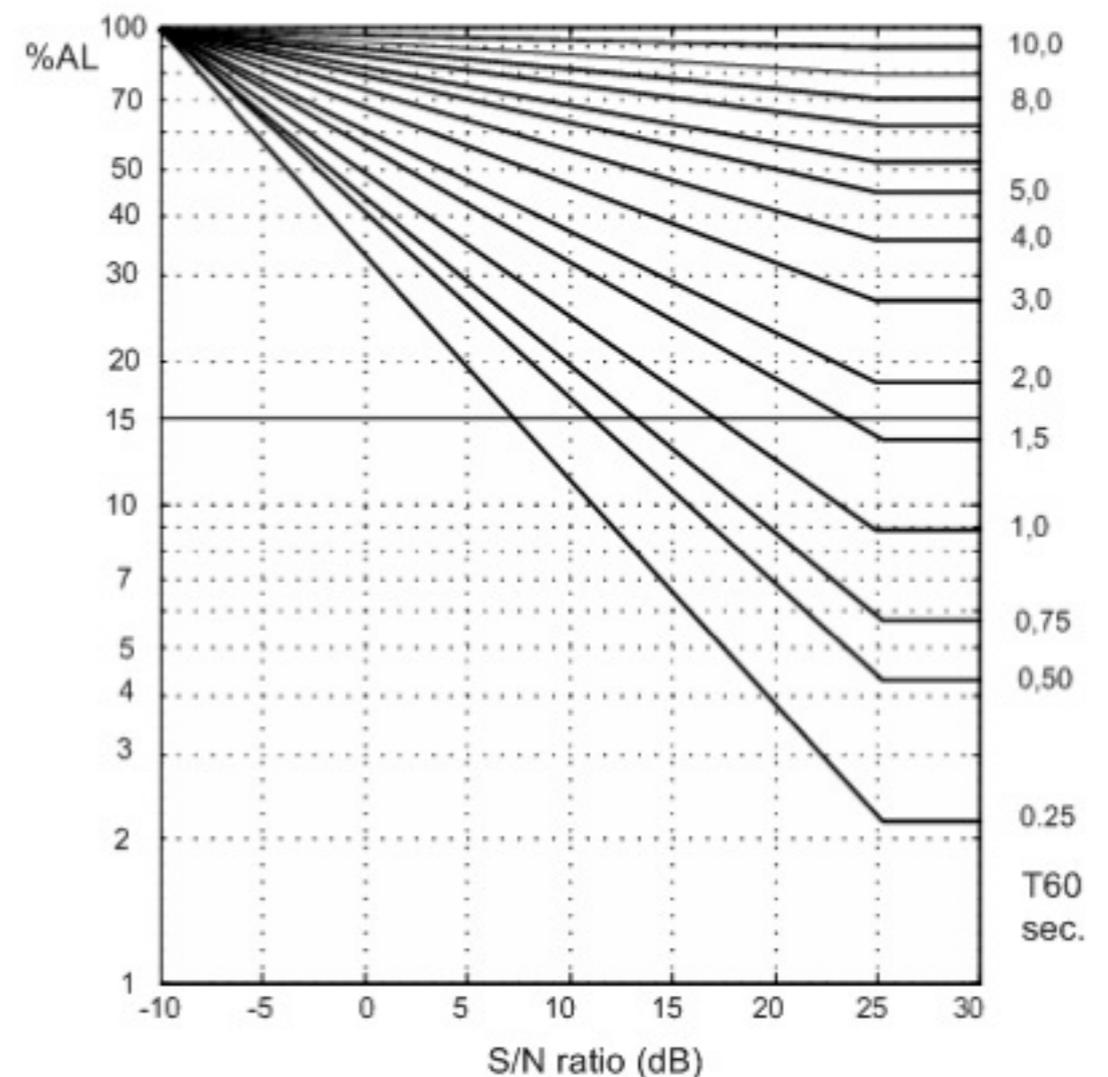
La relazione tra lo STI e %ALcons è data dalle seguenti equazioni:

$$\%AL_{cons} = 170.5405 \cdot e^{-5.419 \cdot STI}$$

$$STI = -0.1845 \cdot \ln(\%AL_{cons}) + 0.9842$$

Nel grafico a fianco viene esposto %ALcons come funzione del rapporto S/N e del tempo di riverberazione

(dati sperimentali per posizione dell'ascoltatore in un campo riverberante diffuso)



