

STUDIO  
SOUND  
SERVICE

Multimedia Content Desing

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

venerdì 30/05/2014 - RAI, Firenze

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.

### Studi per artisti e produttori come:

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

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

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

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

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

### Cinema

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

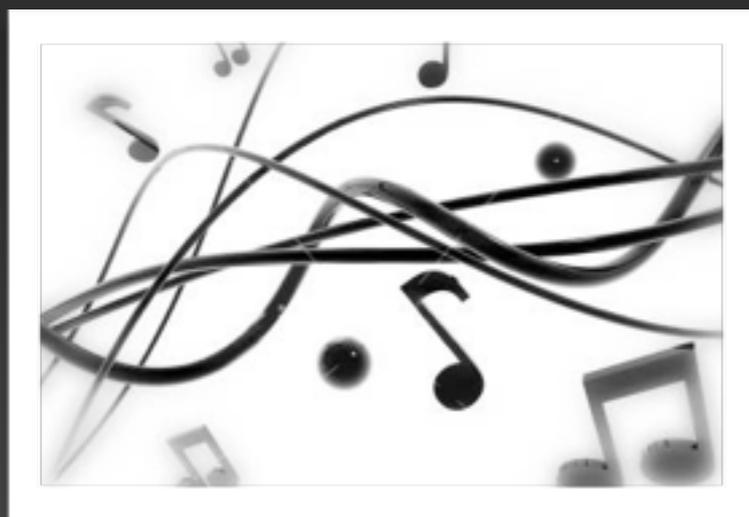
### Edifici Religiosi

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

### Teatri e Auditorium

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

# Il Fenomeno Sonoro



Sorgente

1



Mezzo

*(zona di trasmissione)*

2



Ascoltatore

3

# Il Mezzo elastico

Il suono richiede un mezzo elastico in cui propagarsi.

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

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

# Velocità del suono

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

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

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

# Velocità del suono

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

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

# Grandezze fisiche acustiche

## Pressione acustica

Pressione efficace:

$$p_{eff} = \sqrt{\frac{1}{T} \int_0^T p^2(t) dt}$$

Densità di energia:

$$D = \frac{p_{eff}^2}{\rho \cdot c^2}$$

$\rho$  = densità del mezzo  
 $c$  = velocità del suono

## Livelli sonori:

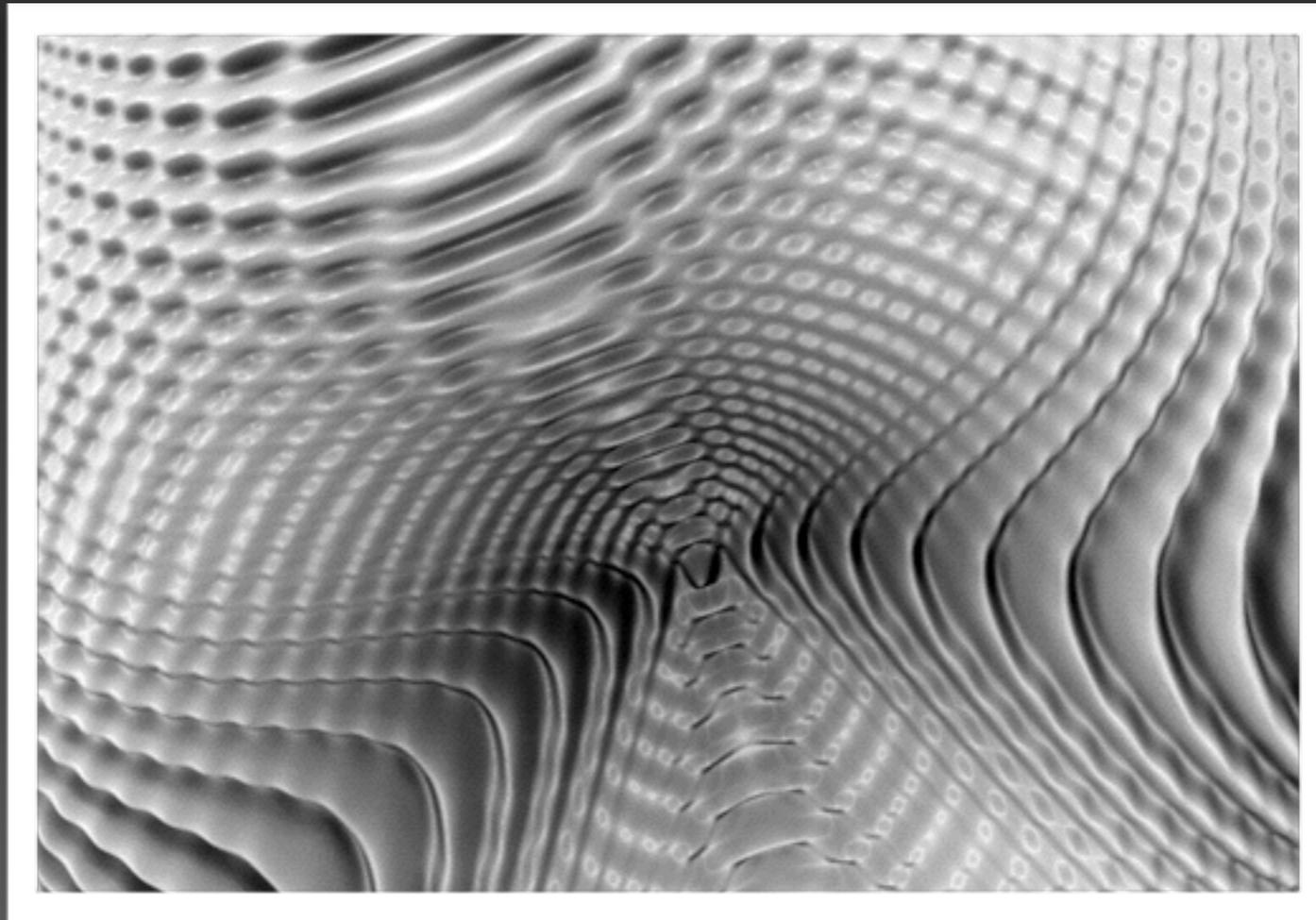
$$L_p = 10 \log \frac{p_{eff}^2}{p_{rif}^2} = 20 \log \frac{p_{eff}}{p_{rif}} \quad \text{dB}$$

$$L_w = 10 \log \frac{w}{w_{rif}}$$

$$p_{rif} = 2 \times 10^{-5} \text{ Pa}$$

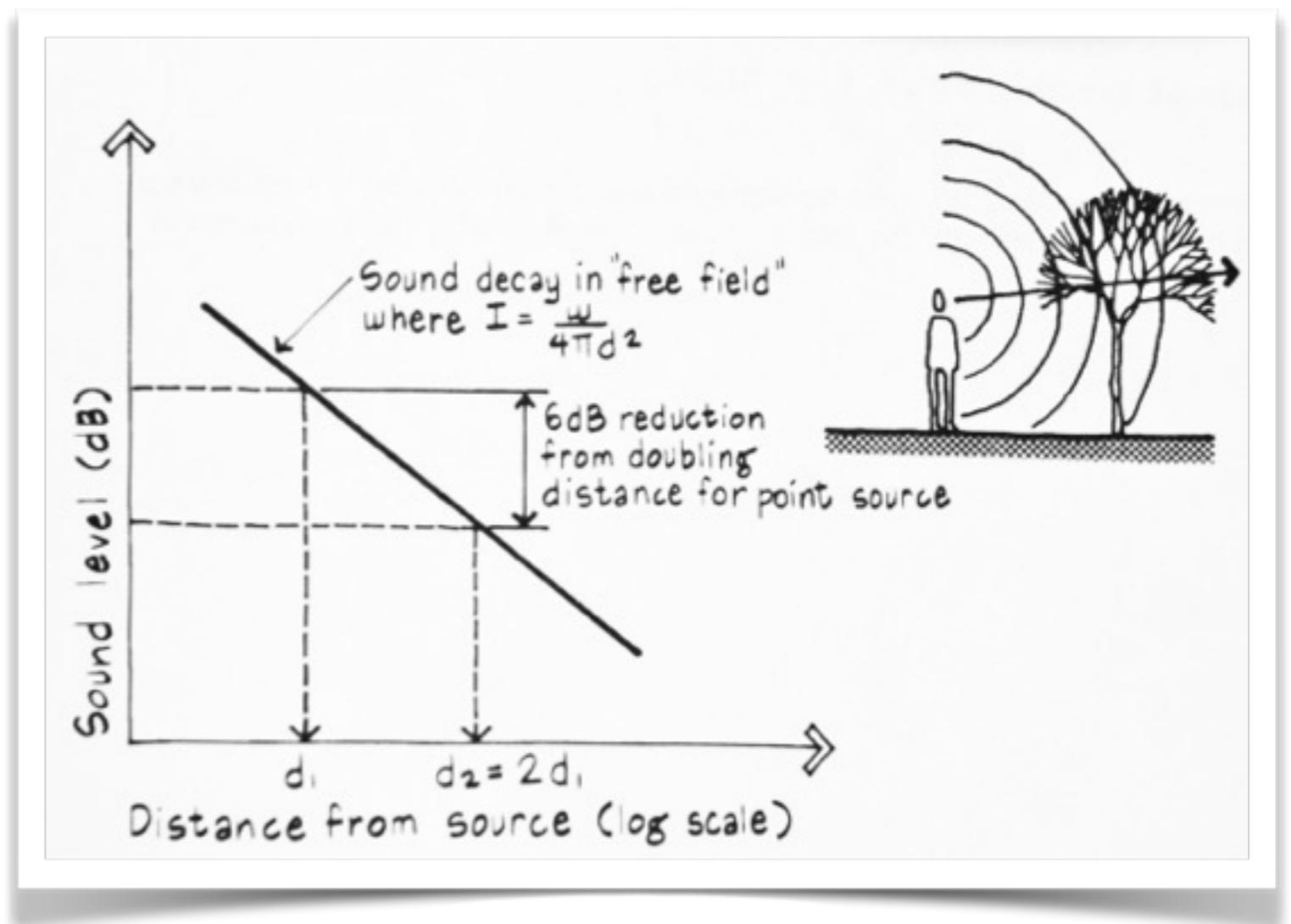
$$w_{rif} = 10^{-12} \text{ W}$$

# 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

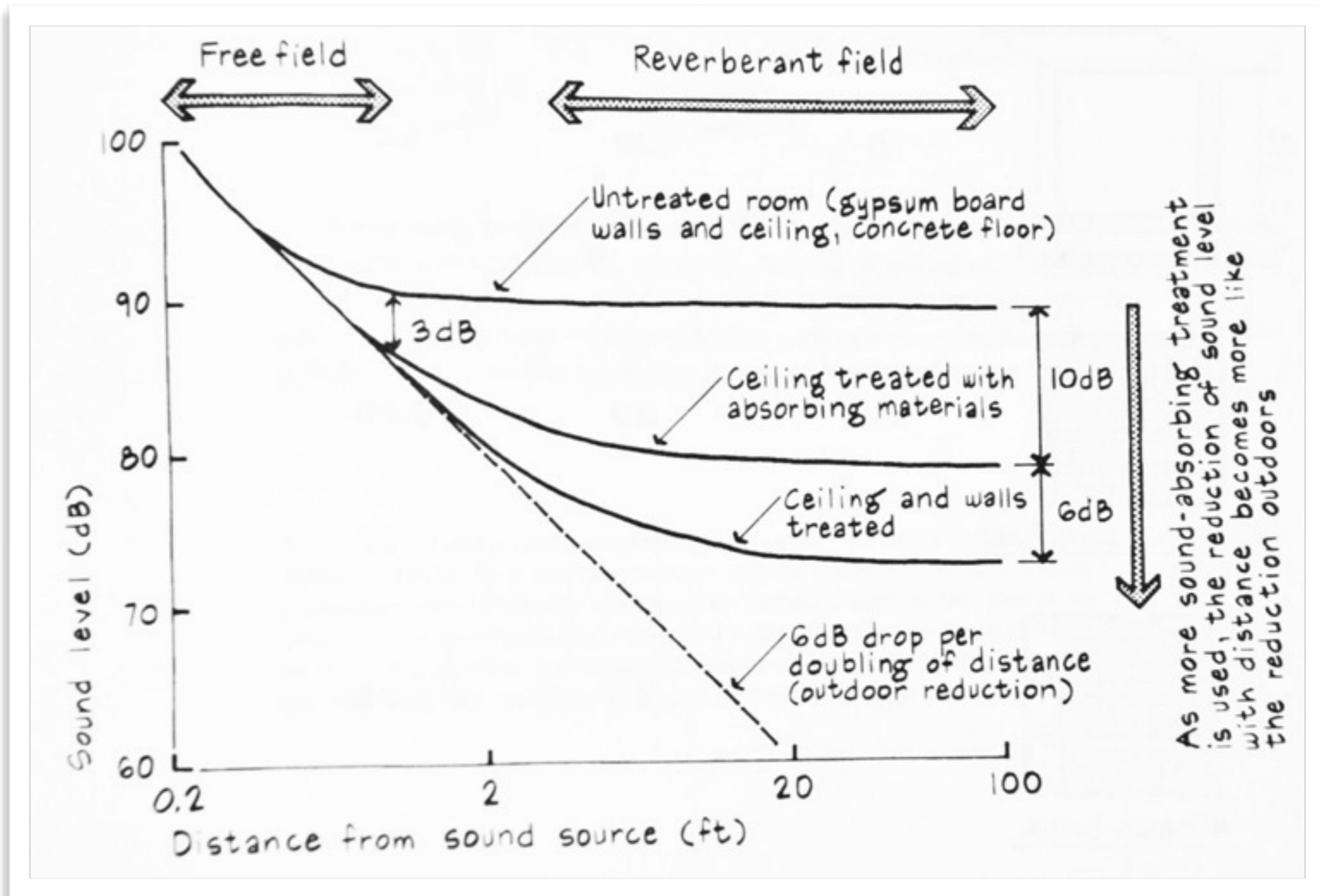
Sorgente Generica  $L_p \cong L_W - 10 \log \frac{400}{\rho c} - 10 \log S$

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

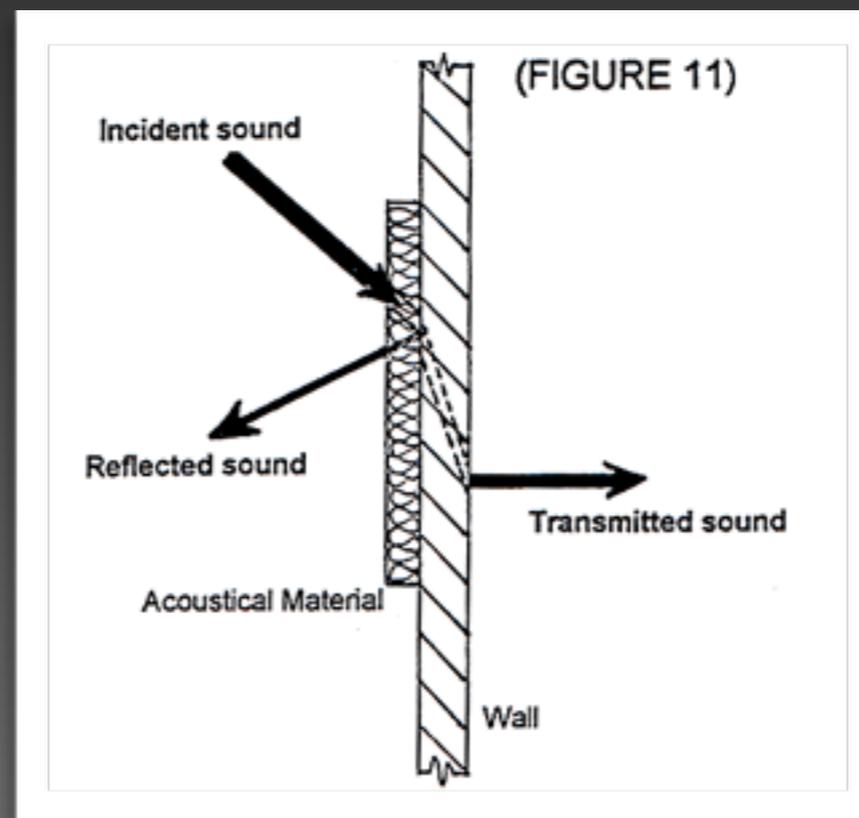
Campo semiriverberante  $L_p \cong L_W + 10 \log \left( \frac{Q}{4\pi r^2} + \frac{4}{R} \right)$

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

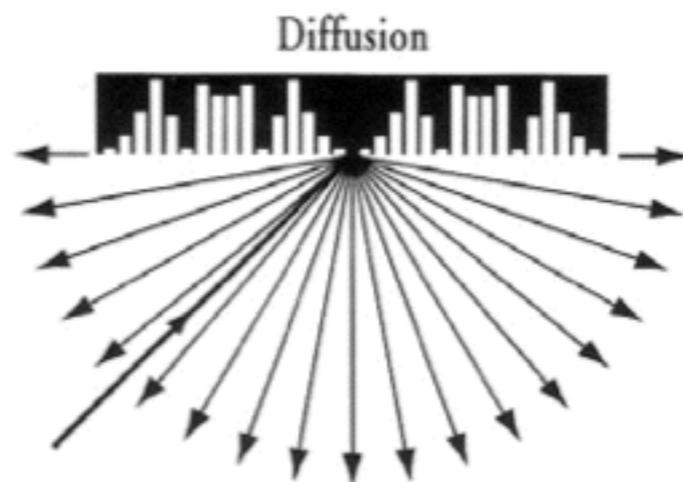
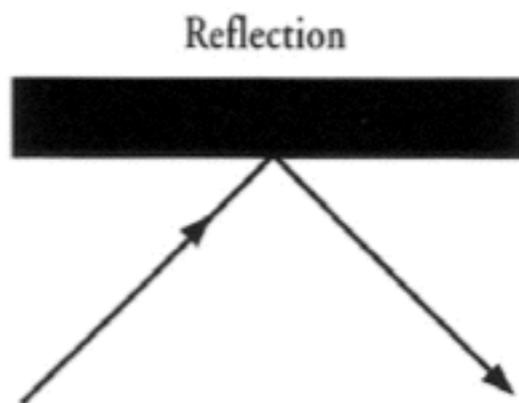
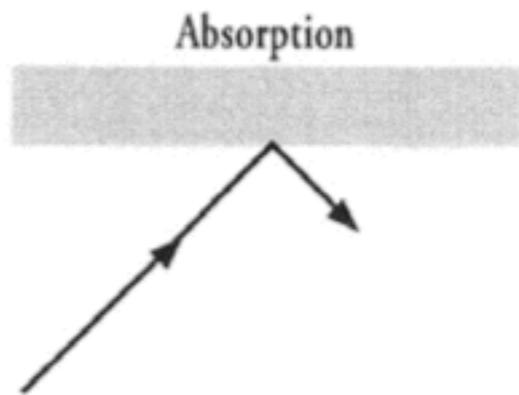
e  $Q$  è il fattore direttività della sorgente  
per sorgenti omnidirezionali è 1

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  $r$ )

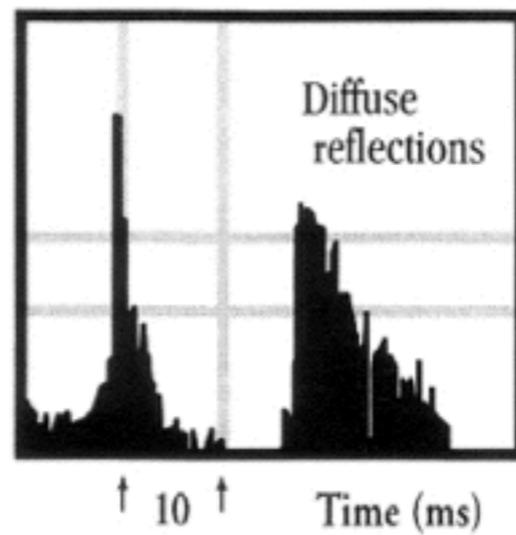
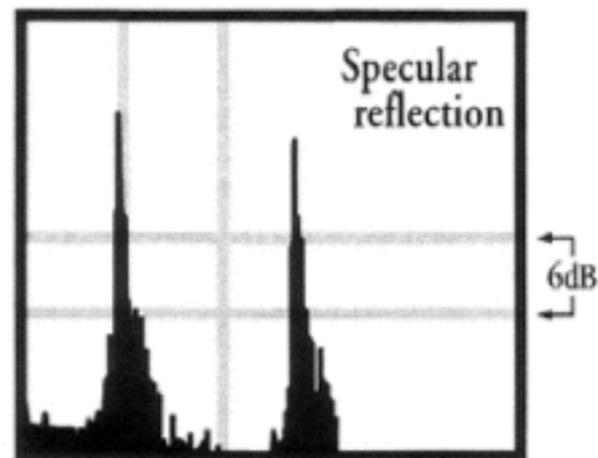
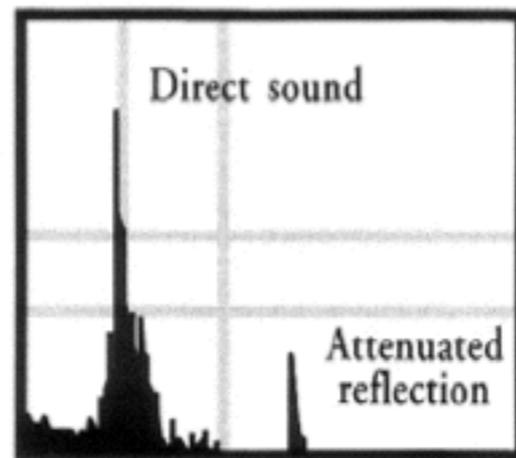
# Proprietà dei Materiali: assorbimento, riflessione e diffusione