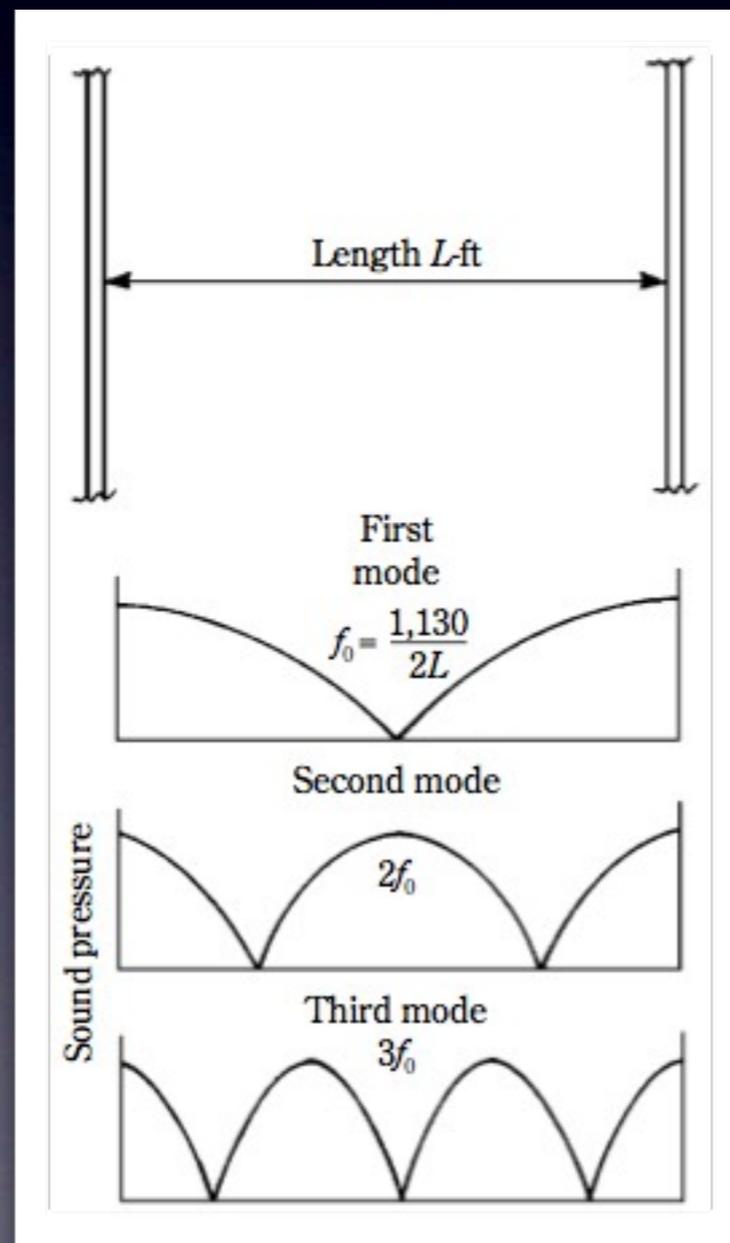
# Valori Ottimali

<b>STI / RaSTI</b>	<b>ALcons</b>	<b>Equivalent Subjective Rating</b>
0.0 ÷ 0.30	100 ÷ 30	Bad
0.30 ÷ 0.45	30 ÷ 15	Poor
0.45 ÷ 0.60	15 ÷ 6.6	Fair
0.60 ÷ 0.75	6.6 ÷ 3	Good
0.75 ÷ 1.00	3 ÷ 0	Excellent

È importante sottolineare che sia lo STI che %ALcons sono parametri acustici utili.

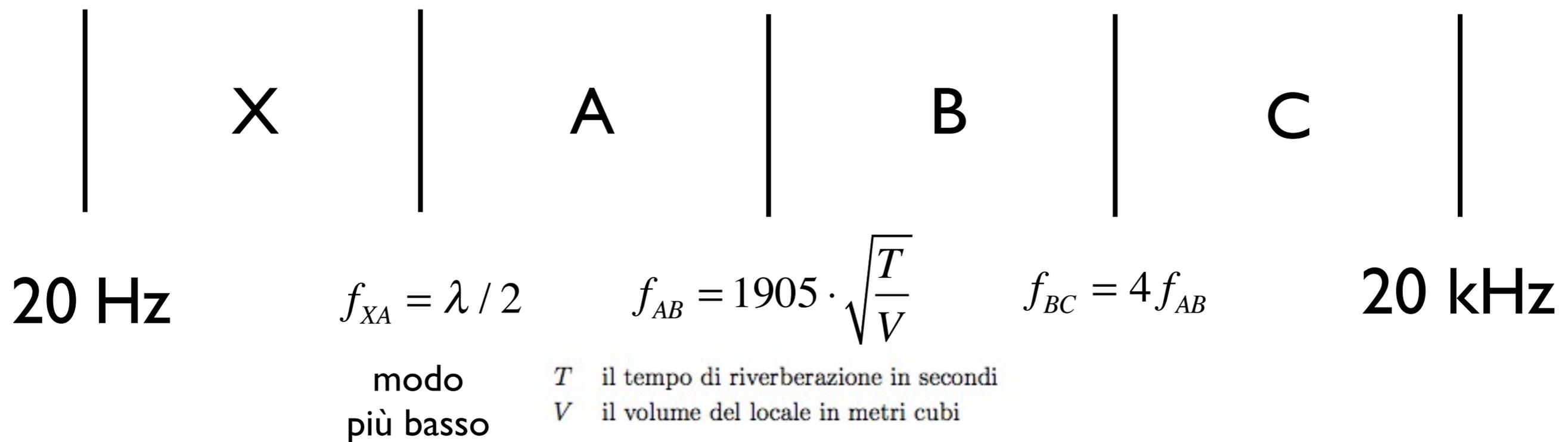
La comparazione con i rating soggettivi di intelligibilità mostra che lo STI da' una stima che casca entro il 5.6% del rating soggettivo, mentre %ALcons entro il 10%.