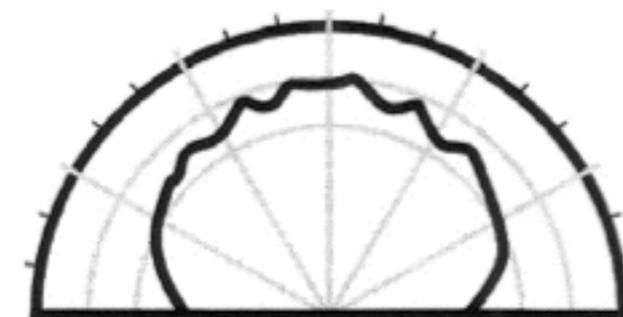
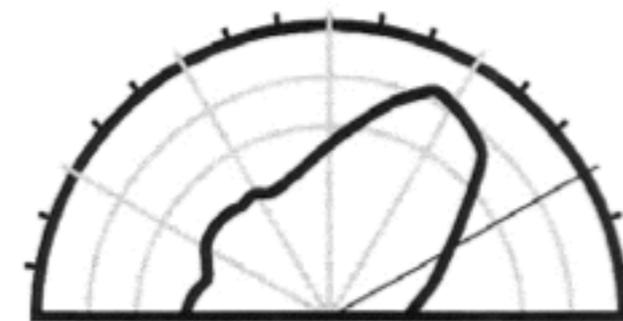
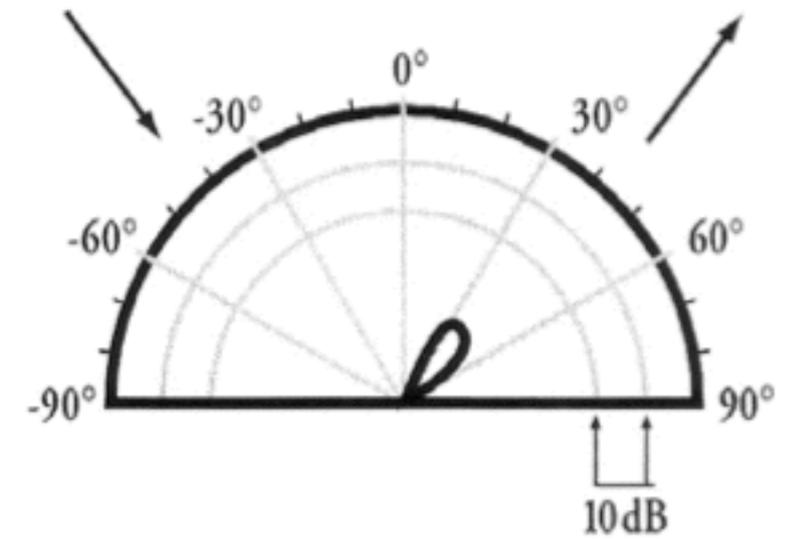
Acoustical treatment



Temporal response

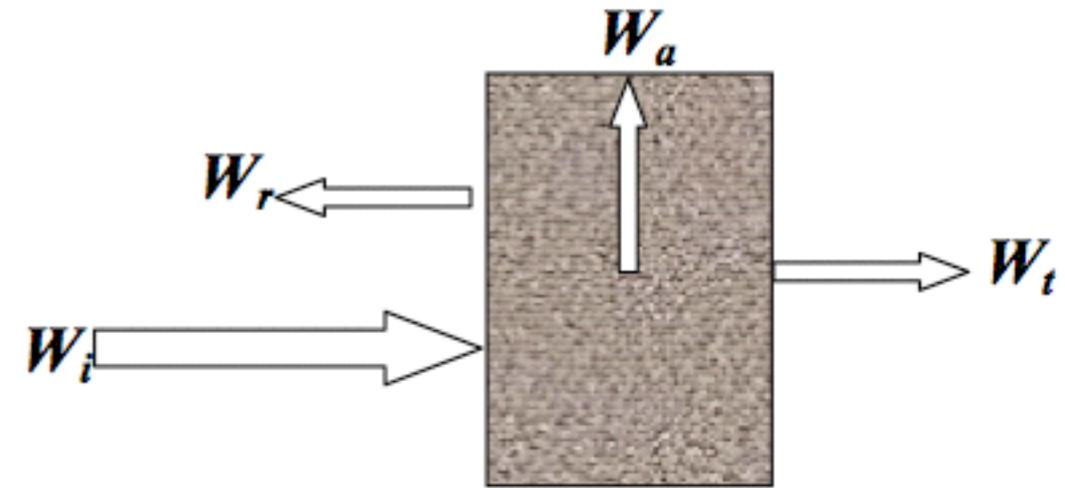


Spatial response



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

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



Bilancio energetico per il teorema della conservazione dell'energia:

$$W_i = W_r + W_a + W_t$$

Definisco i coefficienti come rapporti tra energie:

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

Relazione tra i coefficienti:

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

Definizione di coefficiente di assorbimento acustico apparente:

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

# Assorbimento acustico

Assorbimento acustico  
di una superficie:

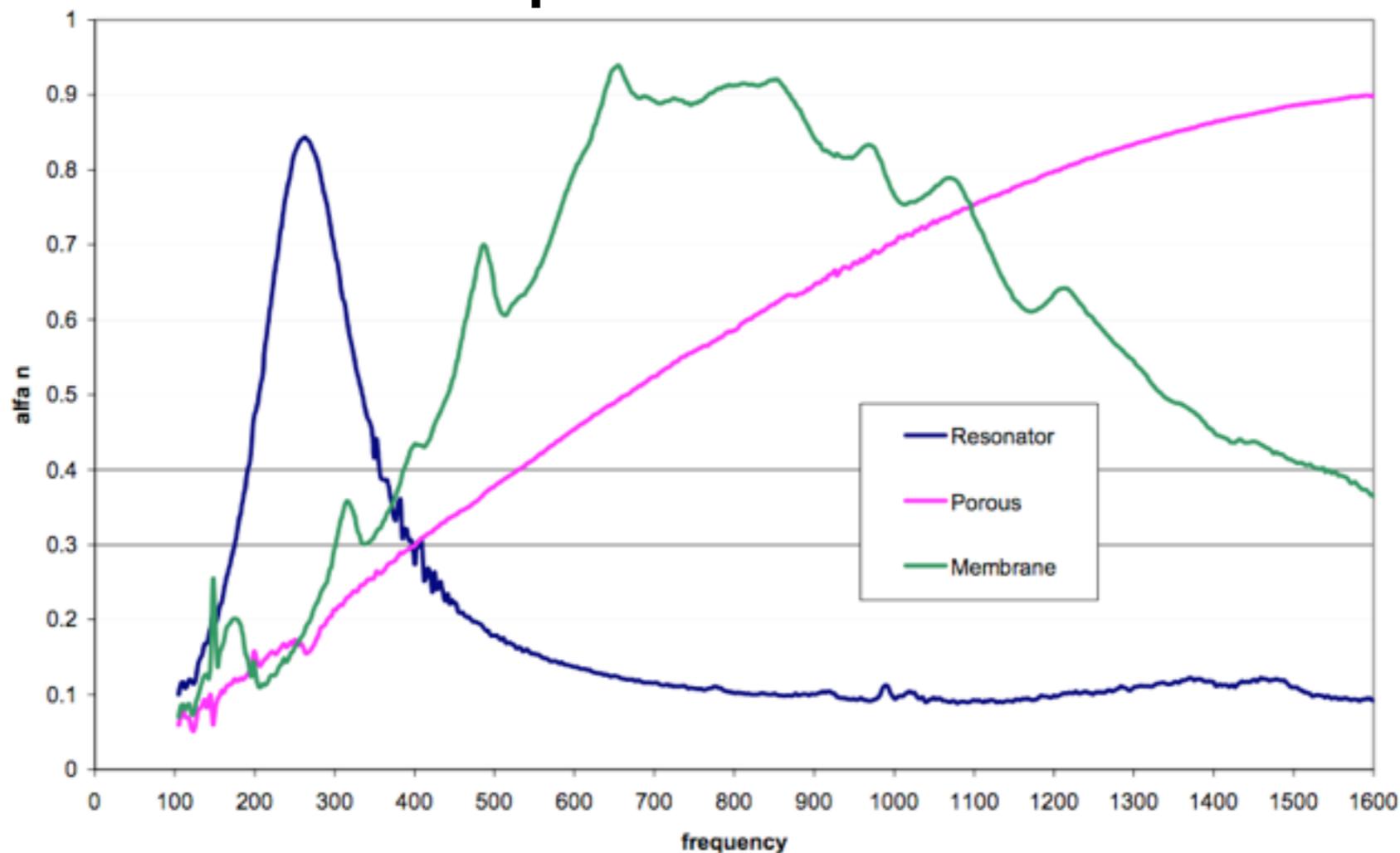
$$A = S \cdot \alpha \quad [\text{m}^2]$$

Assorbimento acustico totale di  
una stanza con n superfici:

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

# Assorbimento acustico

1. Assorbimento per porosità
2. Assorbimento per risonanza di membrana
3. Assorbimento per risonanza di cavità



# I. Materiali assorbenti per porosità

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

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

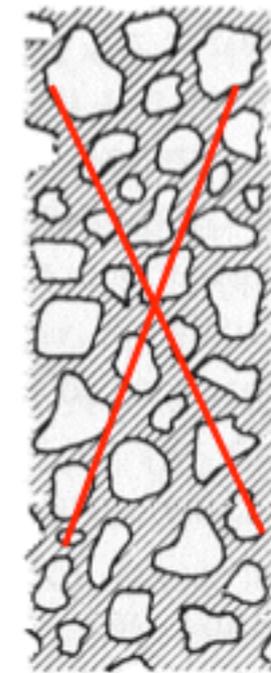
**materiali porosi (o a celle aperte)** (poliuretani espansi a cella aperta, resina melamminica, schiuma espansa a base di polietilene, schiume di alluminio, aggregati di elastomeri espansi, altri materiali aggregati tipo pietra, gomma plastica etc)

# NON SONO FONOASSORBENTI!!!

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

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

**SI**

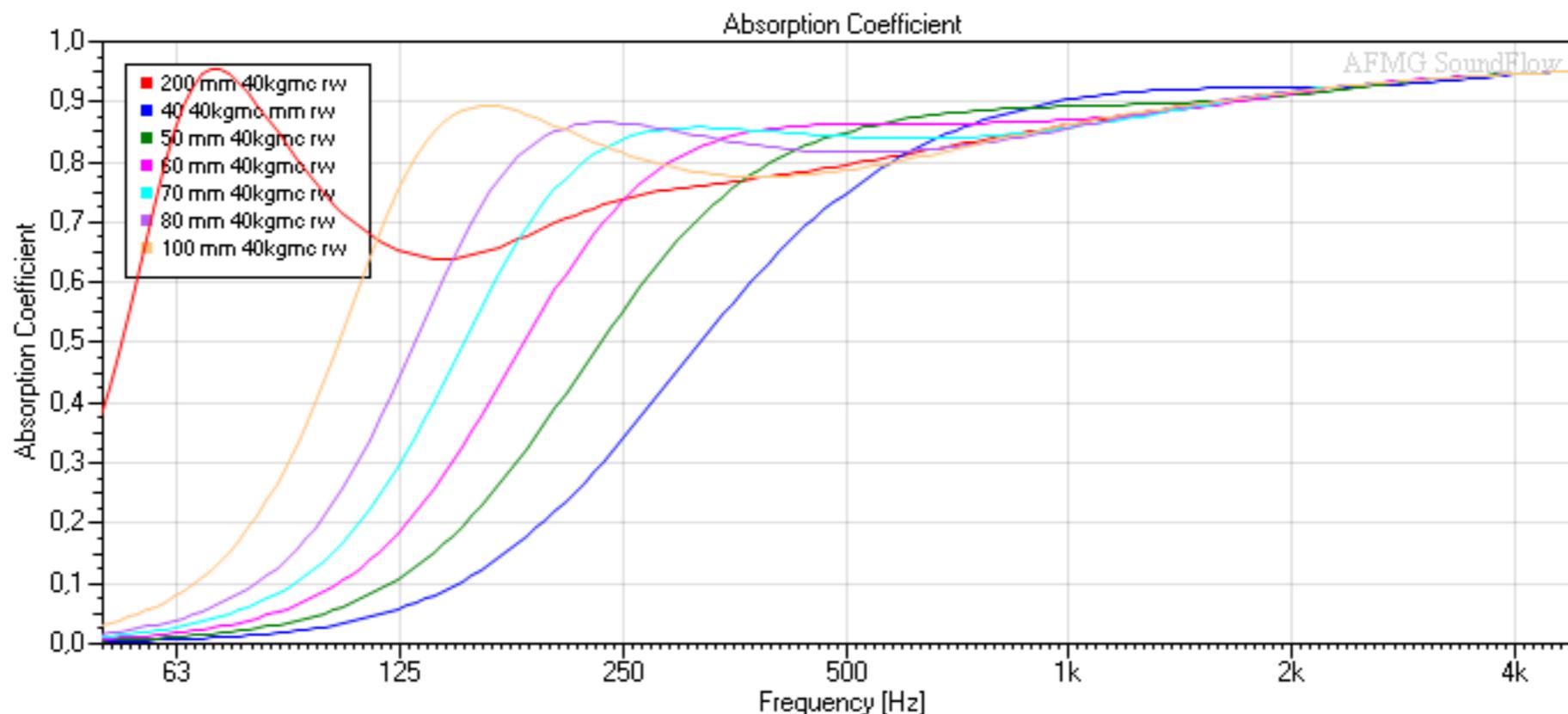


**NO**

Esempio:  
Polietilene,  
poliuretani a cella  
chiusa, polistirolo

# Effetto dello spessore nell'assorbimento

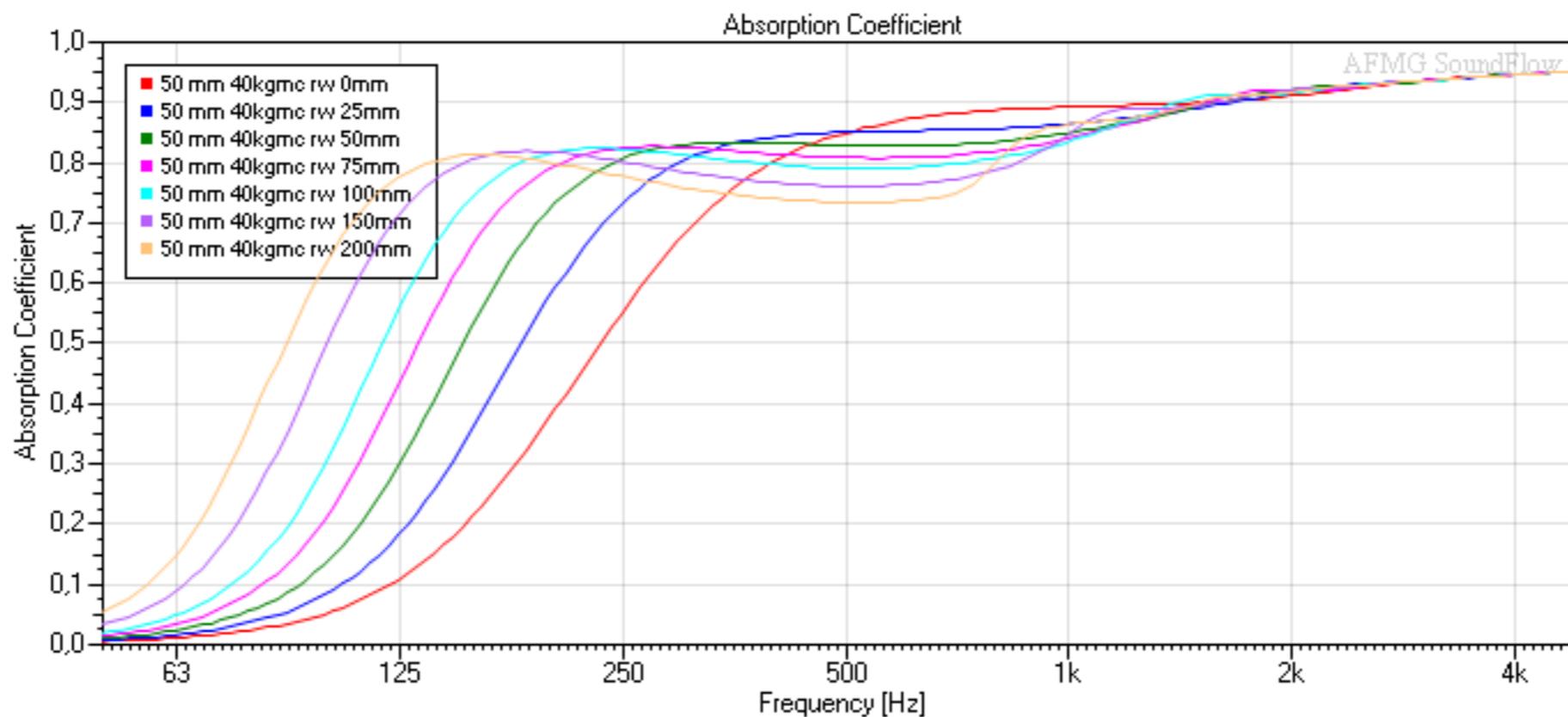
Lo spessore del materiale fonoassorbente aumenta le prestazioni di fonoassorbenza in particolar modo alle basse frequenze.



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

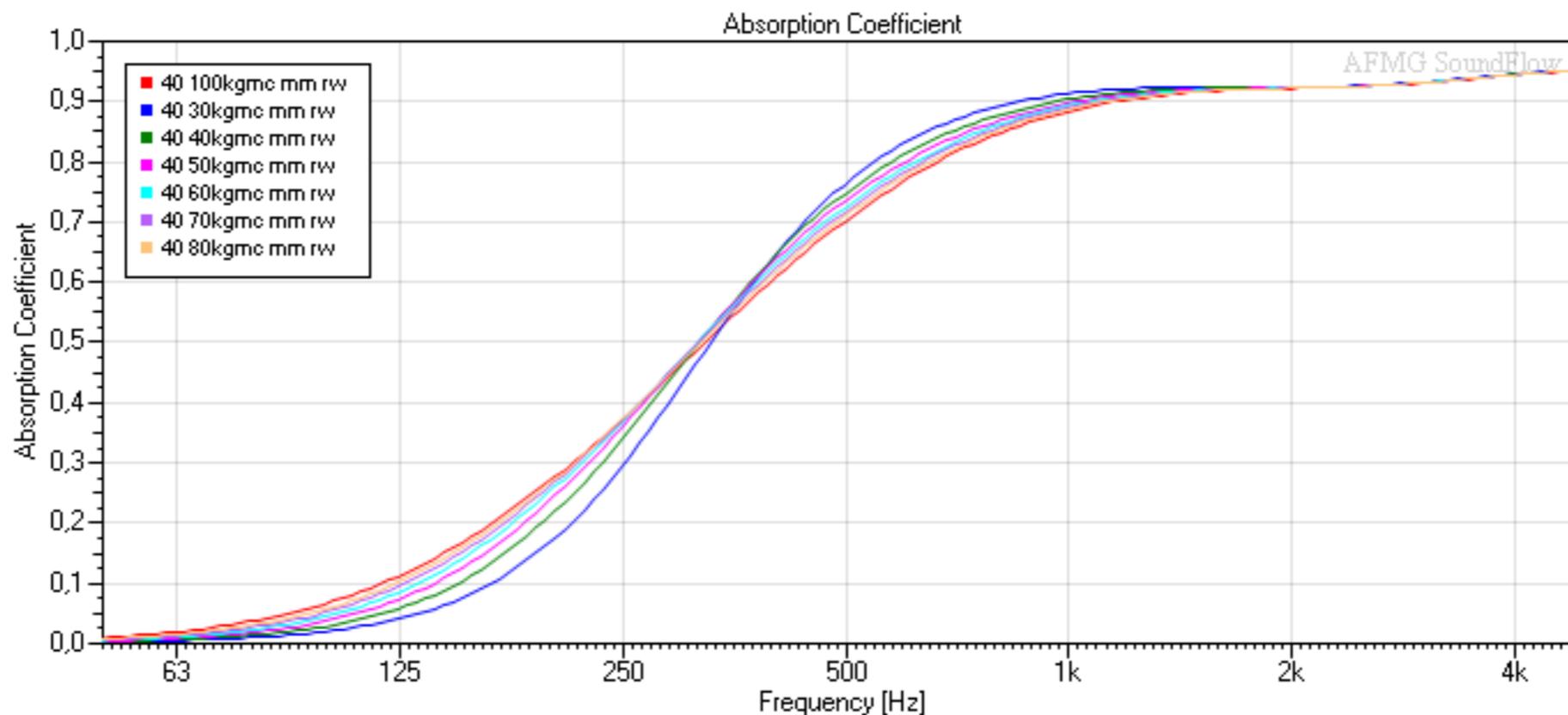
# Effetto della camera d'aria nell'assorbimento

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).