# Risonanze modali e onde stazionarie



# 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.

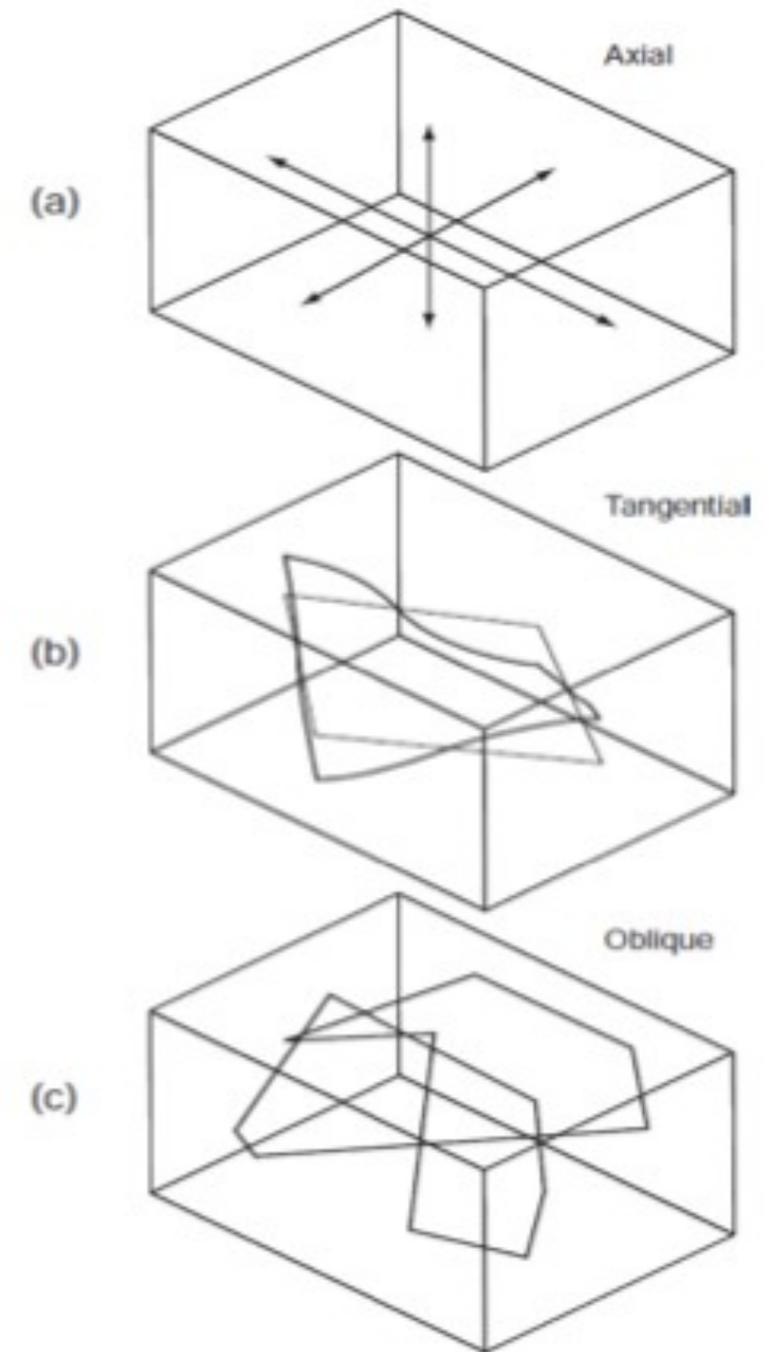
E' dimostrabile che l'aria racchiusa in una stanza rettangolare possiede un infinito numero di modi normali di vibrazione. Le frequenze alle quali occorrono sono date dall'equazione:

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

$c$	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  $p, q, r$



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<sup>3</sup>]