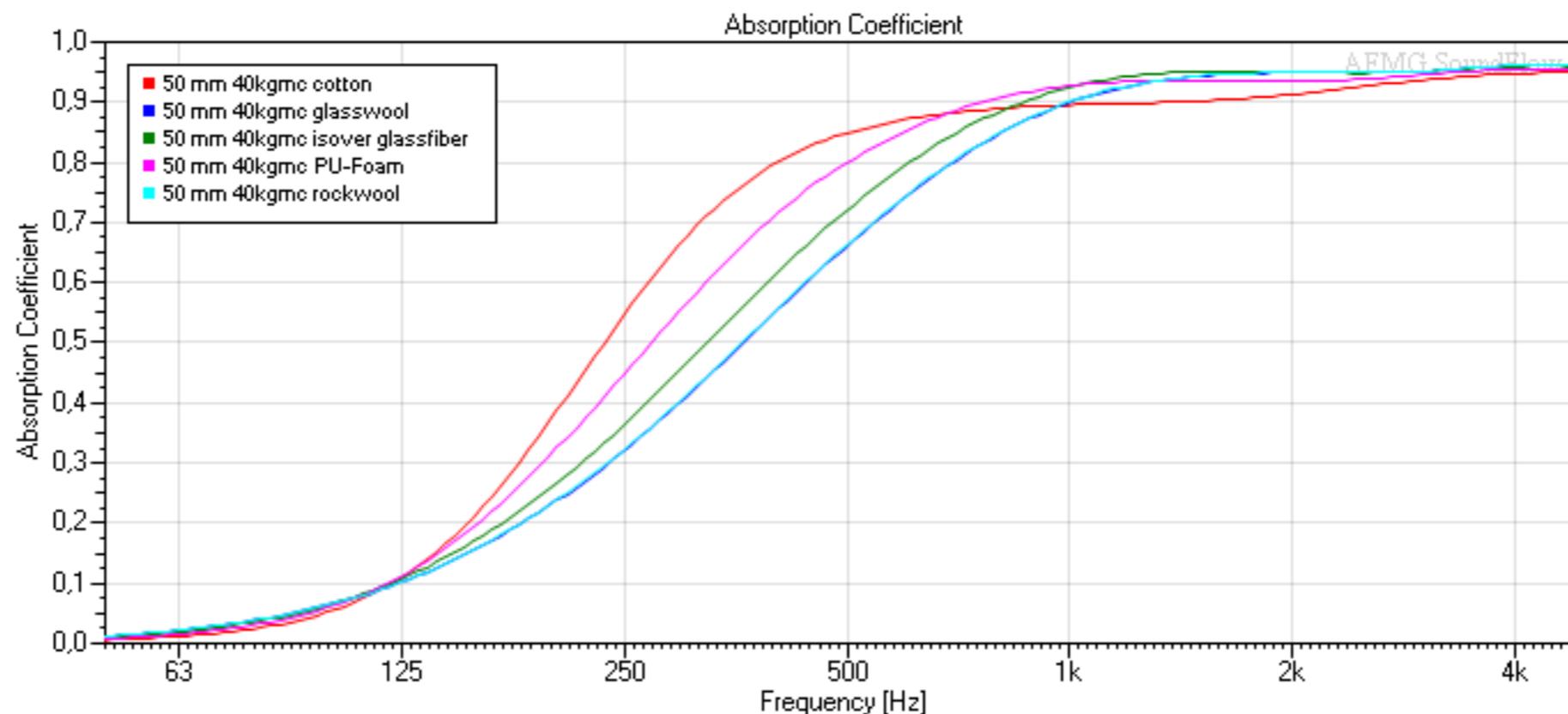


# Effetto della densità nell'assorbimento

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.

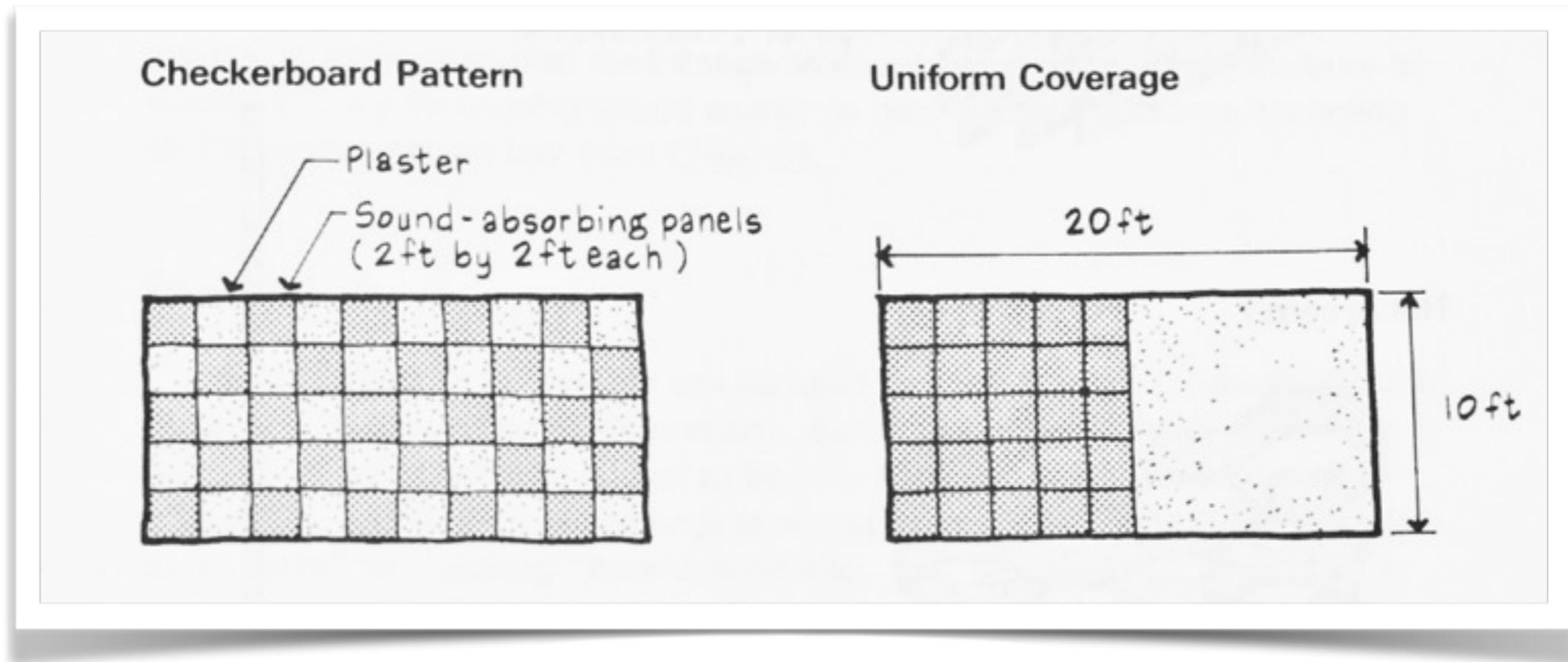


# Diversi materiali fibrosi



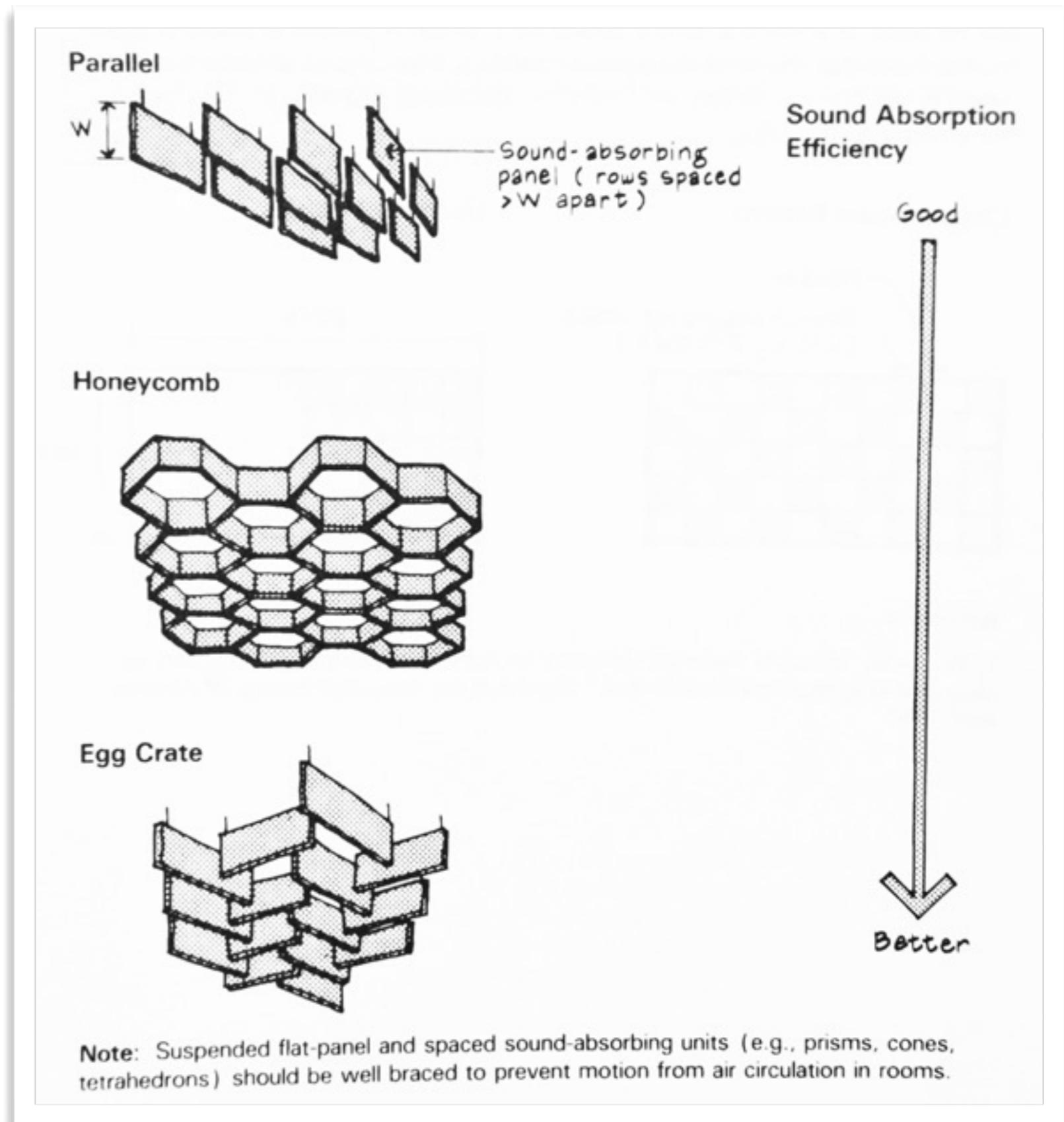
I coefficienti di assorbimento a parità di densità dipendono dalla grandezza delle fibre dei materiali. I coefficienti comunque non cambiano considerevolmente da materiale a materiale.

# “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 addizionale dei loro bordi.

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



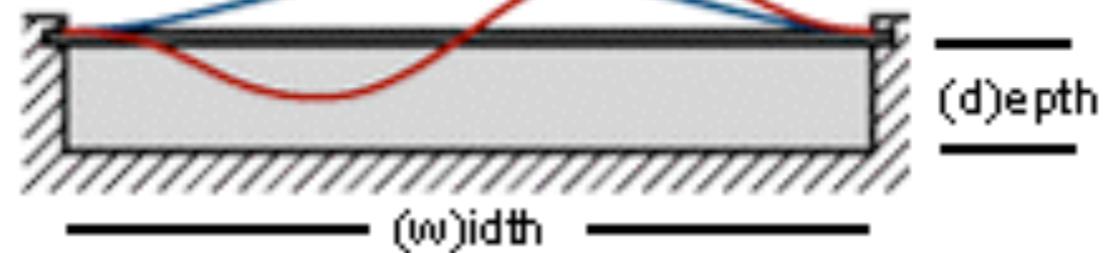
## 2. Assorbitori a membrana

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

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

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

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



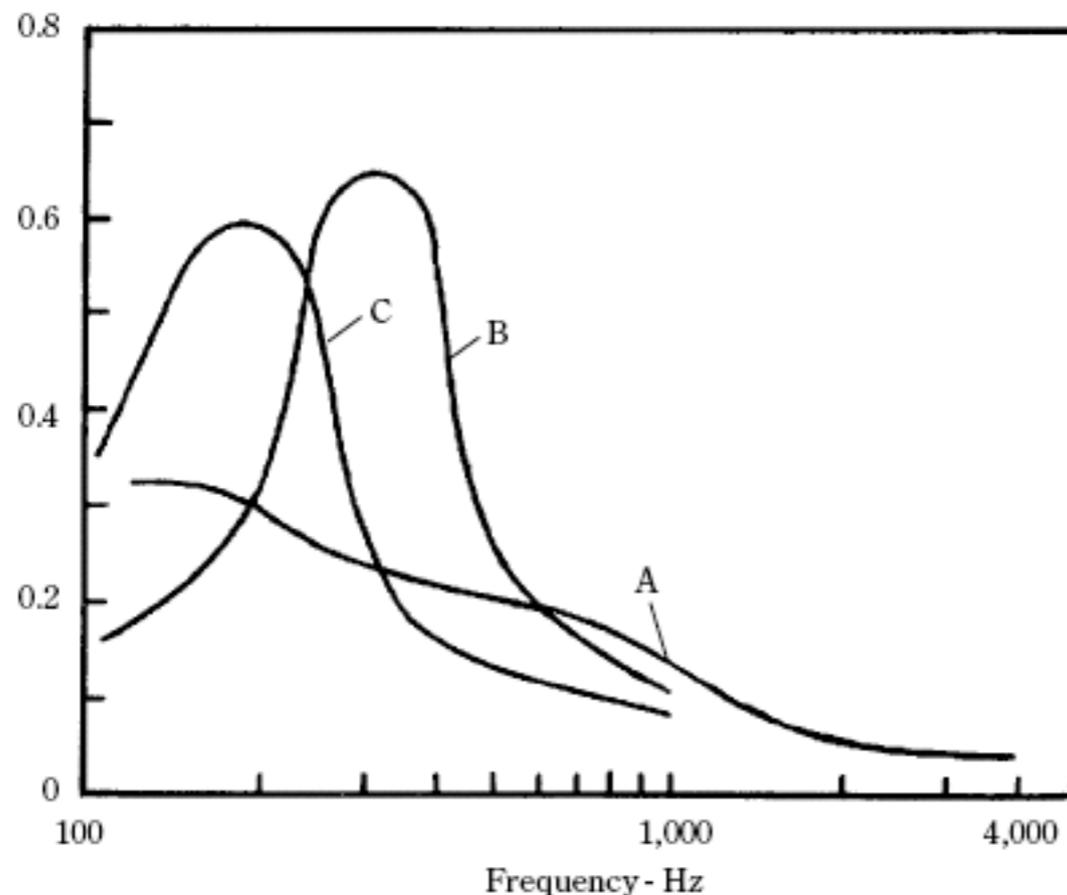
# 2. Assorbitori a membrana

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

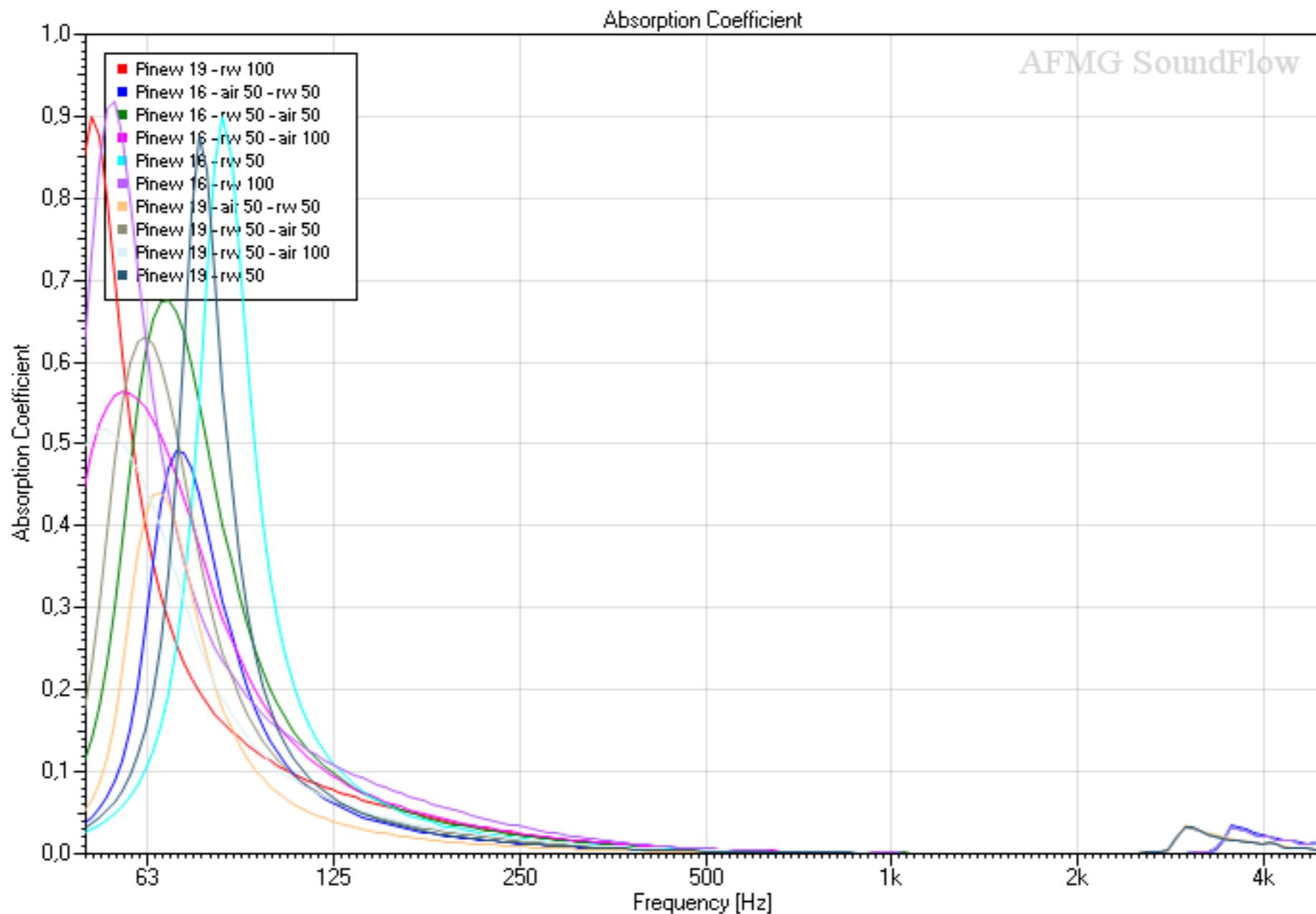
assorbe parte del suono che trasforma in calore per il flettersi delle sue fibre