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

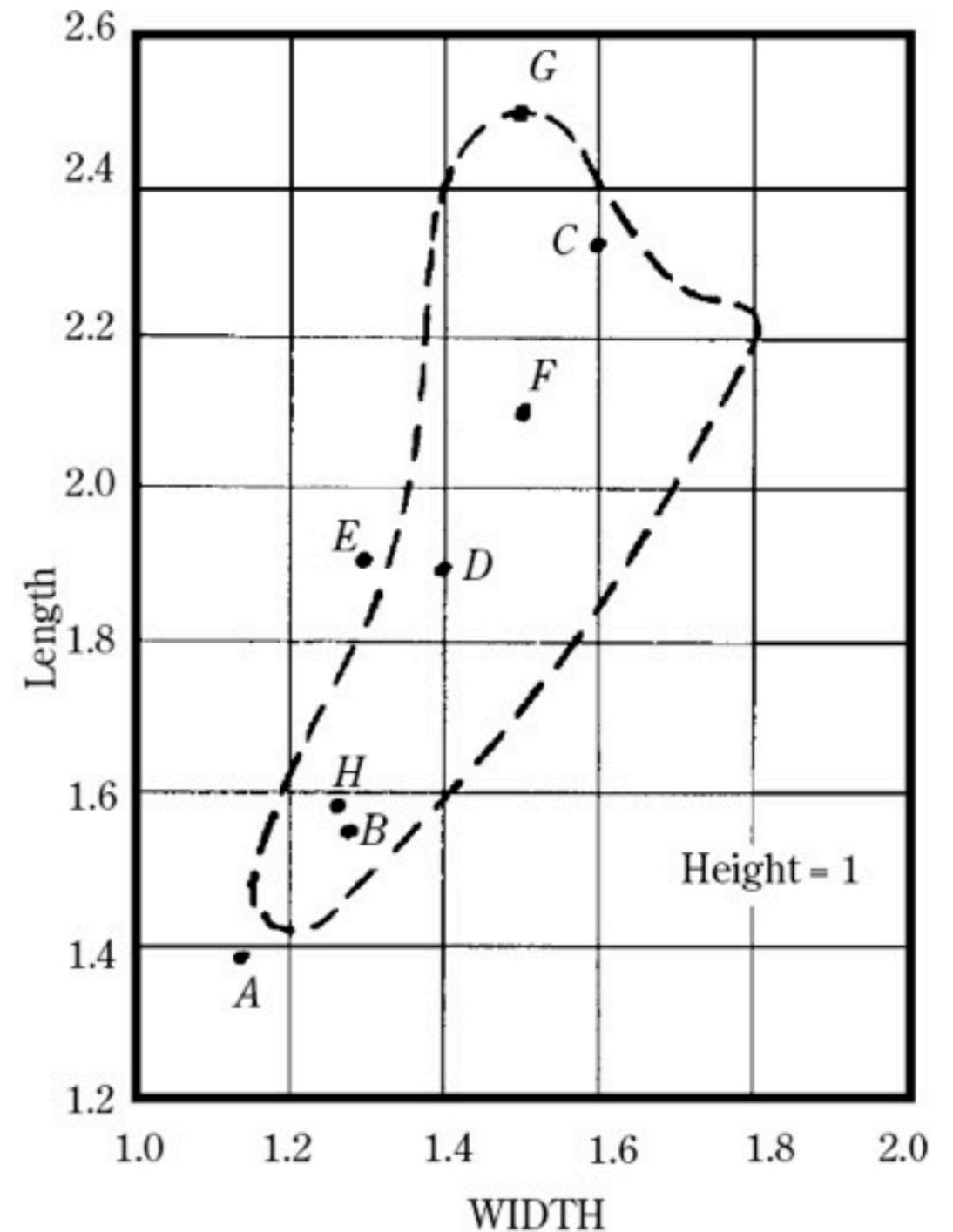
Banda [Hz]	Modi
10... 13	0
13... 16	0
16... 20	1 *
20... 25	1 *
25... 32	2 **
32... 40	3 ***
40... 50	5 *****
50... 63	9 *********
63... 80	17 *****
80... 100	28 *****
100... 125	32 *****
125... 160	25 *****
160... 200	1 *