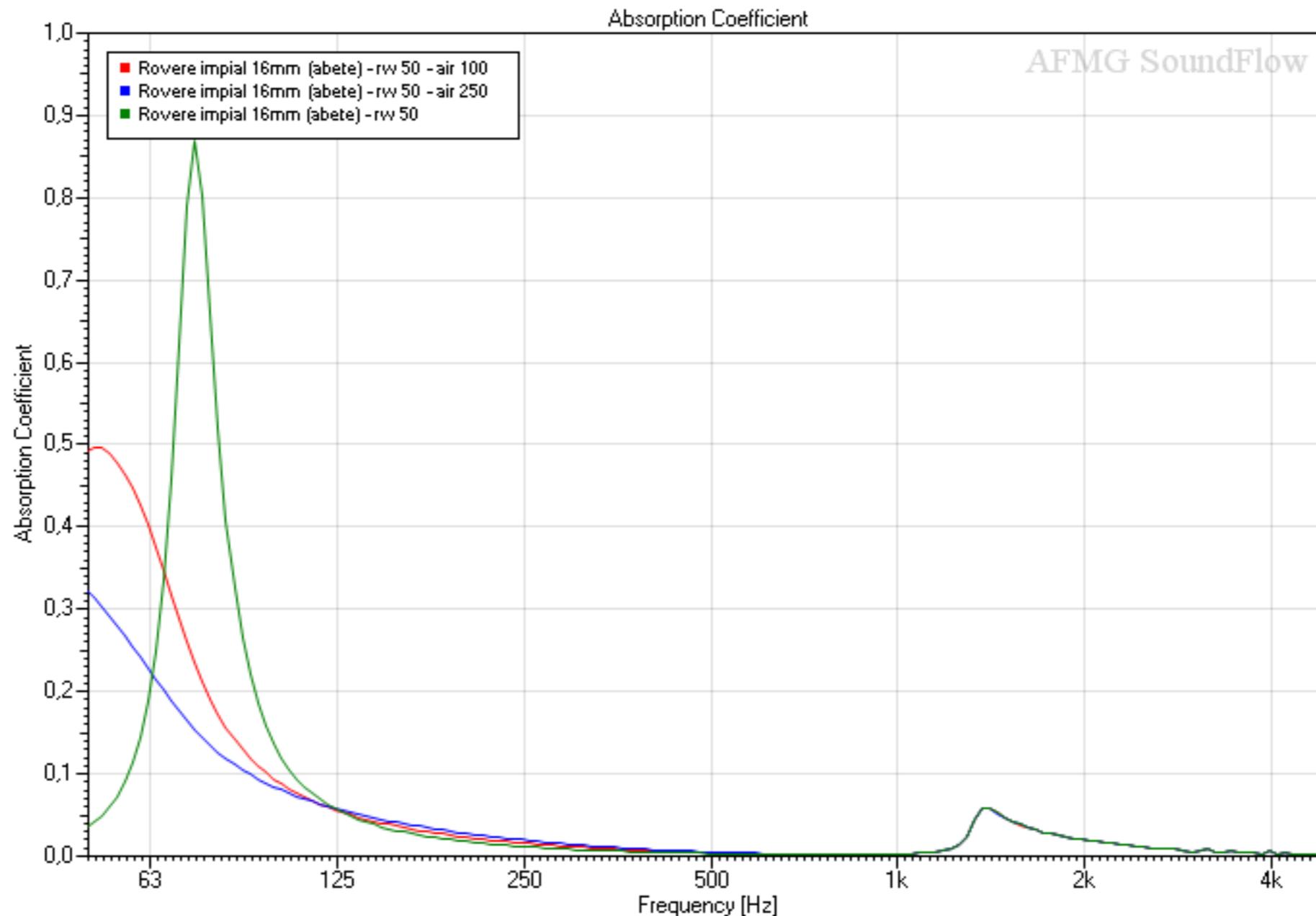
(A) compensato 3/16" con 2" di aria

(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.**



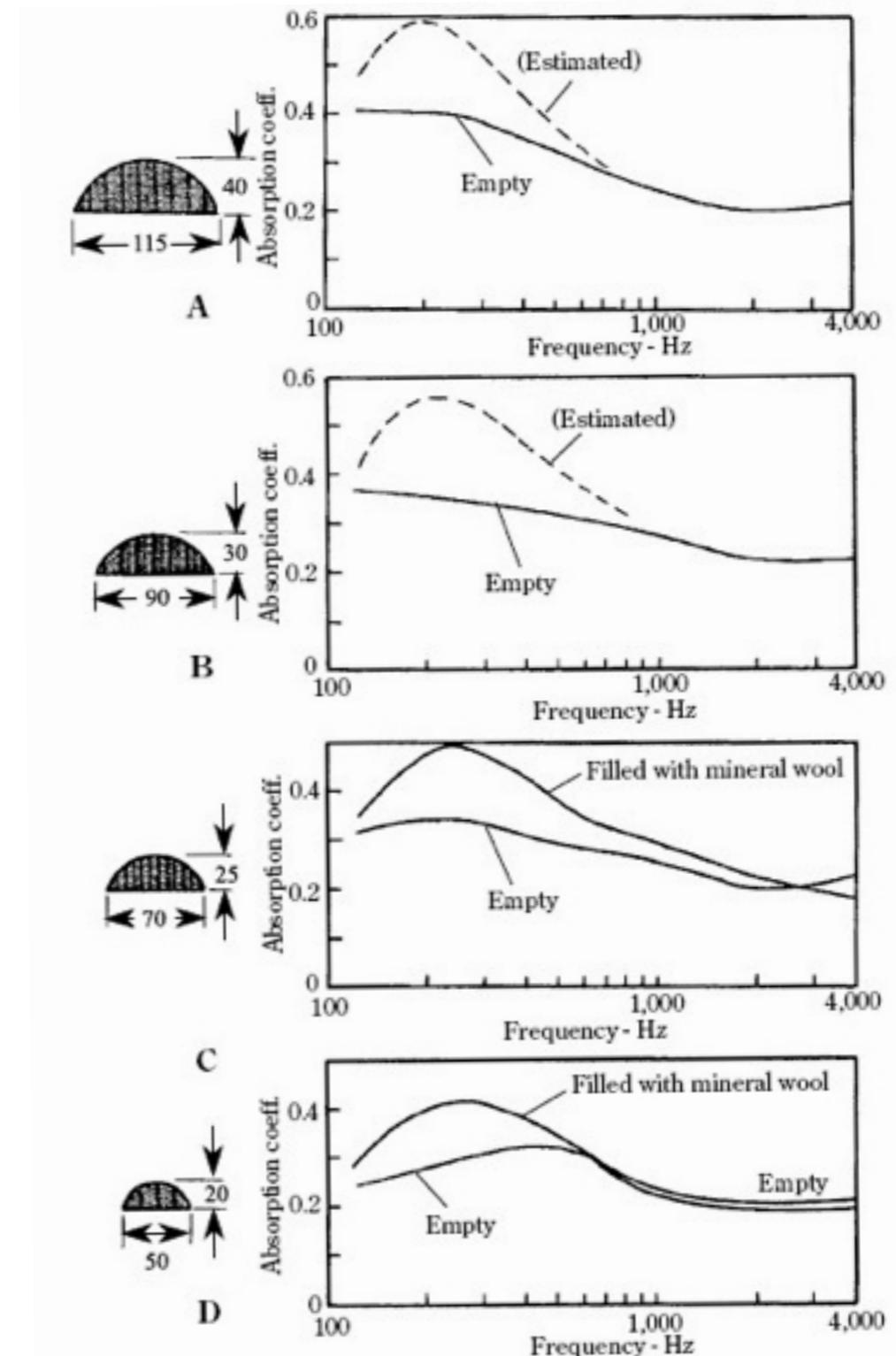
Tre diversi pannelli risonanti in rovere impiallacciato su abete: nella legenda il primo numero indica lo spessore in mm del pannello, la sigla rw indica la lana di roccia e il suo spessore e la sigla air indica la camera d'aria e il suo spessore.

# Assorbitori policilindrici

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

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

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



# Esempi di assorbitori diffusori policilindrici



# Esempi di assorbitori diffusori policilindrici



# 3. Assorbitori per Risonanza

Risonatori di Helmholtz

Assorbitori a pannelli forati

Assorbitori a stecche

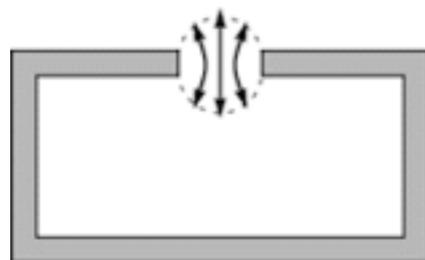
# Il principio della risonanza di Helmholtz

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

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

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

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



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

$A$  = area del collo

$V$  = volume del risonatore

$l$  = lunghezza del collo

# Caratteristiche della risonanza

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

# Assorbitori a pannelli perforati

Possiamo vedere questa struttura come un sistema di risonatori accoppiati.

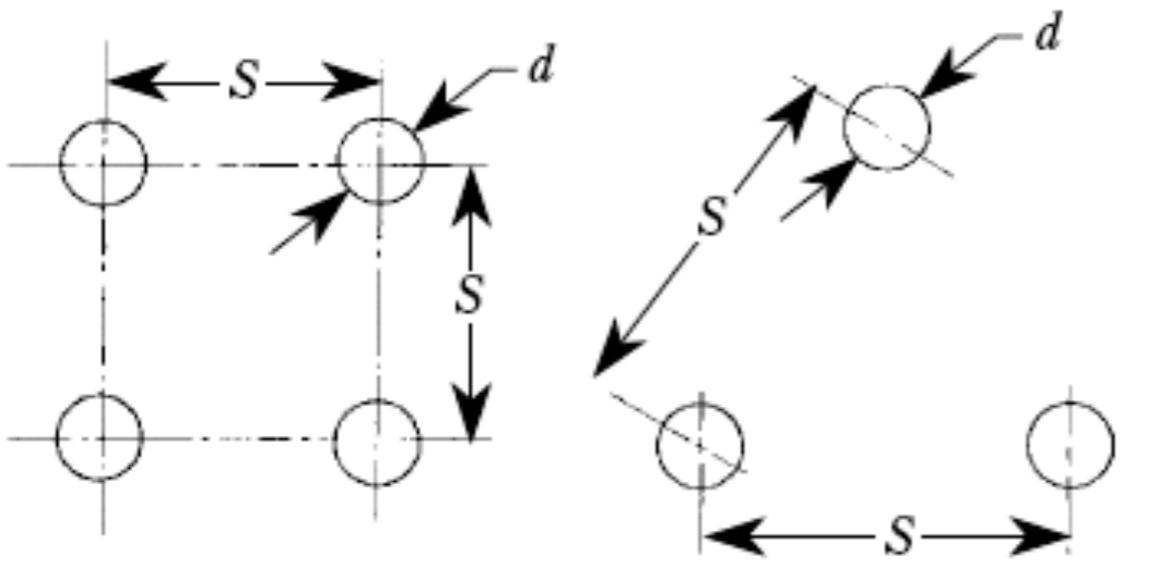
Se il suono giunge perpendicolare al pannello perforato, tutti i piccoli risonatori sono in fase. Per le onde sonore che arrivano dal lato, l'assorbimento è meno efficiente. Questa perdita può essere minimizzata sezionando la cavità dietro alla faccia perforata.

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

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

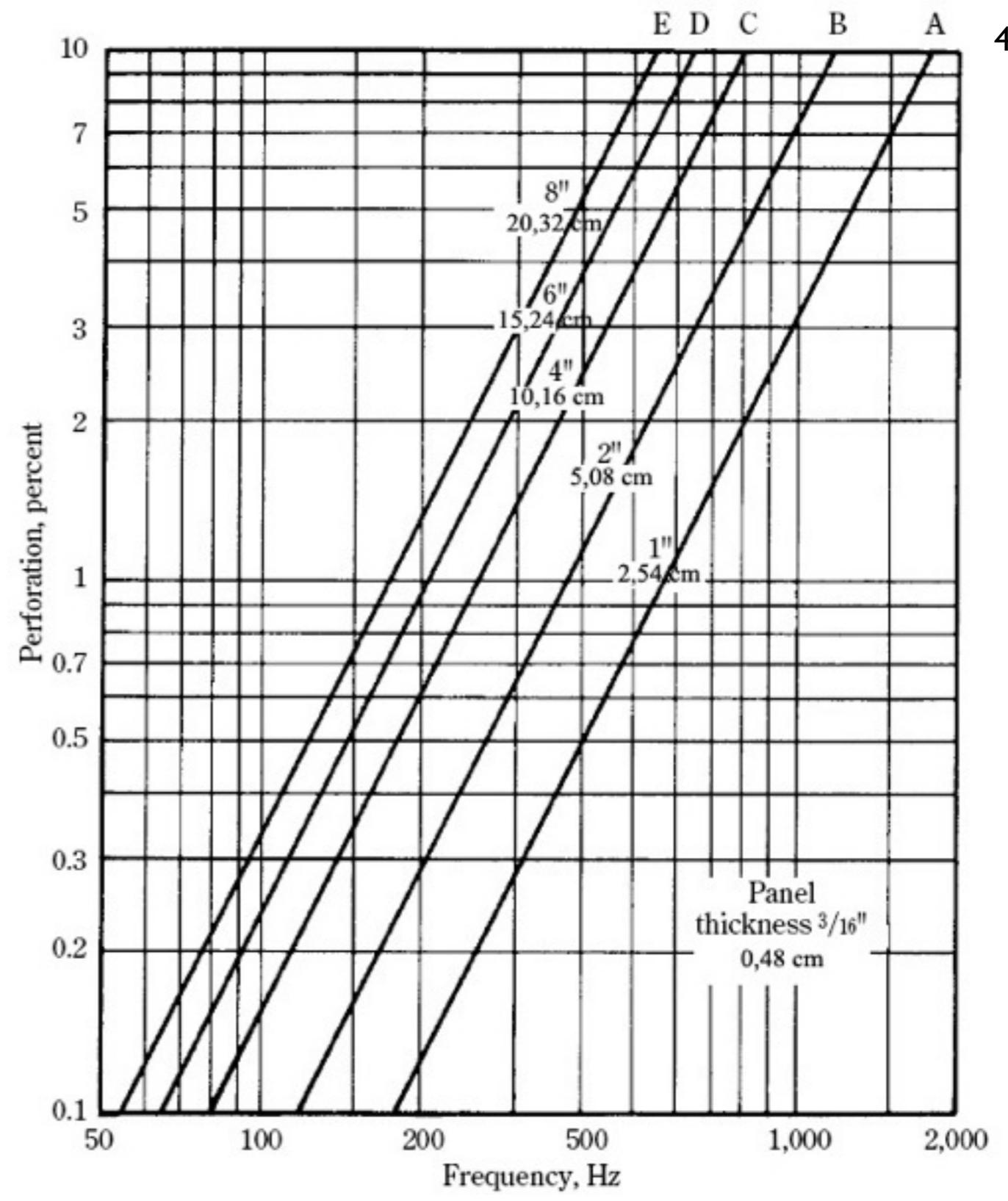
$t$  [cm] = lunghezza effettiva dei buchi, con fattore di correzione applicato (spessore pannello + 0.8 x diametro buco)

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



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

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



# Assorbitori a Stecche

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

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

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

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

$r$  = slot width [cm]

$d$  = slat thickness [cm]

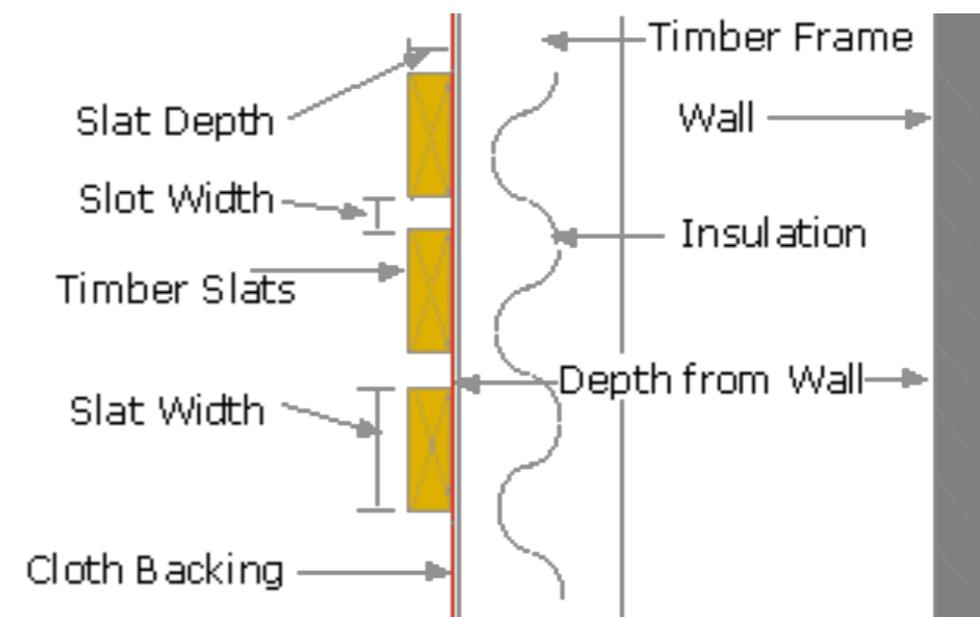
1.2 = mouth correction [cm]

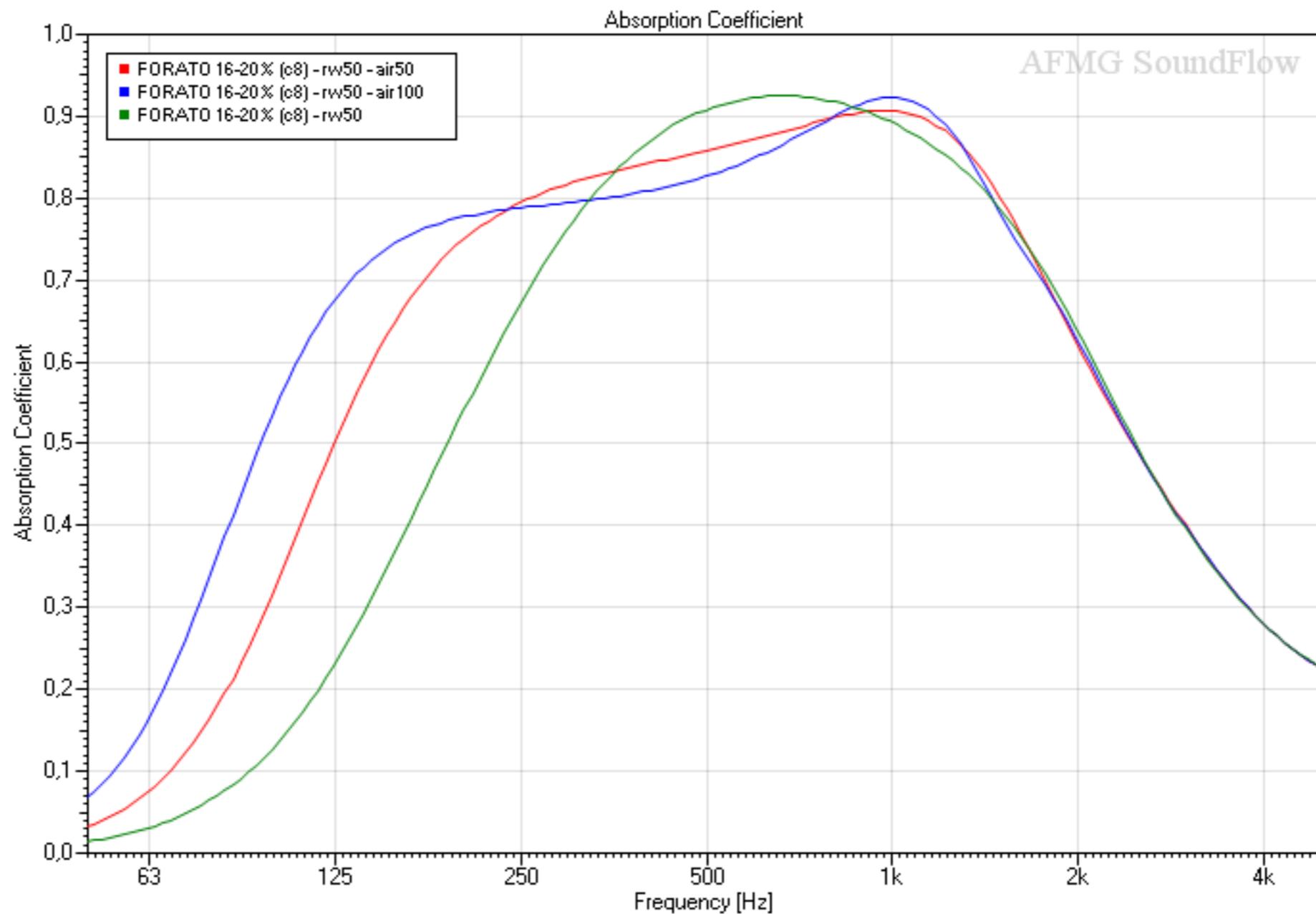
$D$  = cavity depth [cm]

$w$  = slat width [cm]