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

# 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

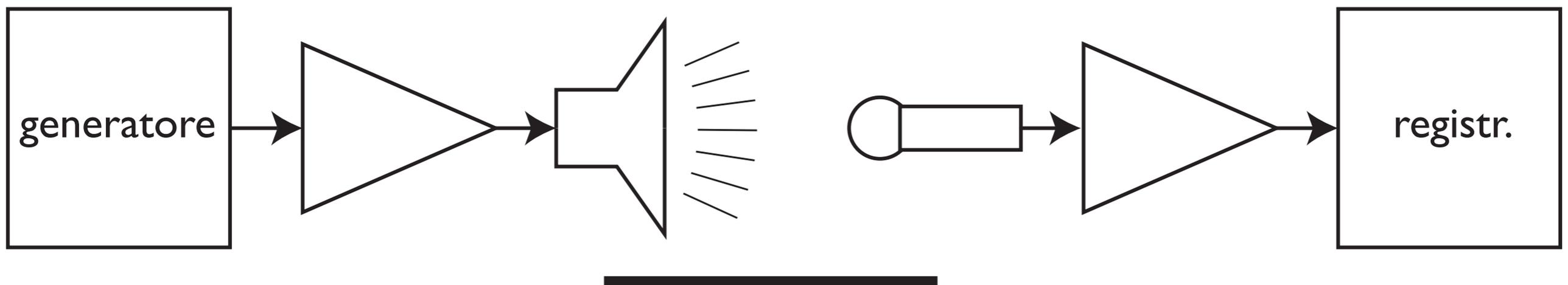
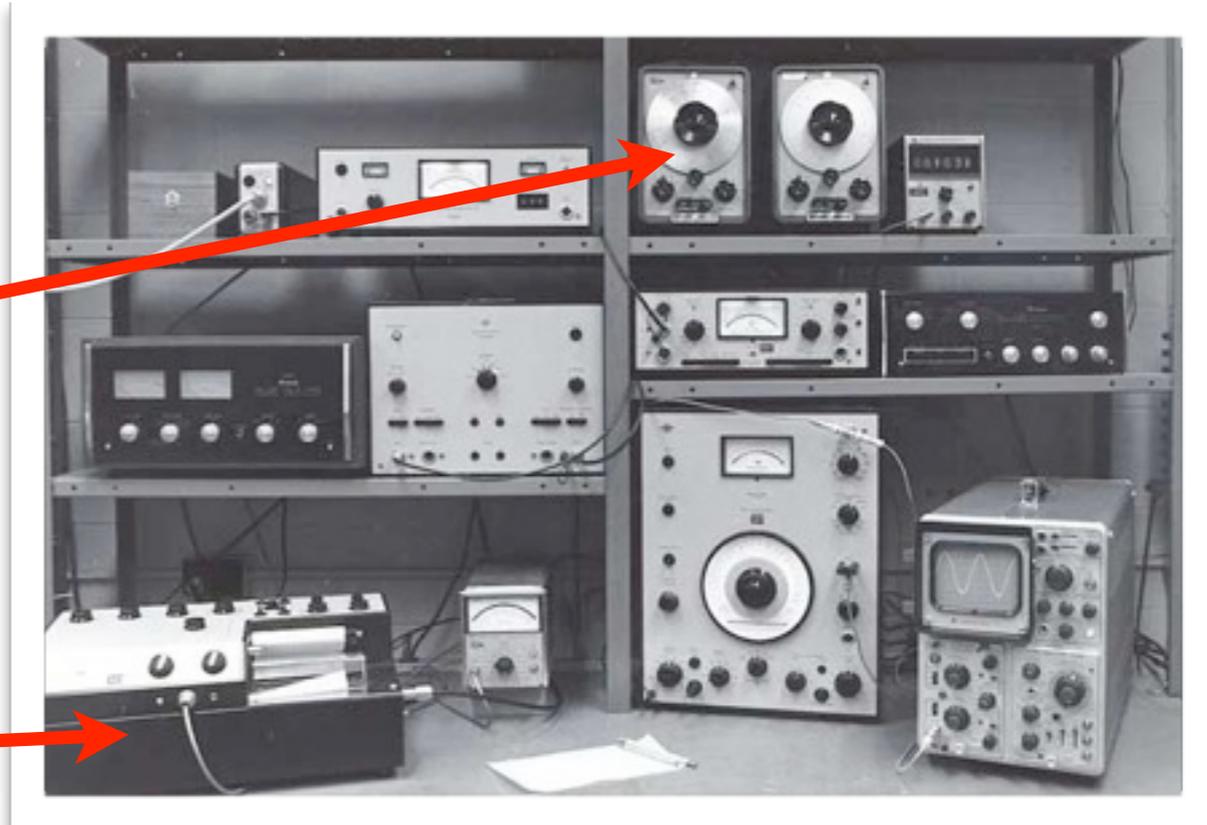
- Alle frequenze superiori, la densità modale è così elevata che le variazioni di pressione sonora rispetto ad un locale rettangolare sono piccole. L'unico vantaggio conseguito è l'eliminazione delle fluttuazioni sonore dovute ad effetti di eco.
- Un locale non rettangolare non dà una distribuzione modale più regolare di quella fornita da un locale rettangolare che rispetti le proporzioni ottimali. (Ma solitamente non è così facile rispettarle...)