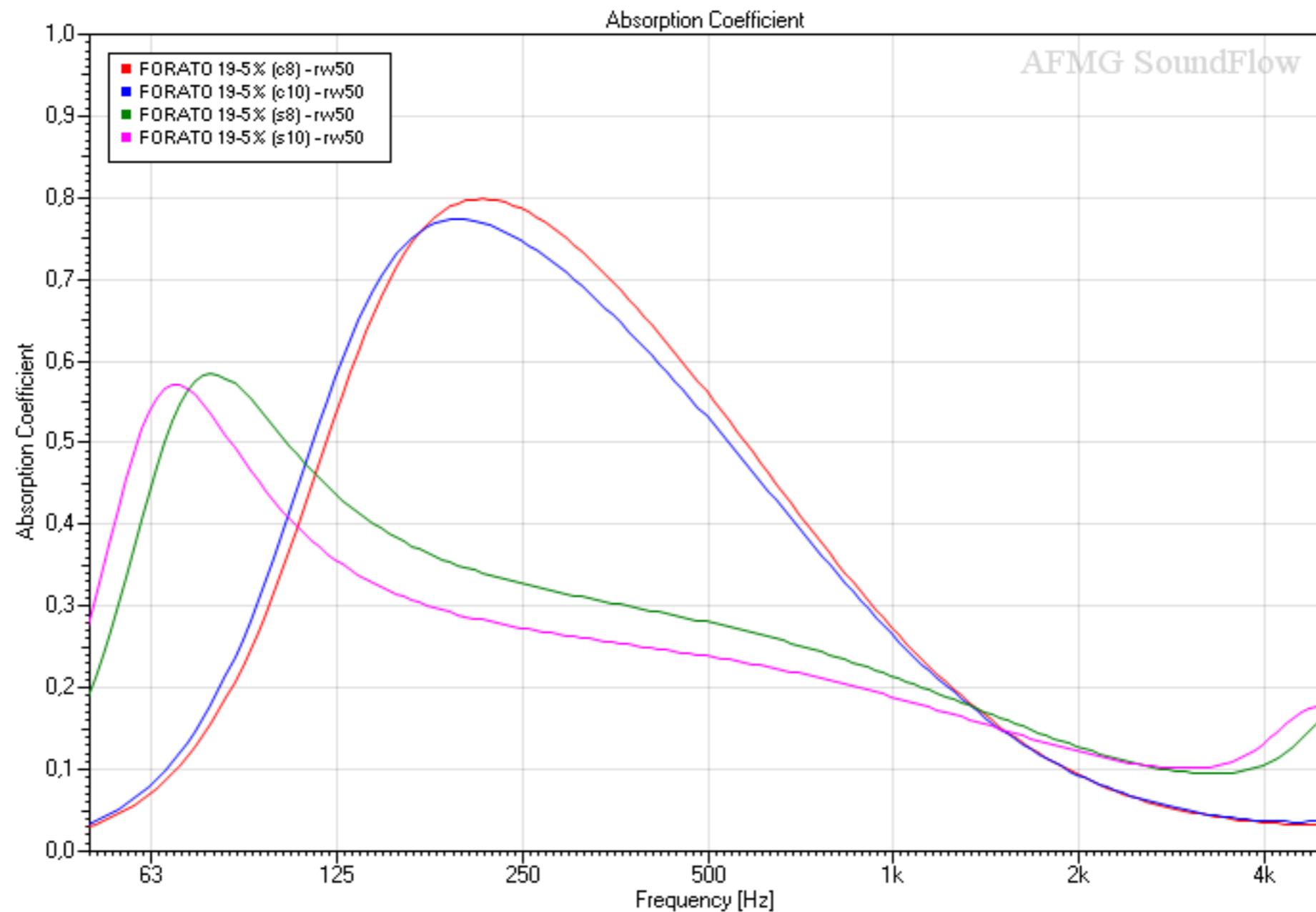
5469 =  $c/(2*\pi)$

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

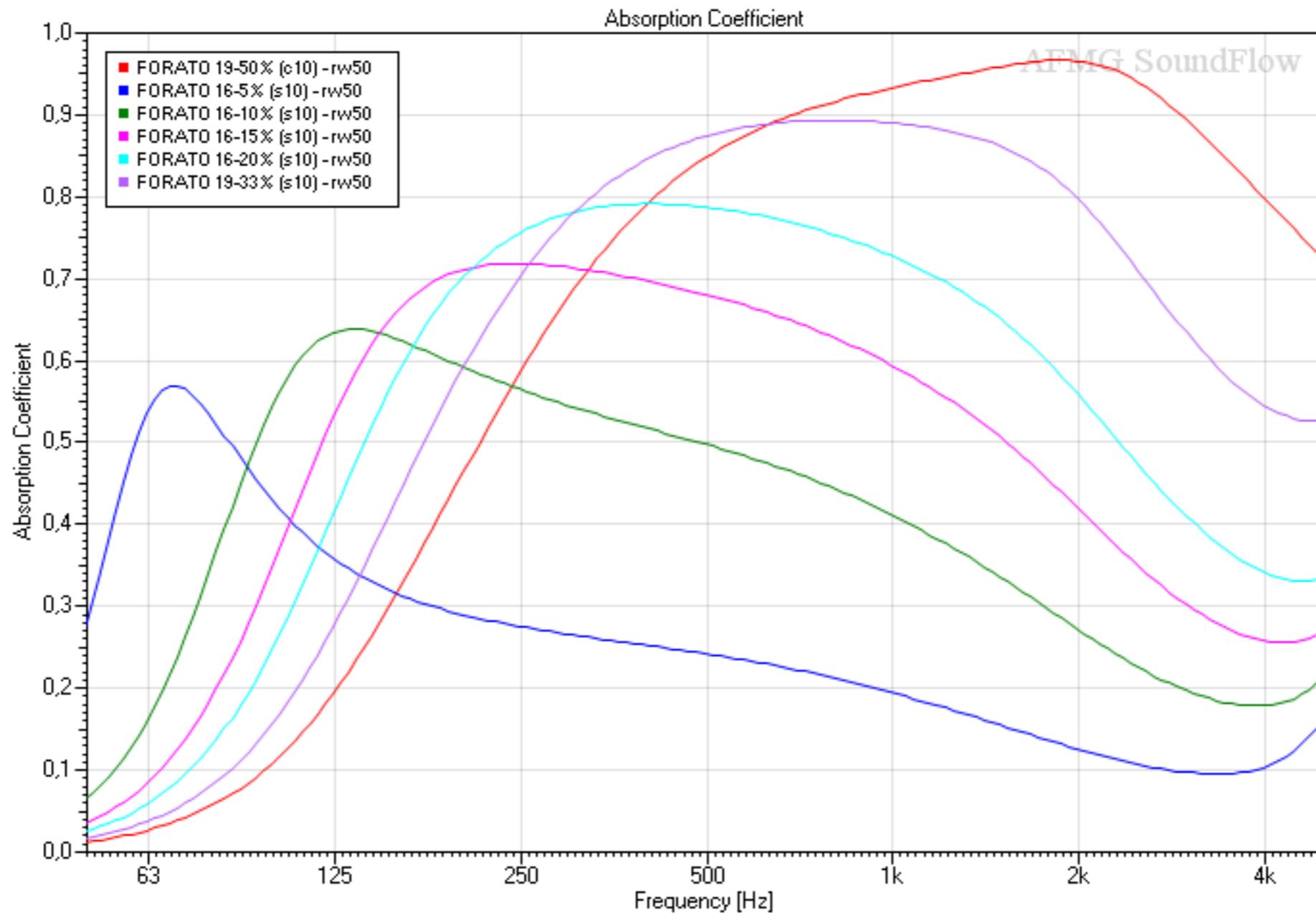




Tre diversi pannelli forati risonanti di stesso spessore (16 mm) e % e tipo di foratura (20% a stecche), montaggio diverso: la sigla rw indica la lana di roccia e il suo spessore e la sigla air indica la camera d'aria e il suo spessore.



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

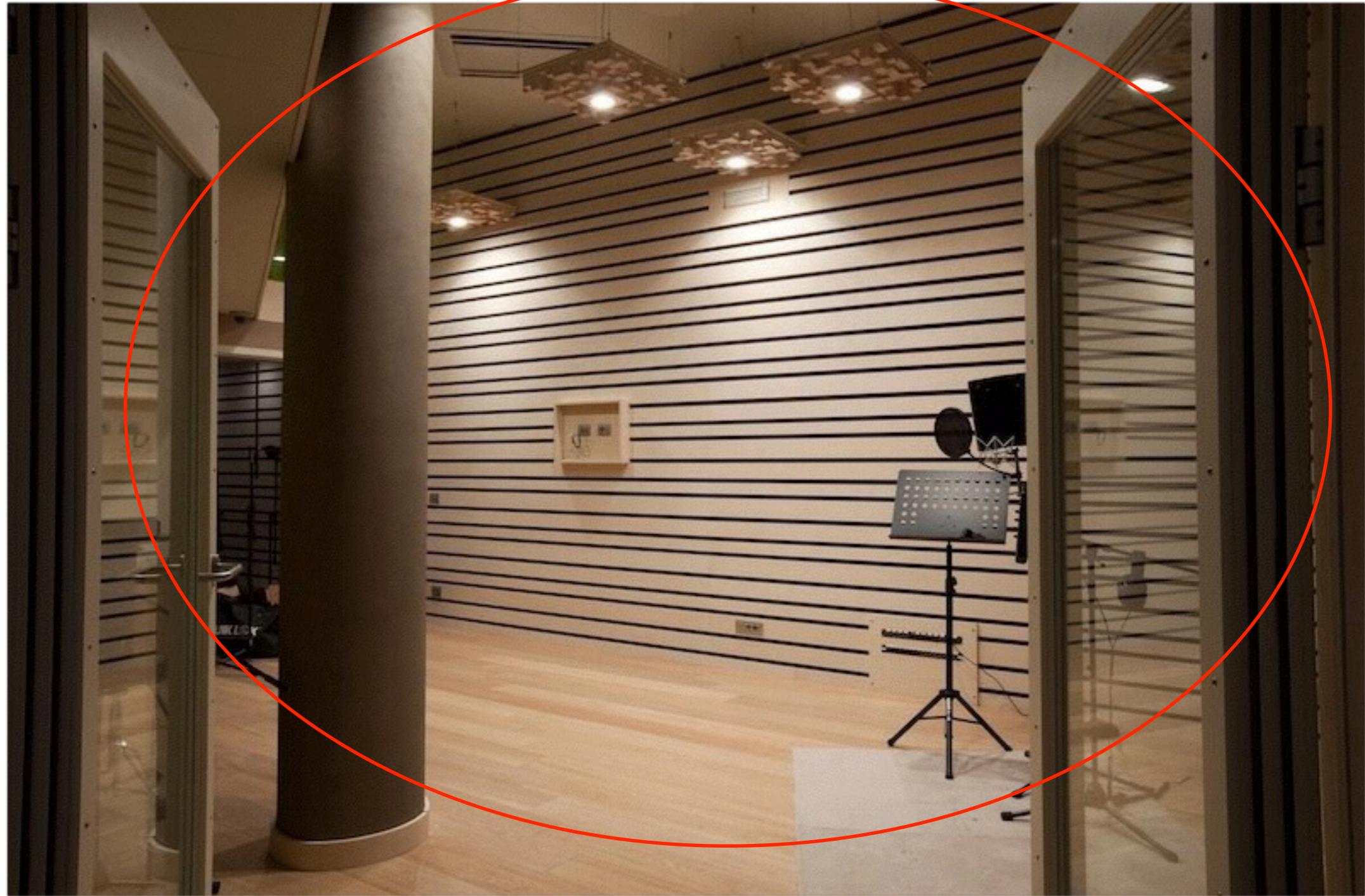


Pannelli forati risonanti [stesso montaggio e materiale fonoassorbente (lana di roccia 50 mm), cambia la percentuale di foratura, il tipo (c = circolare, s = a stecche) e lo spessore del pannello]: nella legenda il primo numero indica lo spessore in mm del pannello, poi c'è la percentuale di foratura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

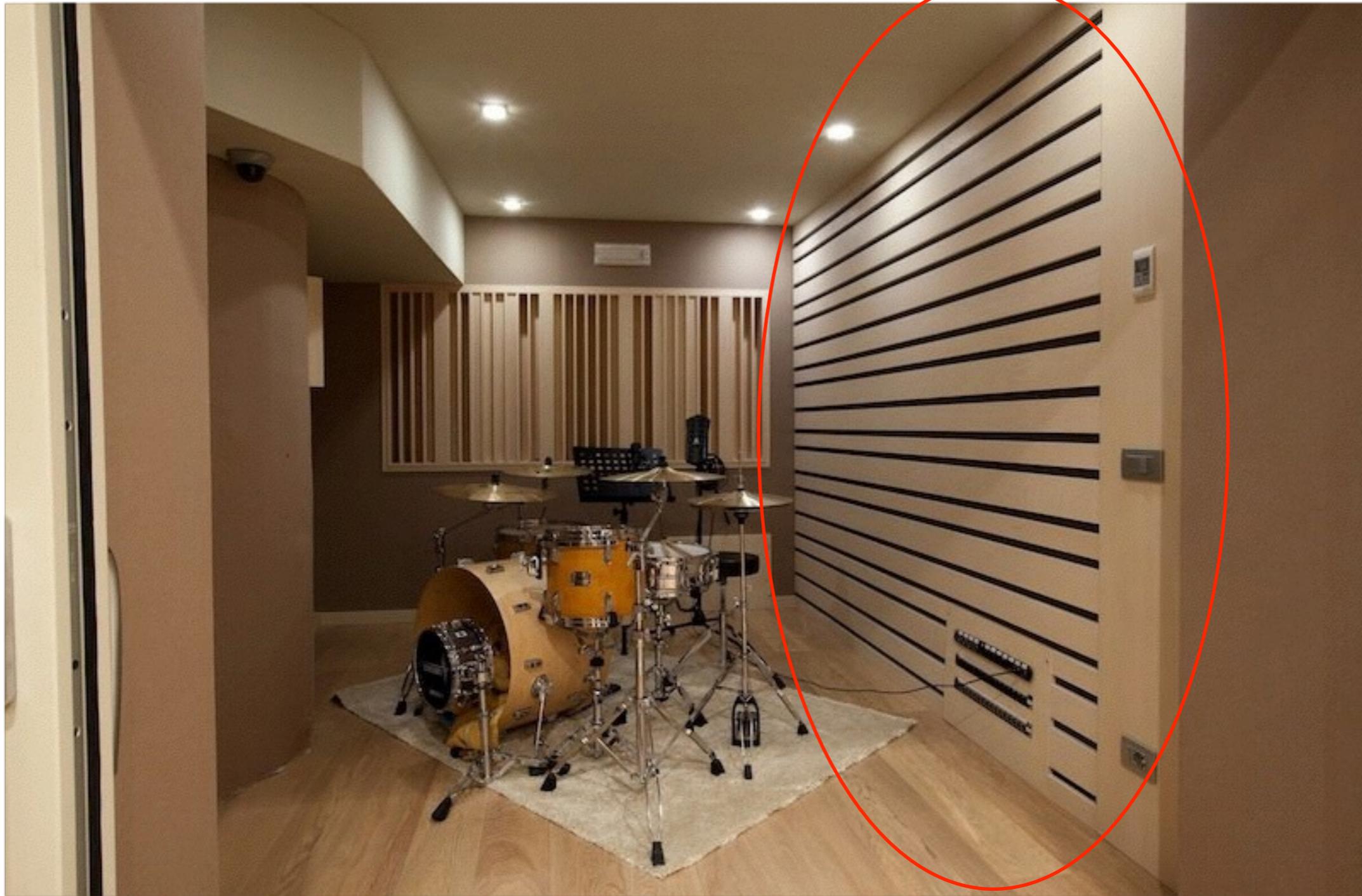
# Esempi di assorbitori forati e a stecche:



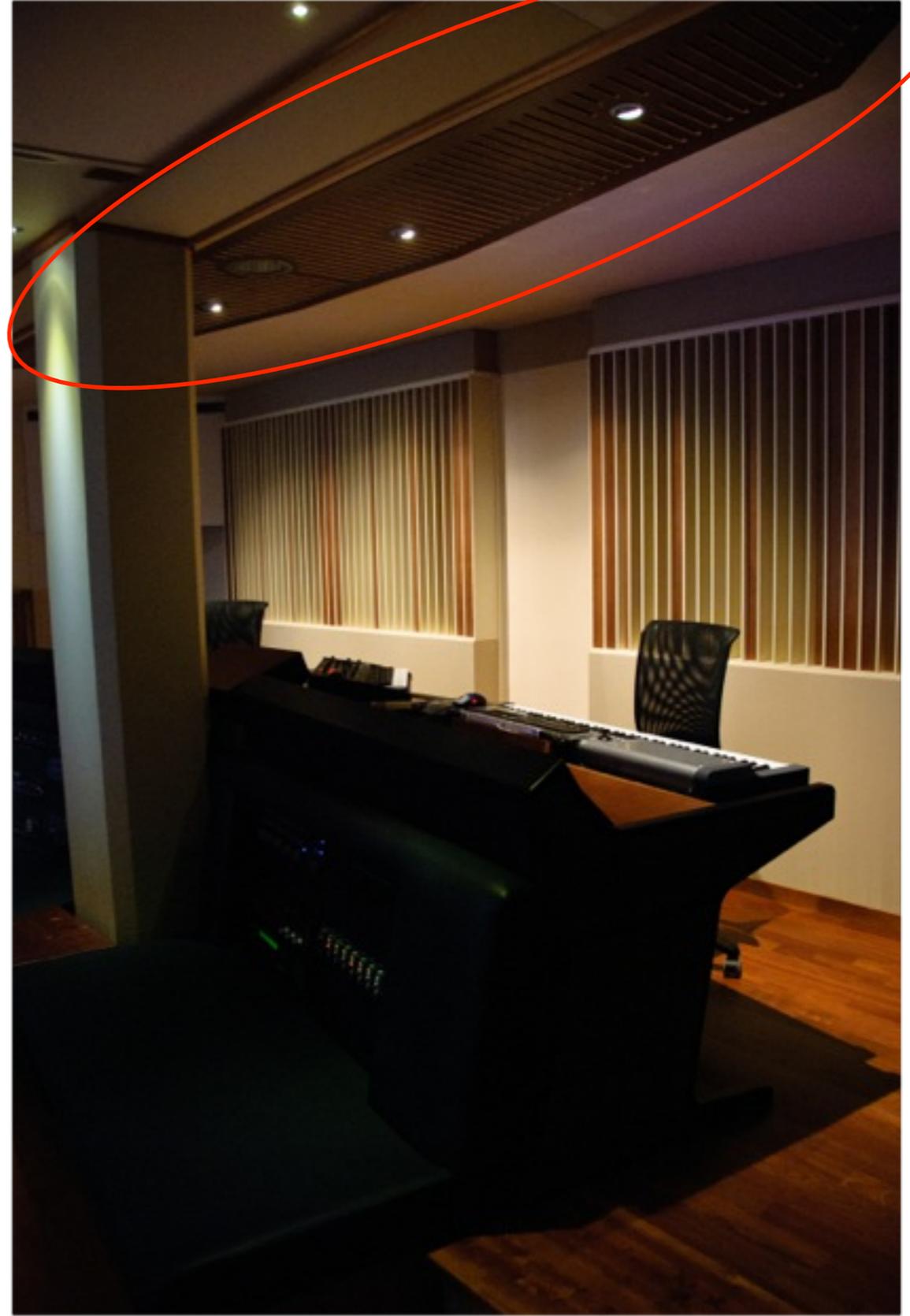
# Esempi di assorbitori a stecche:



# Esempi di assorbitori a stecche:



# Esempi di assorbitori forati e a stecche:

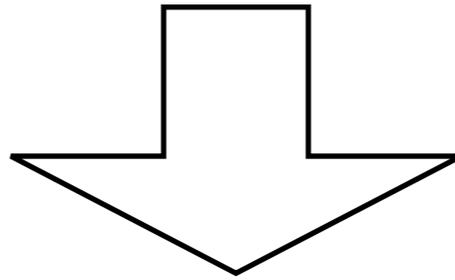


# Esempi di assorbitori forati e a stecche:



# Onde Acustiche

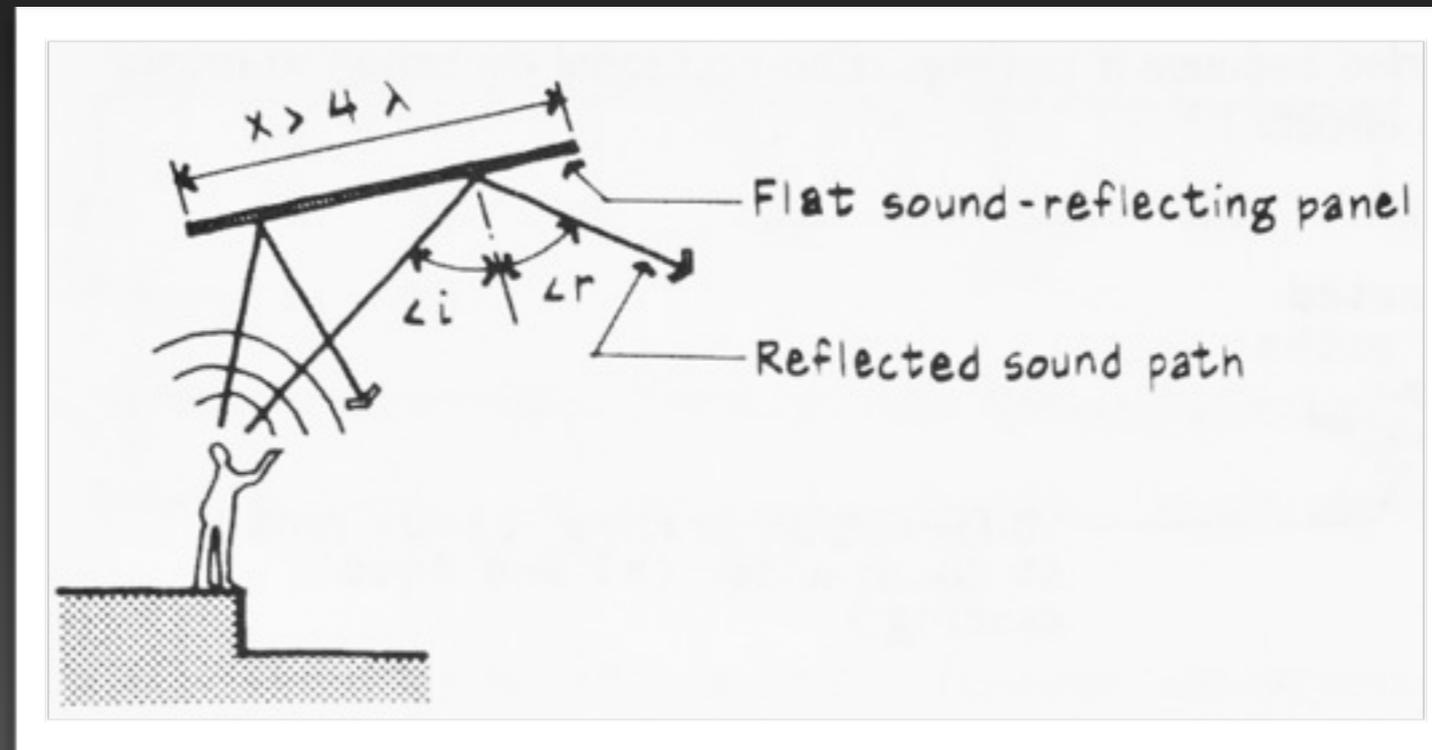
Il suono è un fenomeno di tipo ondulatorio



è soggetto ai tipici comportamenti ondulatori:

Riflessione  
Rifrazione  
Diffrazione  
Interferenza

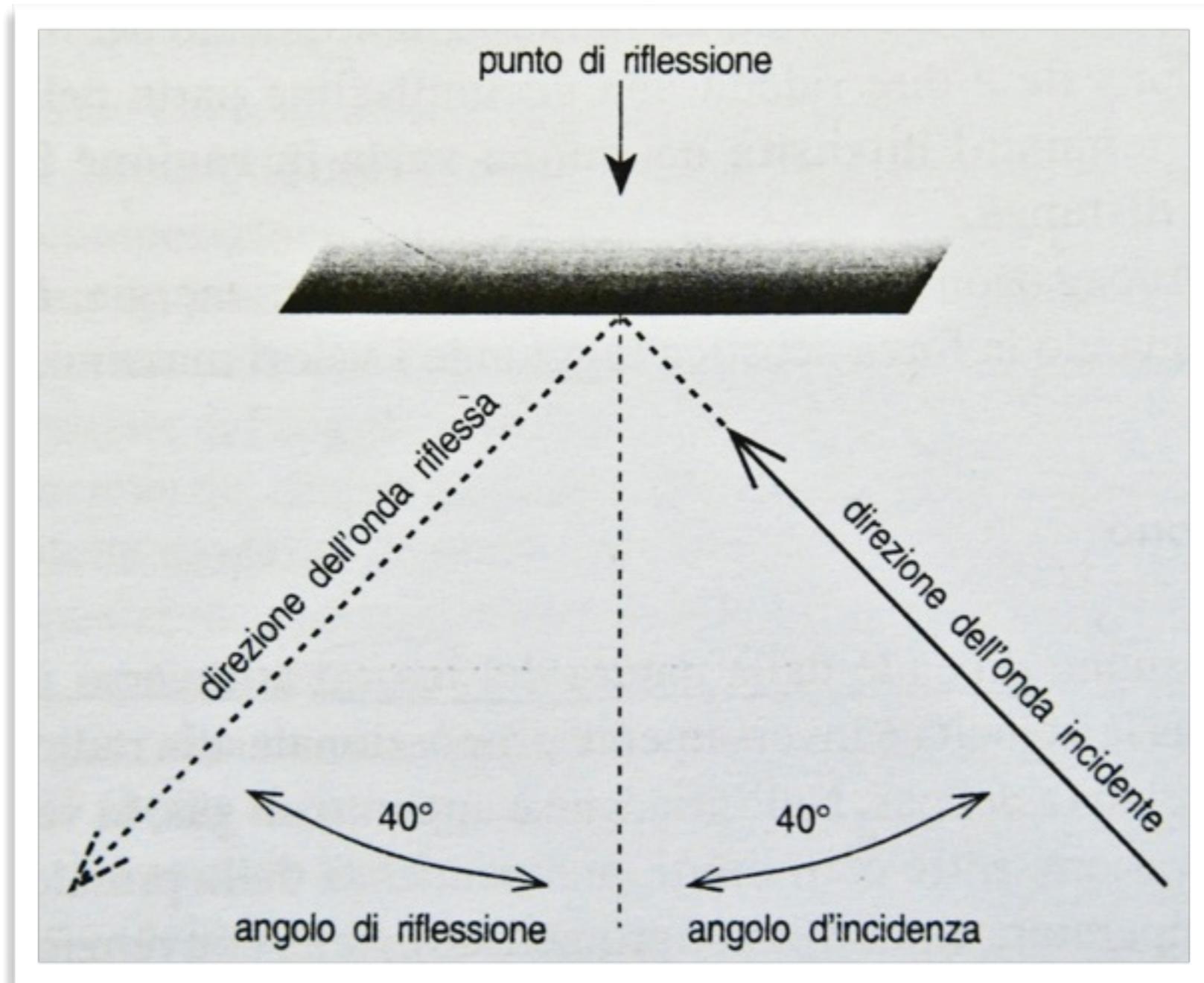
# Riflessione acustica



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

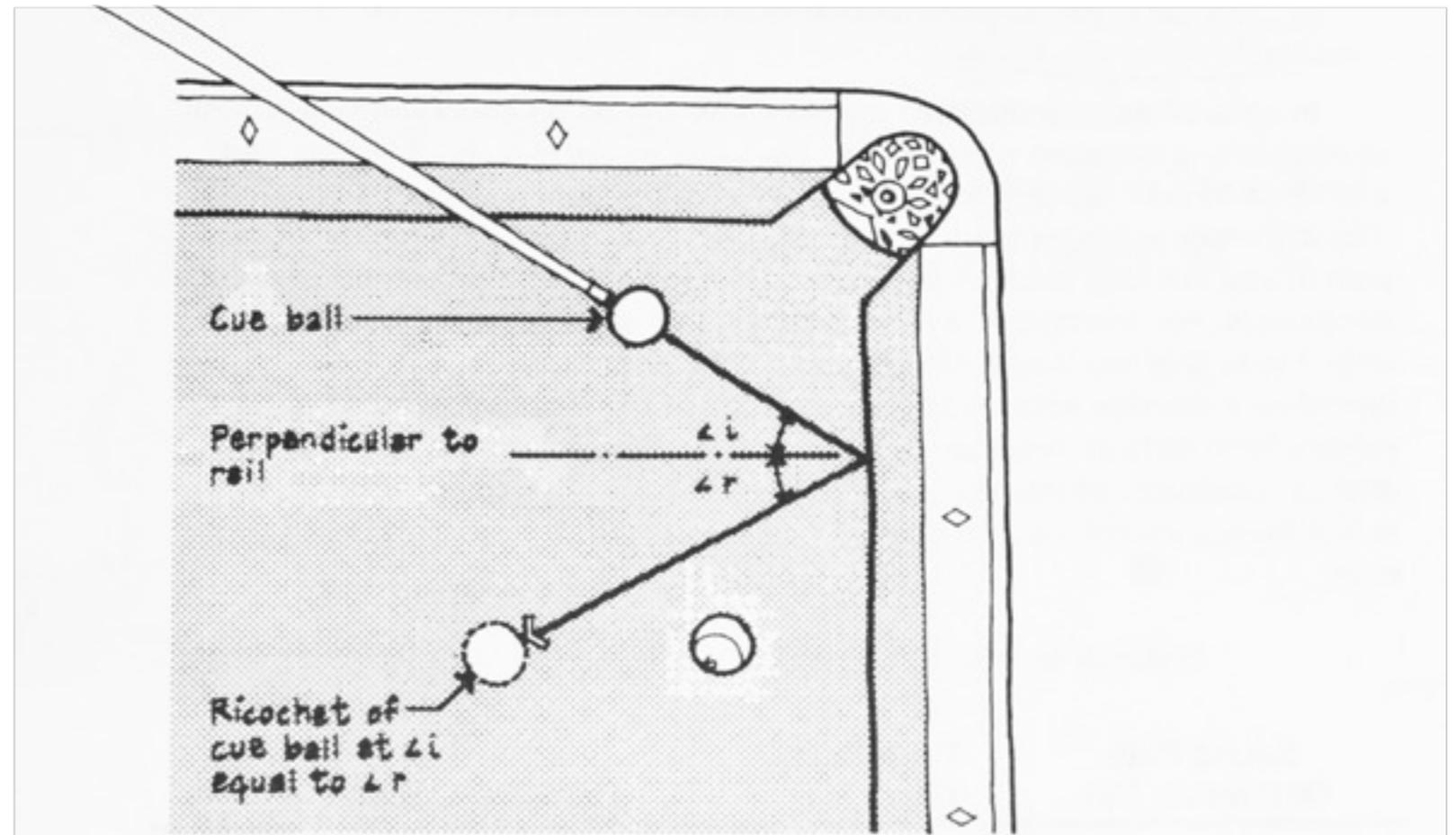
Ad esempio, essendo 0,343 m la lunghezza d'onda di un'onda acustica di 1000 Hz, una superficie di  $4\lambda \times 0,343 \text{ m} = 1,372 \text{ m}$  rifletterà onde con frequenze di 1000 Hz e superiori.

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

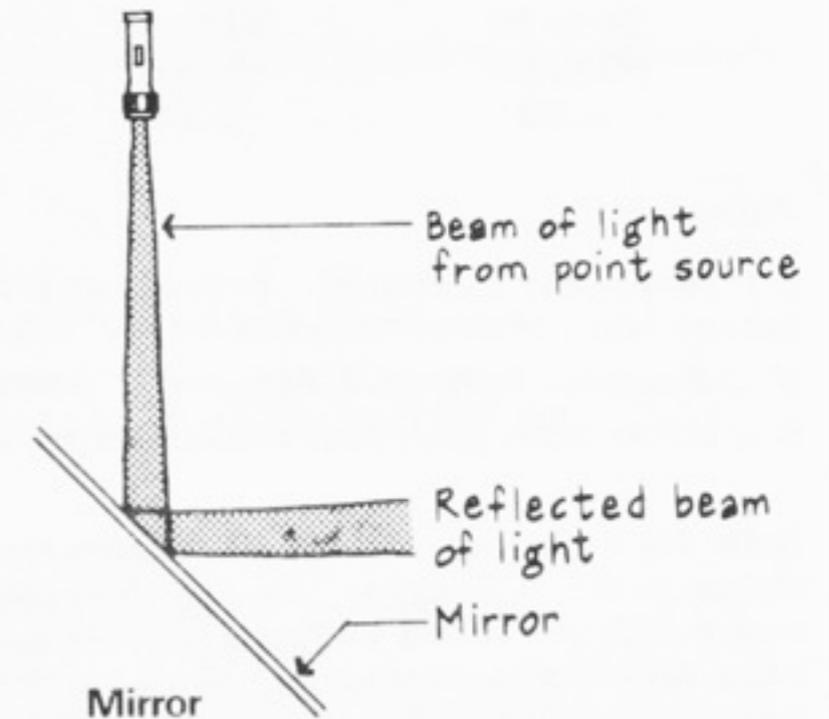


Dalle caratteristiche della superficie riflettente, dipende l'intensità e la qualità della riflessione. In ogni caso, la parte di energia che non viene riflessa è assorbita oppure rifratta.

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



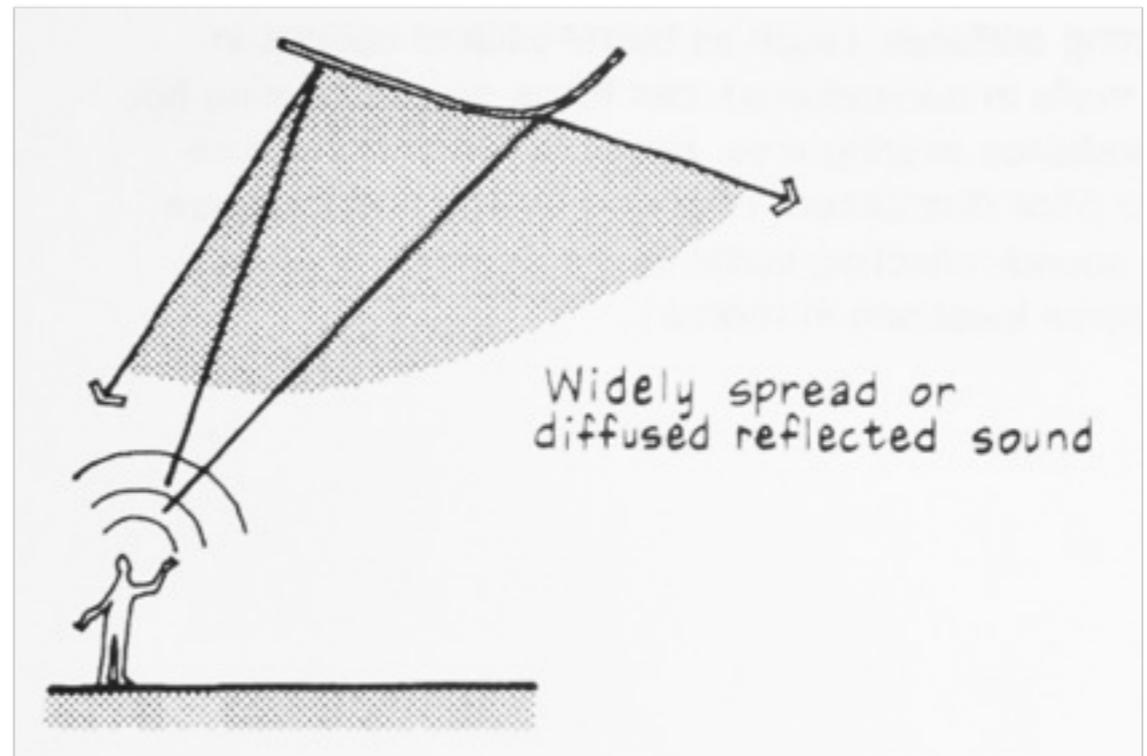
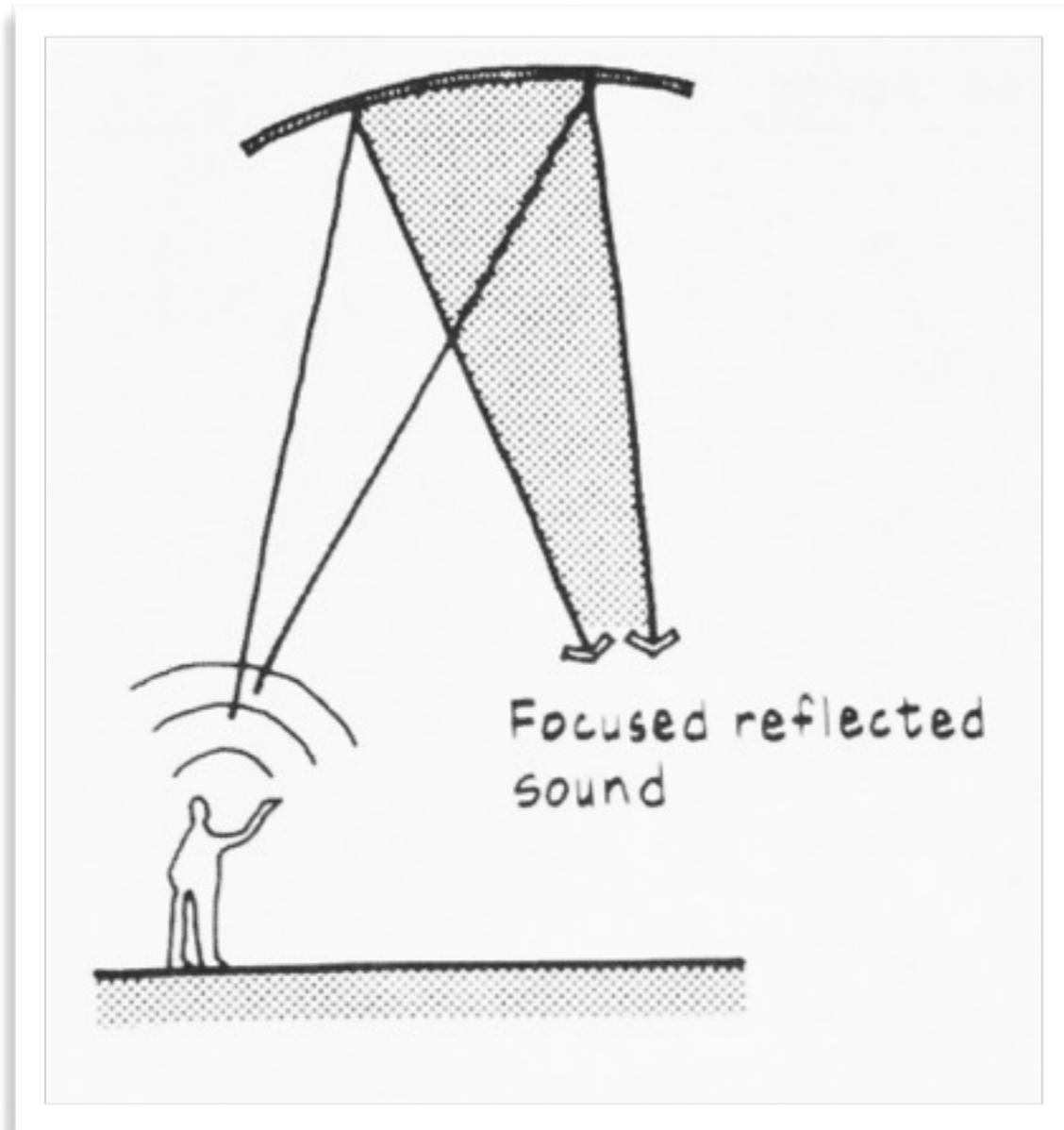
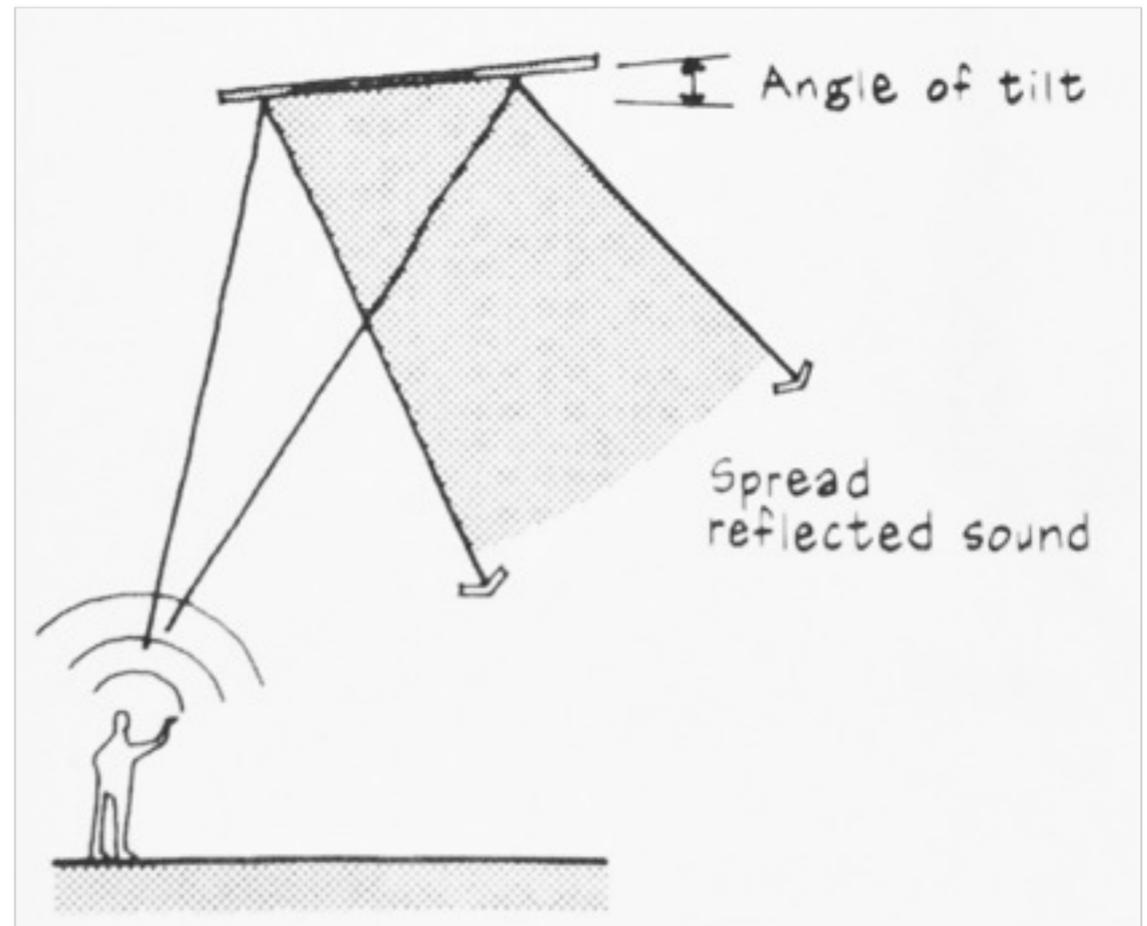
Billiard Table



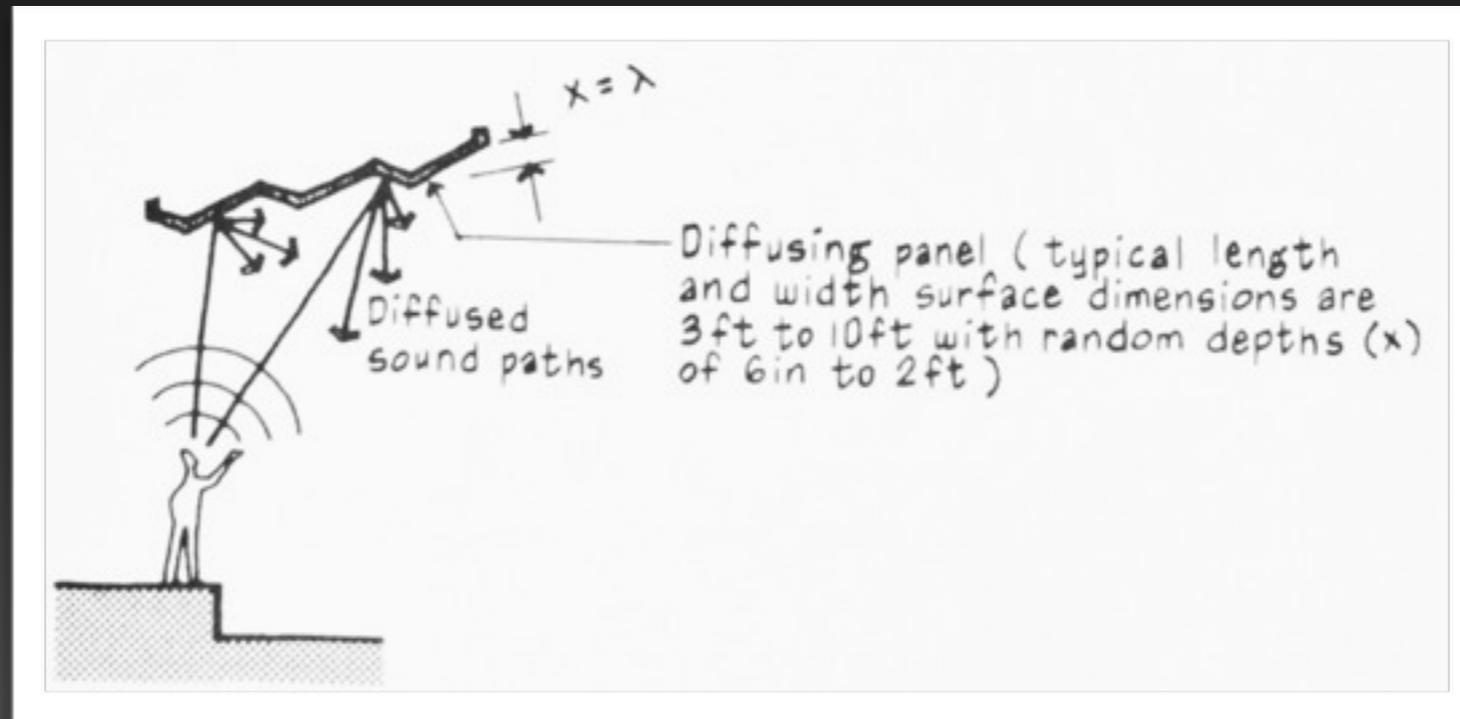
La riflessione speculare è molto utile per indirizzare le riflessioni dove vogliamo noi.