# Metodi di misura



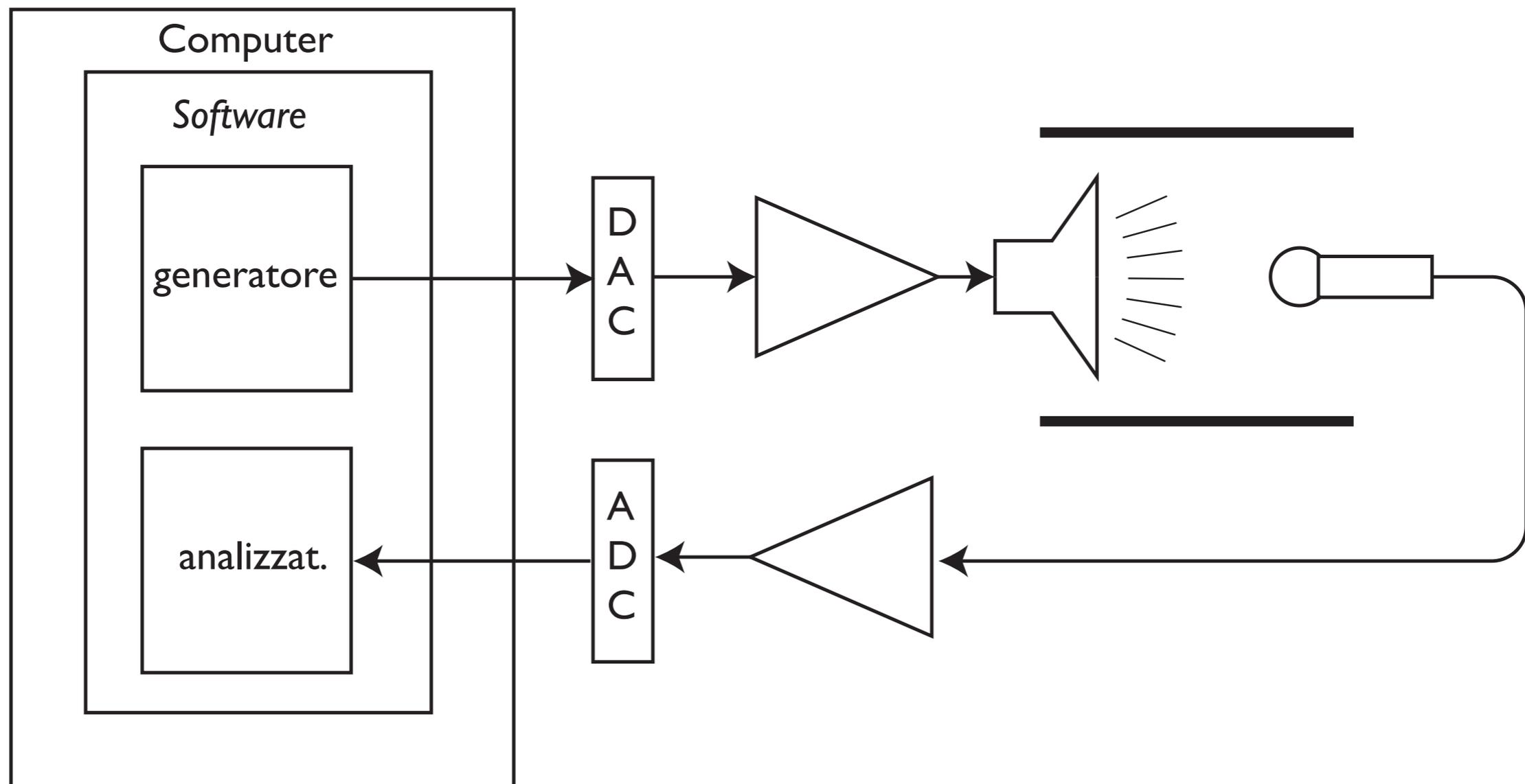
# Strumentazione

Prima dell'avvento della tecnologia digitale si usavano generatori di segnali analogici e le misure erano visualizzate su registratori a carta



# Strumentazione

Attualmente i segnali sono generati e analizzati nel dominio digitale, da opportuni *software* installati sul computer che controlla la misura.



# Decadimento del suono stazionario interrotto

Si misura il decadimento sonoro dopo l'interruzione di un suono continuo prolungato.

I segnali di test vengono emessi tipicamente a 90 dB sonori e spesso il rumore di fondo raggiunge livelli di circa 20 ÷ 30 dB quindi risulta difficile stimare un decadimento di 60 dB per misurare l'RT60.

**NORME ISO:** RT60 è definito come due volte il tempo misurato in un decadimento da -5 a -35 dB sotto il valore iniziale del livello sonoro.

dato che le curve di decadimento spesso presentano doppie pendenze o curvature non trascurabili, questa definizione operativa non corrisponde con quella di Sabine.

# Misura dell'RT60 a diverse frequenze

due metodi di misura:

1. **zona per zona**, usando segnali con contributi solo su una fascia ristretta di frequenze

2. in un'**unica operazione**, usando segnali a larga banda ed analizzando spettralmente il segnale acquisito

il secondo metodo è molto più veloce ma la potenza viene dispersa su tutte le frequenze ed il rapporto segnale rumore si riduce

# Tecniche impulsive

Si possono calcolare l'RT60 e tutti gli altri parametri se si è determinata direttamente o indirettamente la risposta dell'ambiente a un suono impulsivo.

Schematizzazione ambiente acustico come “scatola nera” la cui risposta è lineare e invariante nel tempo:



Da un punto di vista teorico,  
misurando la risposta  $\{h\}$  del sistema  
a un impulso  $\{\delta\}$  avremmo le  
informazioni necessarie a  
calcolare qualsiasi parametro fisico

# Perché non usare quindi sempre una $\{\delta\}$ ?

Il problema è legato all'impossibilità, per qualsiasi genere di altoparlante, di riprodurre un segnale impulsivo brevissimo e sufficientemente intenso senza considerevoli distorsioni in frequenza e fase.

Si introducono quindi varie tecniche che sfruttano sequenze continue e differenti algoritmi per ottenere l'IR:

**Rumore bianco:** segnale casuale con spettro piatto su tutto l'intervallo di frequenze considerato (20 ÷ 20000 Hz).

**Rumore rosa:** segnale casuale con stessa energia per ogni ottava, quindi con spettro piatto su tutto l'intervallo di frequenze considerato (20 ÷ 20000 Hz) in scala logaritmica. Le componenti a bassa frequenza hanno potenza maggiore.

## Sequenze MLS

## Sine-sweep

# PRO dell'MLS

- Si può calcolare la correlazione circolare con la trasformata veloce di Hadamard (FHT).
- MLS è un segnale deterministico: ripetendo la misura ed effettuando una serie di medie del segnale in uscita si fa aumentare il rapporto segnale-rumore di 3 dB ogni volta che si raddoppia il numero di medie.