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

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



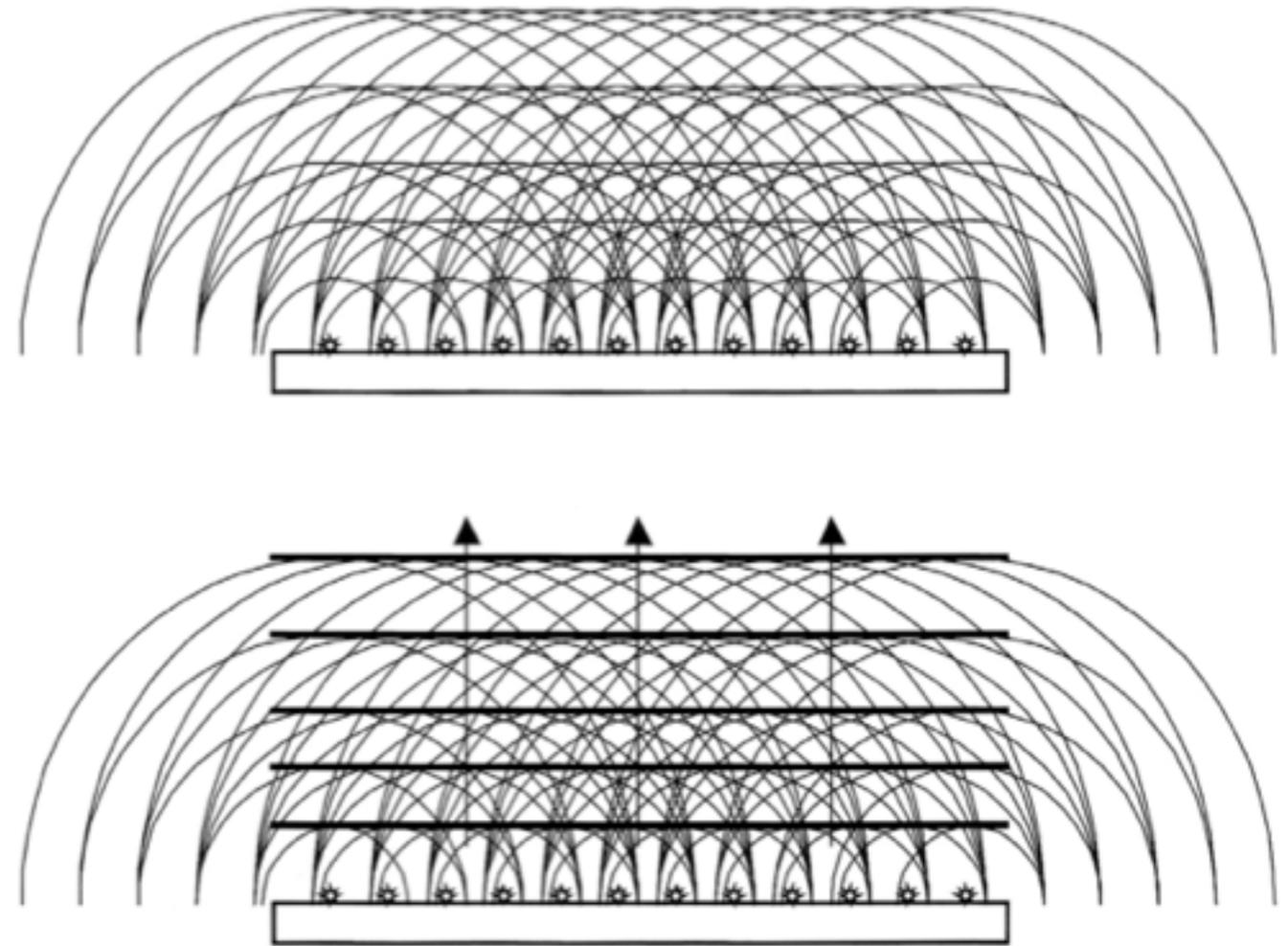
# Diffusione acustica



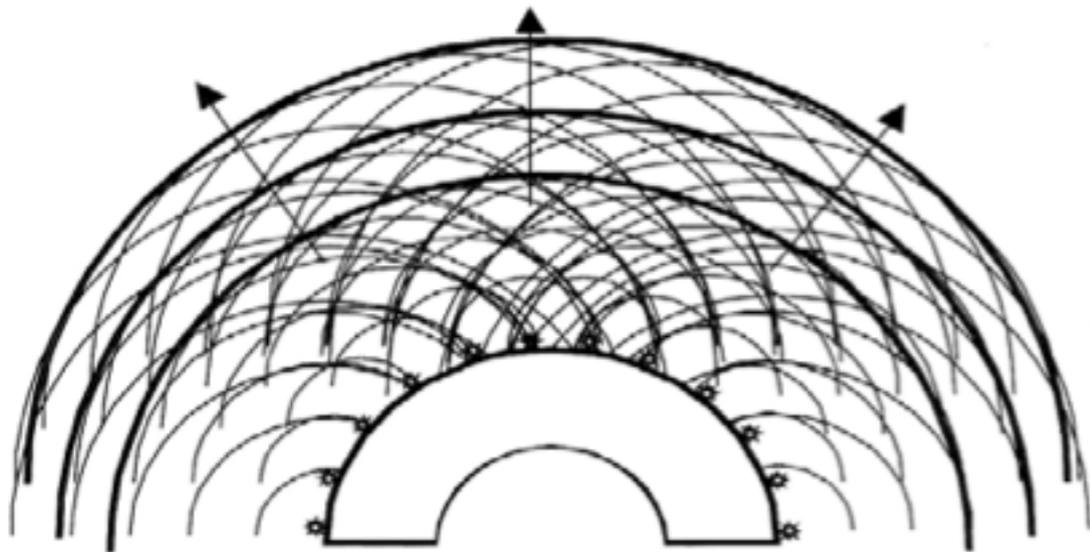
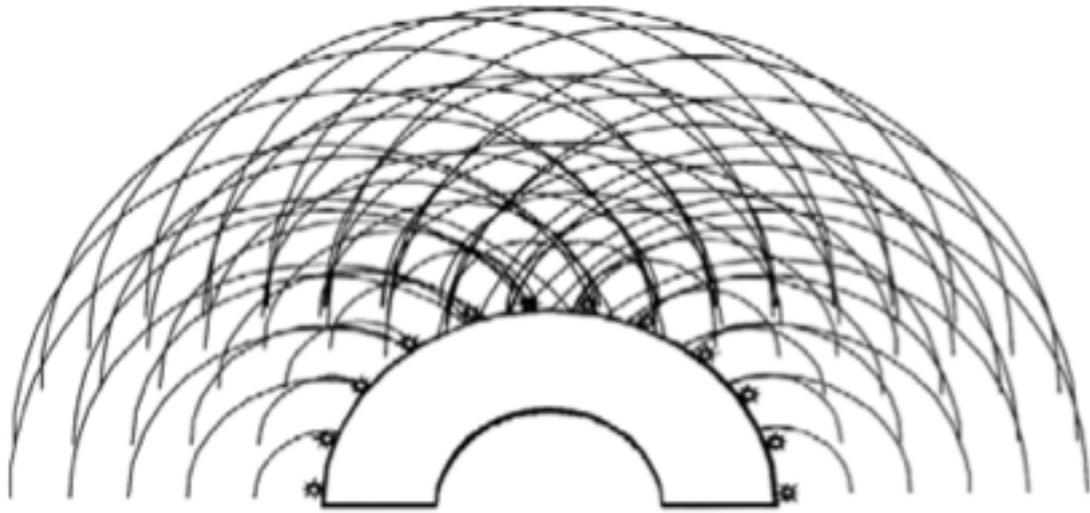
La diffusione acustica è la redistribuzione random (o “scattering”) di un’onda sonora da una superficie. Avviene quando la superficie solida ha delle profondità di spessore comparabile alle lunghezze d’onda dell’onda incidente. In questo caso non si ha riflessione speculare ma il suono viene sparpagliato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

# Principio di Huygens

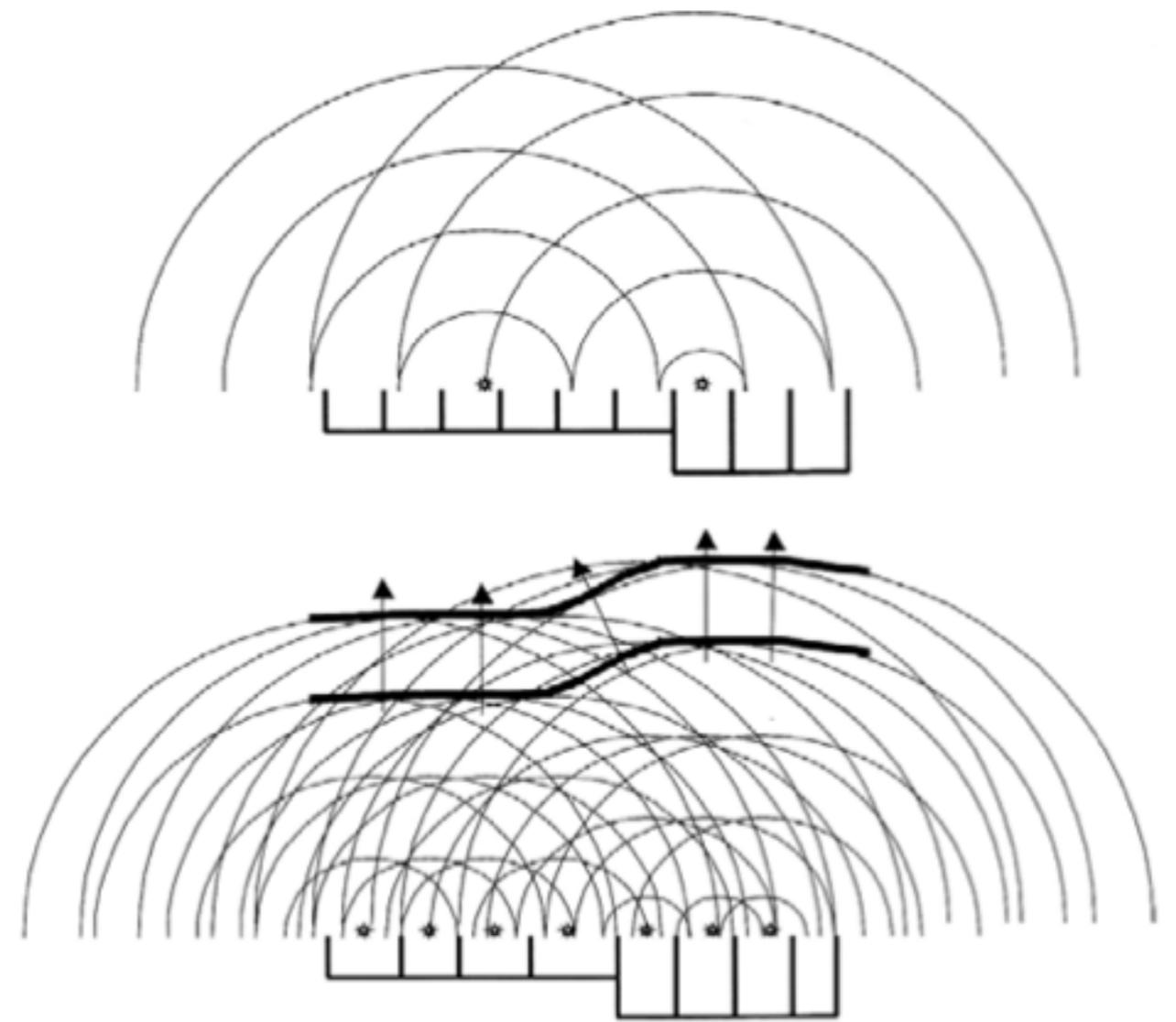
Ogni elemento  $d\Sigma$  di un fronte d'onda  $\Sigma$  si può considerare formalmente come una sorgente secondaria di onde sferiche in fase con la primaria e di ampiezza proporzionale a quella dell'onda primaria e all'area  $d\Sigma$ .  
La perturbazione prodotta in un punto dello spazio si può sempre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



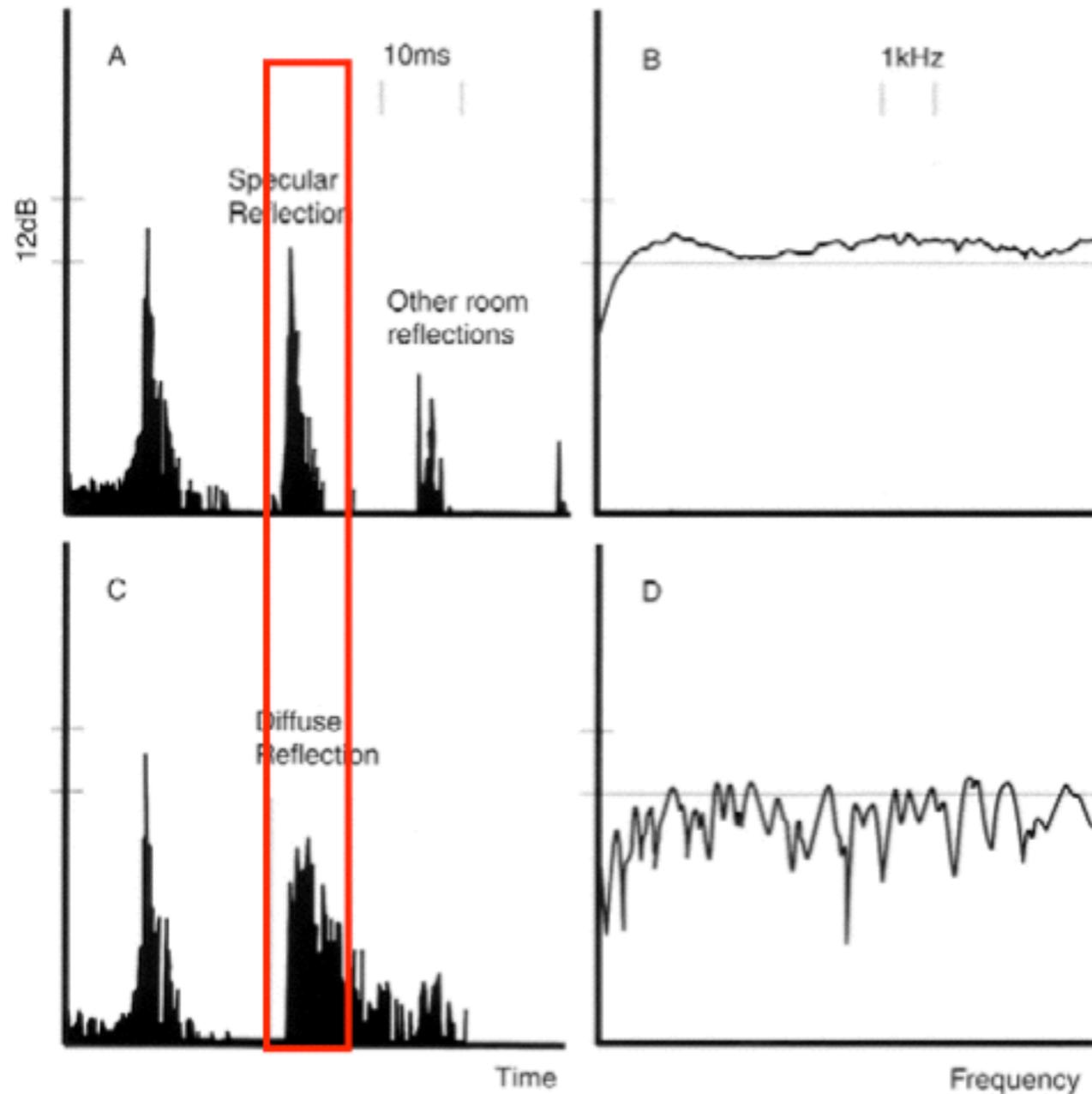
Fronte d'onda per un'onda piana riflessa da una superficie piana ricostruito sfruttando il principio di Huygens.