# CONTRO dell'MLS

- Dipendenza dalla non linearità del sistema. Se il sistema non è perfettamente lineare appaiono “artefatti” sistematici che non possono essere diminuiti neanche mediando più misure.
- Se le sequenze sono più lunghe si aumenta il rapporto s/r, ma se sono troppo lunghe gli effetti dovuti ad una non perfetta tempo-invarianza diventano predominanti.

# PRO del *sine-sweep*

- Il segnale inverso dello sweep è proprio esso stesso invertito sull'asse dei tempi. Quindi con il segnale invertito e il segnale di uscita sarà possibile calcolare l'IR con un'operazione di deconvoluzione.
- La risposta ad un singolo *sweep* non ripetuto è pressoché uguale a quella che si ha con una ripetizione periodica: non è necessario emettere il segnale di test 2 volte. Si dimezzano i tempi di misura.
- Ottimo rapporto s/r (circa 20 dB meglio dell'MLS).
- Il *sine-sweep* è molto meno soggetto ad artefatti causati dalla non perfetta linearità e tempo-invarianza del sistema

# CONTRO del *sine-sweep*

- maggiore complessità dell'algoritmo di analisi, richiede maggiore potenza di calcolo rispetto alle altre tecniche.

# IR e RT60

I tempi di riverberazione misurati direttamente dal decadimento della risposta all'impulso sono leggermente inferiori a quelli prodotti dal decadimento da rumore stazionario e non coincidono con la definizione data da Sabine.

Con l'emissione di un suono impulsivo non si raggiunge la densità di energia sonora di regime in tutto l'ambiente.

La legge di decadimento riverberante è ricostruibile attraverso un integrale della risposta all'impulso:

Integrale di Schroeder 
$$S(t) = \int_t^{\infty} h^2(t) dt$$

che corrisponde all'energia che rimane nell'IR al tempo t.

Mettendo in grafico il rapporto espresso in dB tra l'integrale di Schroeder e il massimo valore misurato al  $t = 0$  si deriva una curva di decadimento analoga a quella che si ottiene con il decadimento del rumore stazionario interrotto.

# Nuova Norma Uni I I 367: Classificazione acustica delle unità immobiliari

- La norma definisce, in riferimento ad alcuni requisiti acustici prestazionali degli edifici, i criteri per la loro misurazione e valutazione.
- Su tale base la norma stabilisce inoltre una classificazione acustica (in riferimento ad ognuno dei requisiti), per l'intera unità immobiliare (salvo alcune tipologie).
- È infine proposta una valutazione sintetica (con un unico indice descrittore) dell'insieme dei requisiti per unità immobiliare.
- I criteri stabiliti nella norma sono applicabili a tutte le unità immobiliari con destinazione d'uso diversa da quella agricola, artigianale e industriale.
- Fornisce un'indicazione per la valutazione delle **caratteristiche acustiche interne** degli ambienti.

# Classificazione Acustica degli edifici

Come per la classificazione energetica, viene introdotto un criterio per la classificazione acustica degli edifici, che tiene di conto dei parametri già descritti nel D.P.C.M. 5/12/97 sui “Requisiti acustici passivi degli edifici”.

# Indicazioni per la valutazione delle caratteristiche acustiche interne degli ambienti

All'interno di ambienti dove il comfort acustico, e in specifico l'intelligibilità del parlato, rivestono un'importanza fondamentale (aule scolastiche, ambienti espositivi, sale da conferenza, mense, etc) e/o dove il controllo dell'assorbimento acustico risulta essere critico (palestre, piscine, ambienti per lo sport in genere), la valutazione acustica richiede la determinazione di alcuni specifici parametri.

# Parametri di intelligibilità: C50 e STI

Le caratteristiche interne di un ambiente, soprattutto quando sia essenziale garantire una buona intelligibilità del parlato, possono essere ben descritte attraverso i parametri C50 (*chiarezza*) e STI (*Speech Transmission Index*).

	C50 dB	STI
Ambienti adibiti al parlato	$\geq 0$	$\geq 0,6$
Ambienti adibiti ad attività sportive	$\geq -2$	$\geq 0,5$

# Tempo di Riverberazione

Nella pratica corrente è molto diffuso, per quanto generalmente meno affidabile, l'utilizzo del tempo di riverberazione  $T$  per valutare le caratteristiche acustiche interne di un ambiente.

I valori ottimali del tempo di riverberazione medio fra 500 Hz e 1000 Hz sono ricavabili dalle espressioni seguenti:

$$T_{\text{ott}} = 0,32 \log(V) + 0,03 \quad [\text{s}] \quad (\text{ambiente non occupato adibito al parlato})$$

$$T_{\text{ott}} = 1,27 \log(V) - 2,49 \quad [\text{s}] \quad (\text{ambiente non occupato adibito ad attività sportive})$$

dove  $V$  è il volume dell'ambiente [ $\text{m}^3$ ]

\* si suggerisce che i risultati ottenuti dalle misurazioni di tempo di riverberazione  $T$  ad ambiente non occupato, rispettino il seguente criterio, in tutte le bande di ottava comprese fra 250 Hz e 4000 Hz:  $T \leq 1,2 T_{\text{ott}}$

\* per quanto riguarda la determinazione del tempo di riverberazione consenta di valutare un ambiente dedicato al parlato, tuttavia per una completa caratterizzazione acustica di un ambiente avente tale utilizzo è consigliabile la rilevazione di altri parametri acustici (come il C50 e lo STI). A maggior ragione il tempo di riverberazione non è adeguato per valutare ambienti utilizzati per l'ascolto della musica (teatri, cinema, etc).

# Espressione grafica del Tempo di Riverberazione Ottimale

C.1 Valori ottimali del tempo di riverberazione medio tra 500 Hz e 1 000 Hz,  $T_{ott}$ , in ambienti adibiti al parlato e ad attività sportiva

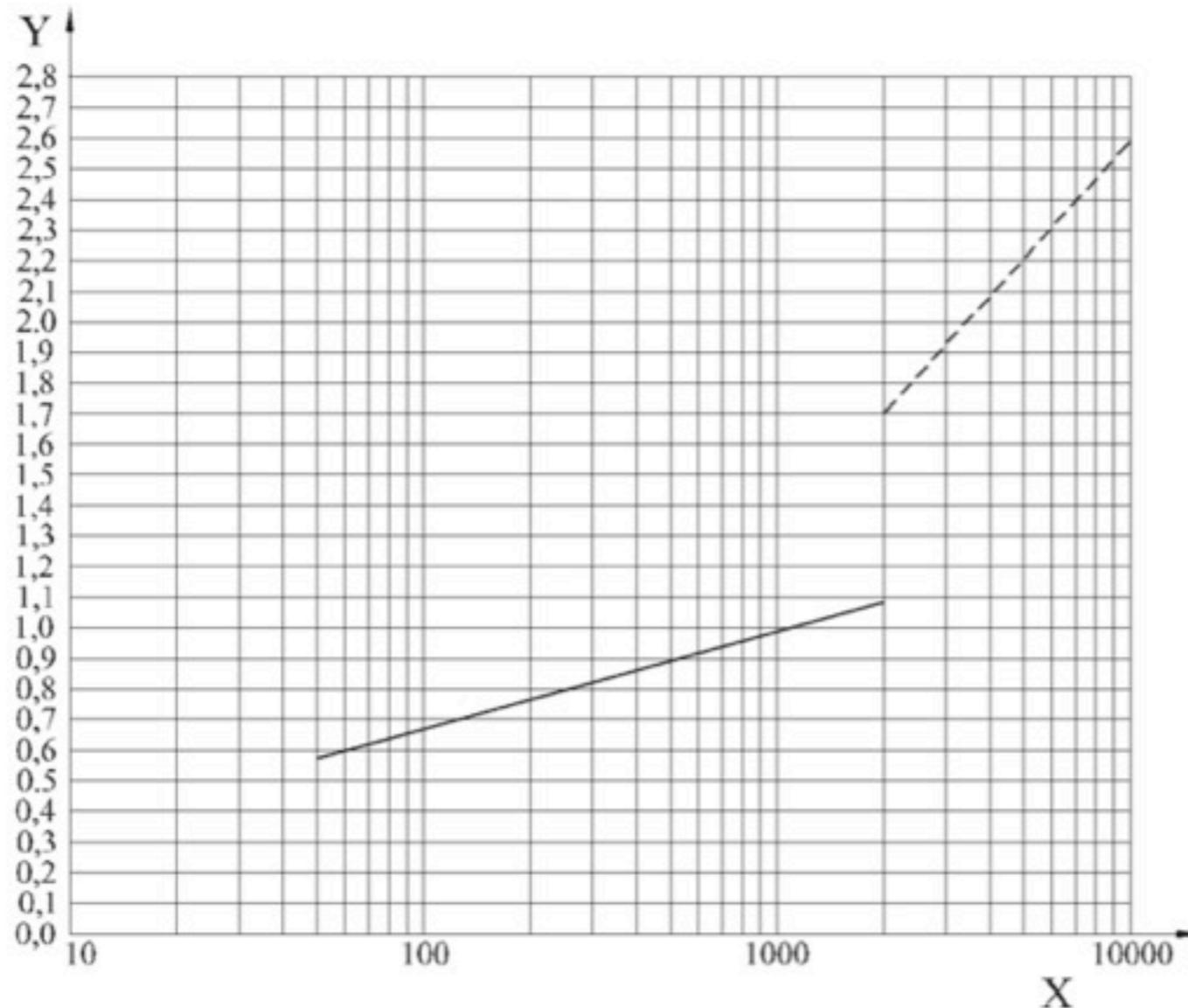
Legenda

—— Parlatto (ambiente non occupato)

----- Sport (ambiente non occupato)

X Volume  $V$ ,  $m^3$

Y Tempo di riverberazione ottimale,  $T_{ott}$ , s



# Bibliografia e testi di riferimento

- Donato Masci: “Parametri Fisici dell’Acustica Ambientale” tesi di Laurea in Fisica;
- 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)