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

Diffusione di Schroeder: QRD, Skyline etc

Diffusione a linee curve elaborate con simulazioni di calcolo numerico

Binary Amplitude Diffusers

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

# Diffusione di Schroeder: QRD Quadratic Residue Diffusers

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

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

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

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

$d$  : profondità di ogni buca

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

$p$  : numero primo

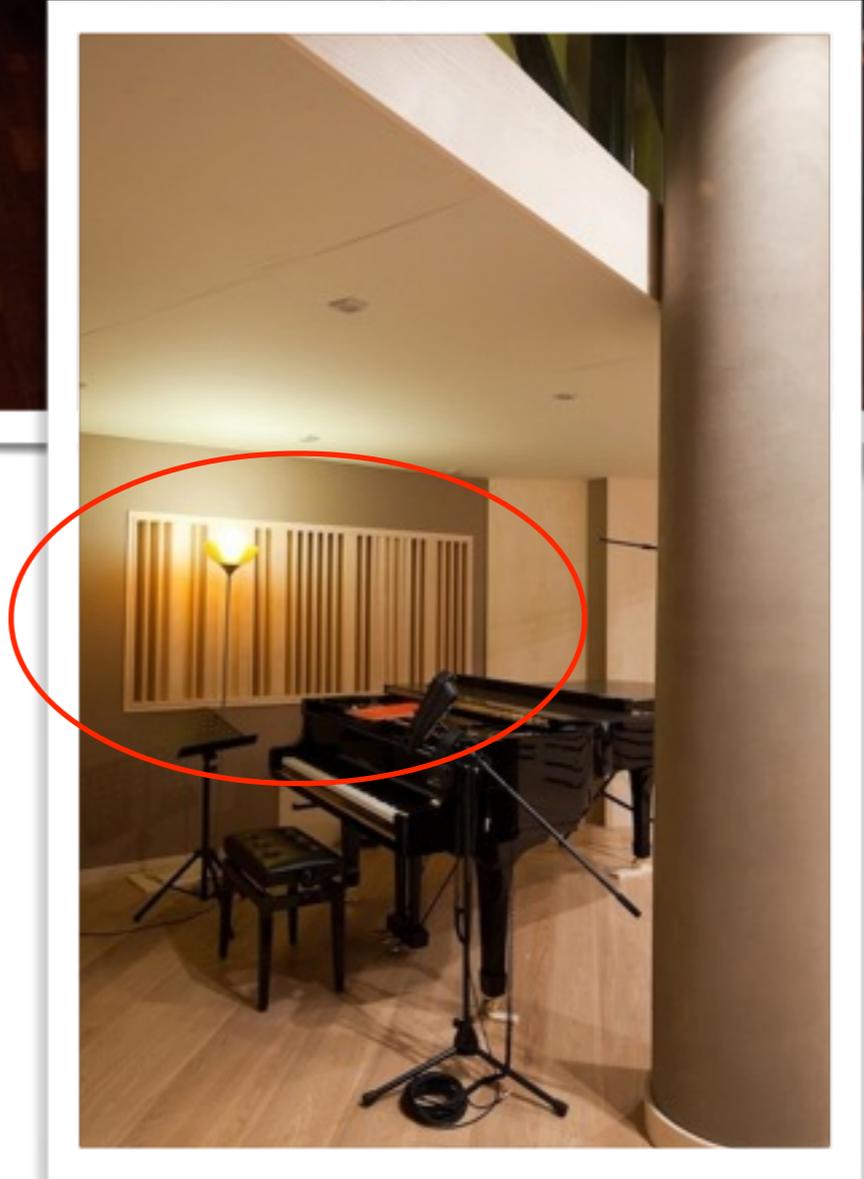
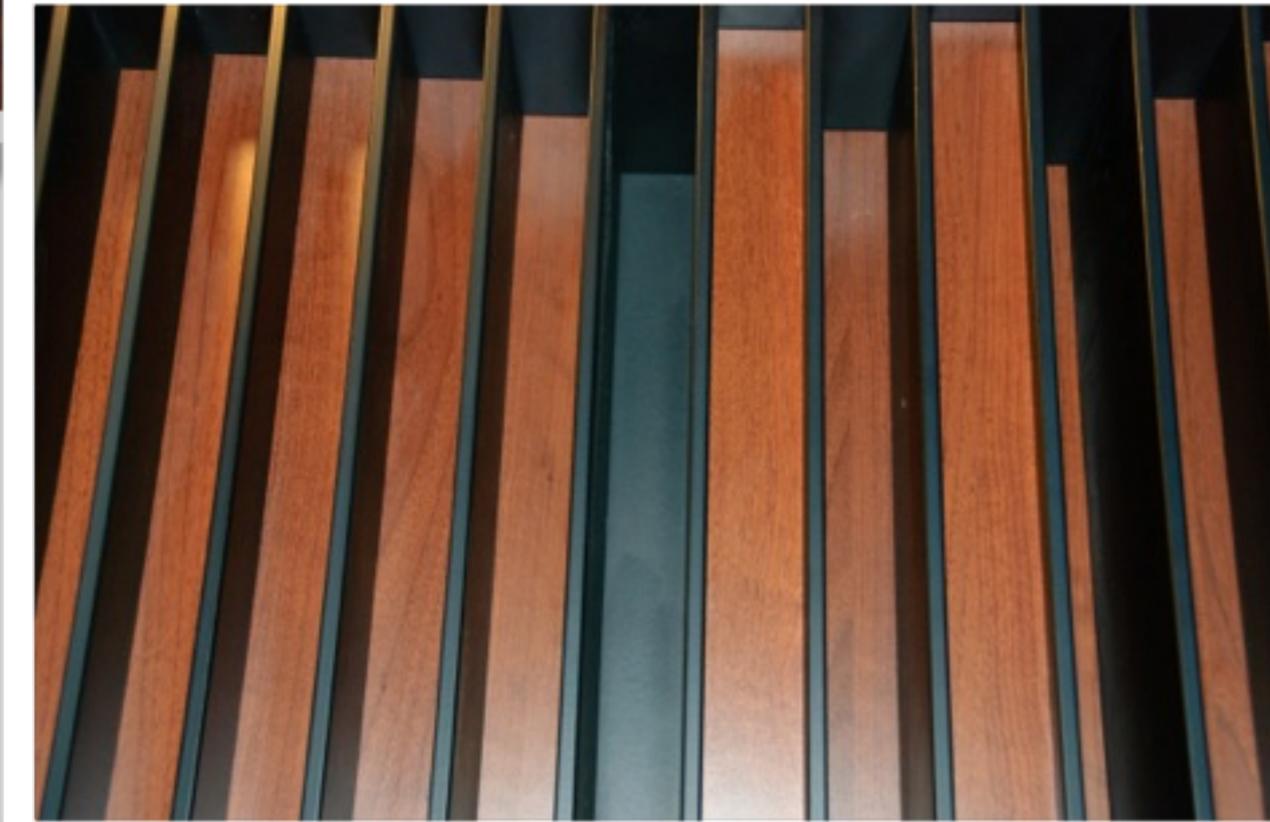
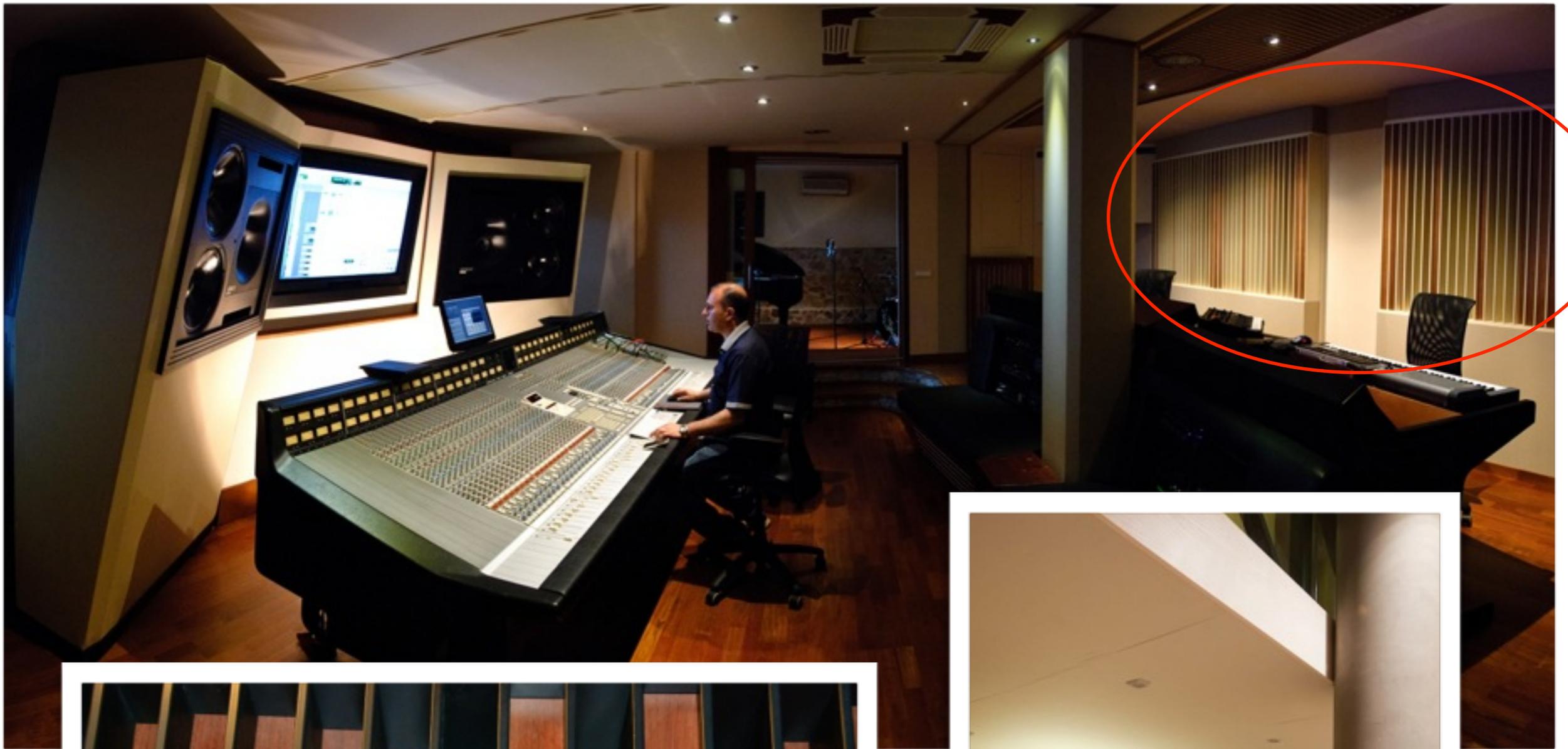
Quadratic-residue sequences

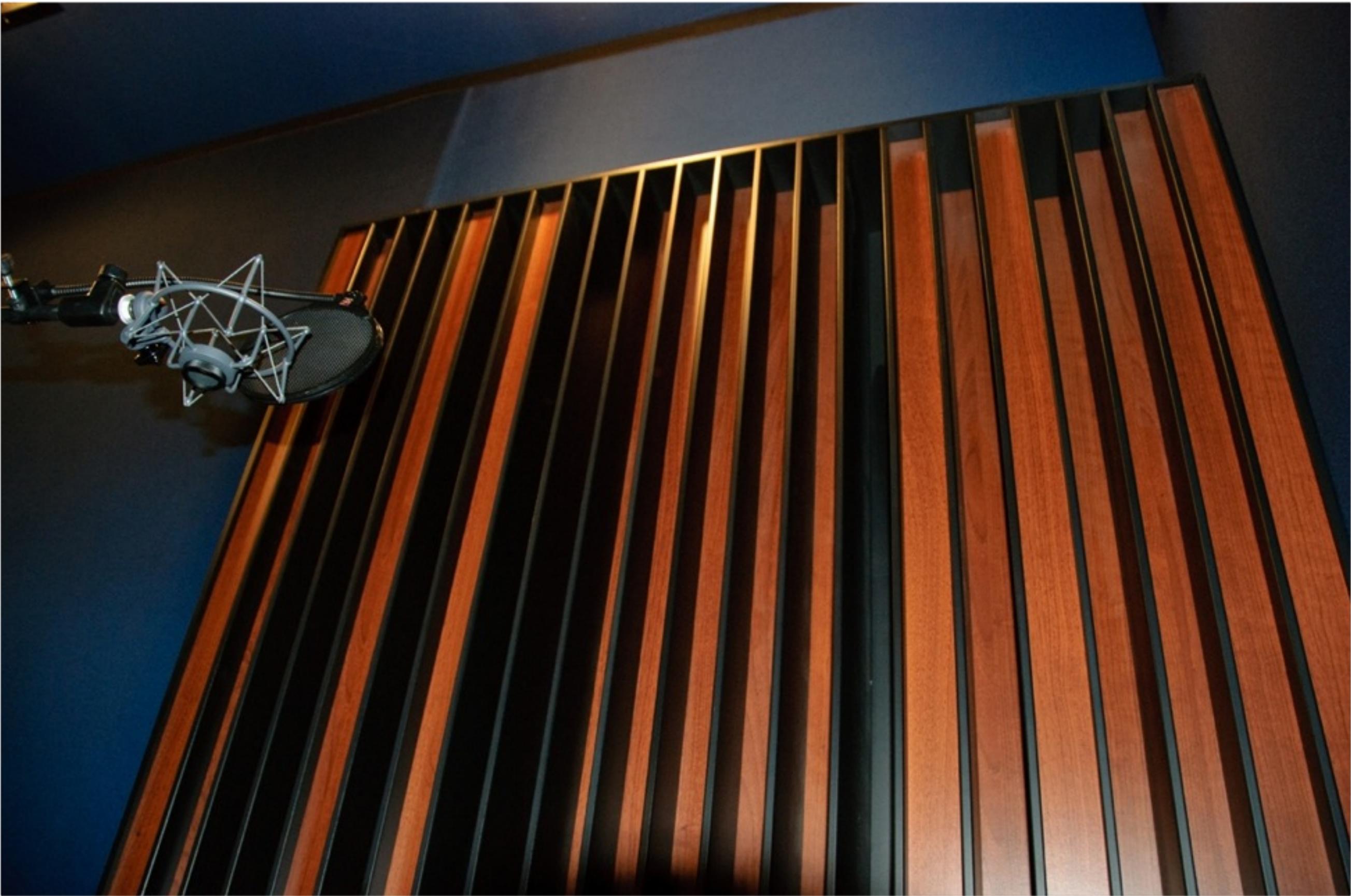
$n$	$p$						
	5	7	11	13	17	19	23
0	0	0	0	0	0	0	0
1	1	1	1	1	1	1	1
2	4	4	4	4	4	4	4
3	4	2	9	9	9	9	9
4	1	2	5	3	16	16	16
5	0	4	3	12	8	6	2
6		1	3	10	2	17	13
7		0	5	10	15	11	3
8			9	12	13	7	18
9			4	3	13	5	12
10			1	9	15	5	8
11			0	4	2	7	6
12				1	8	11	6
13				0	16	17	8
14					9	6	12
15					4	16	18
16				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

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

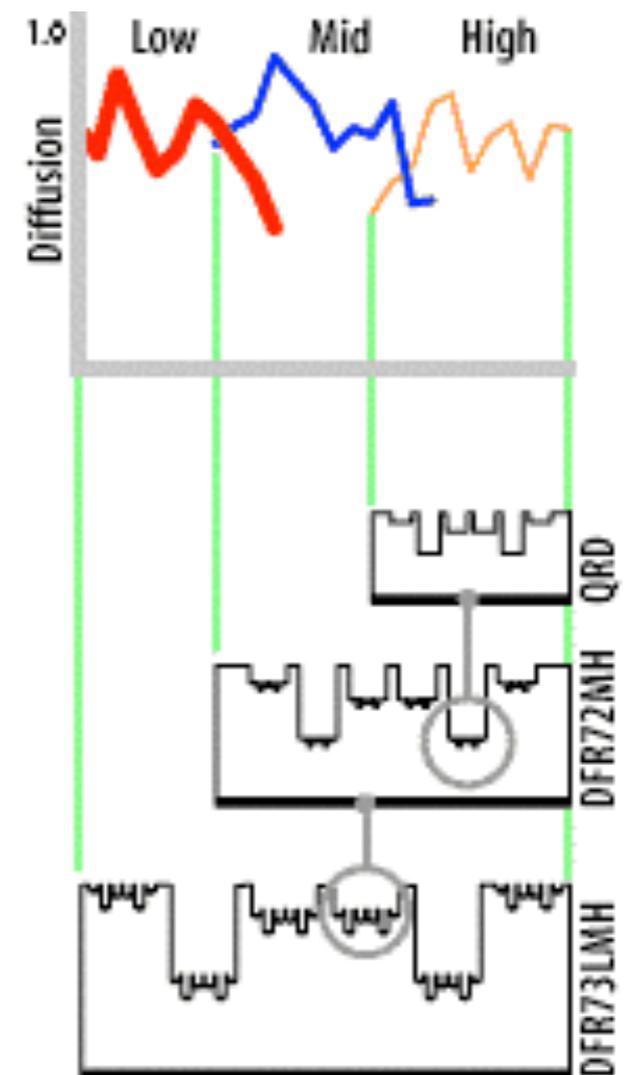
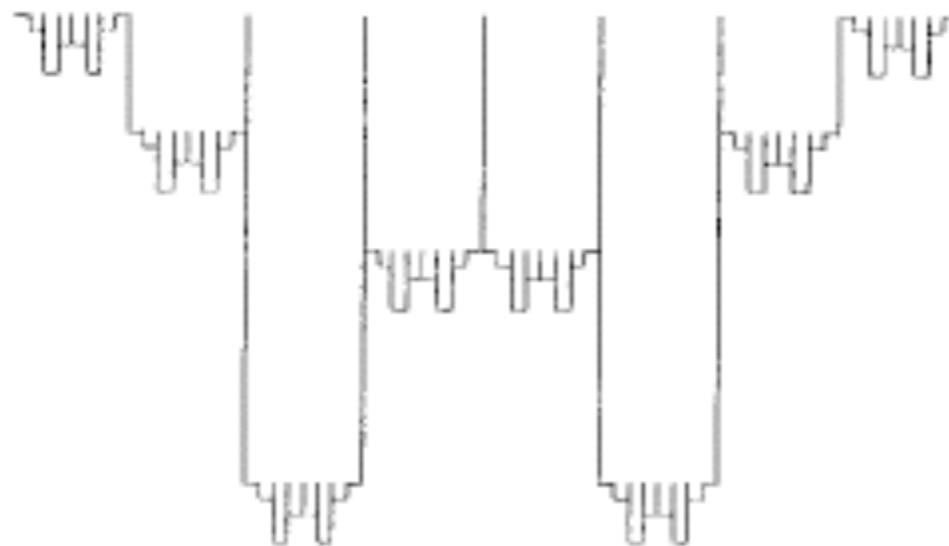
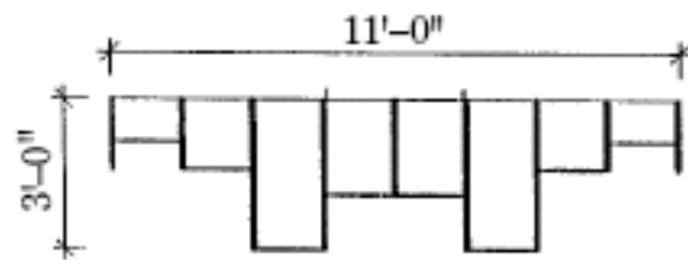
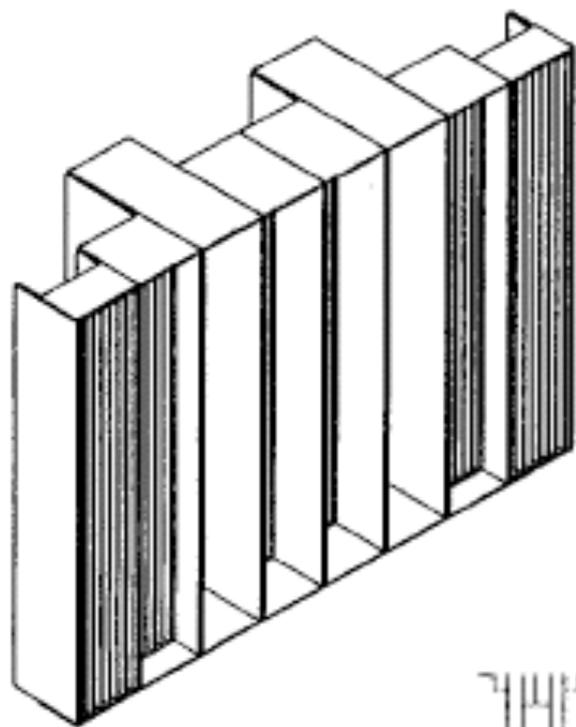
$n$  = integer

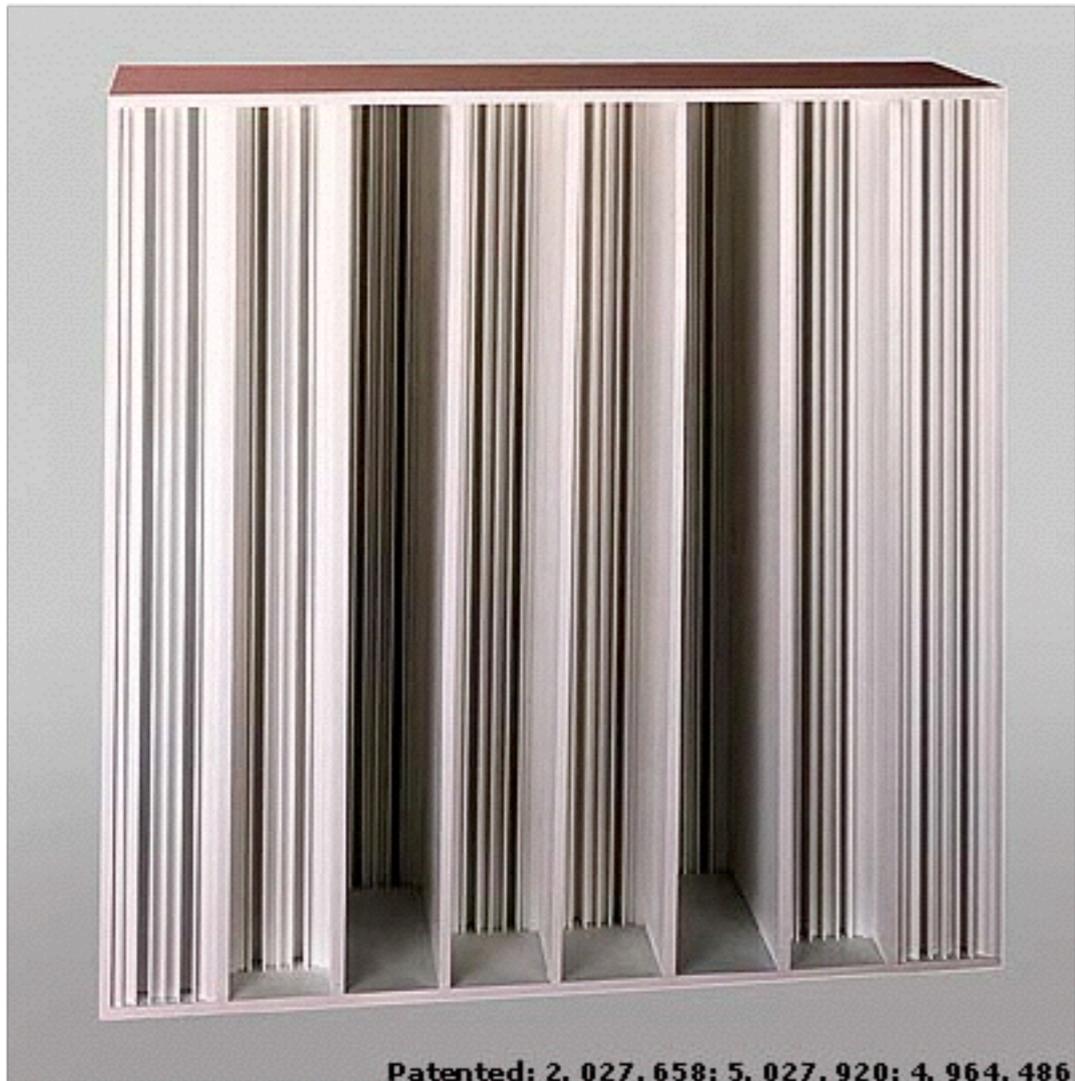
$p$  = prime number





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



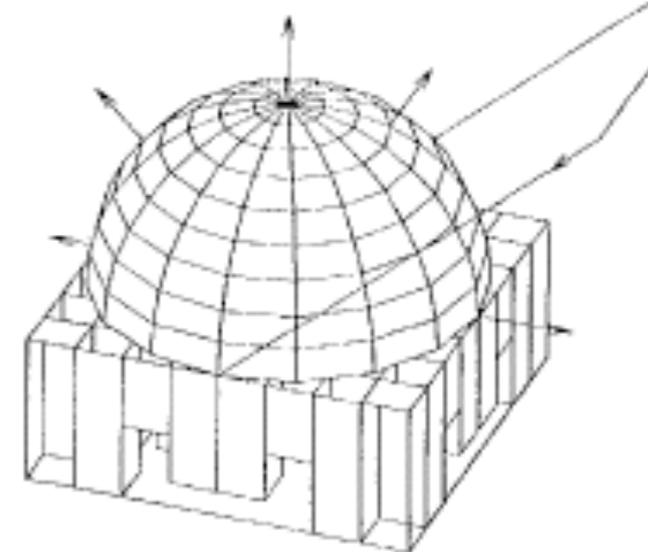
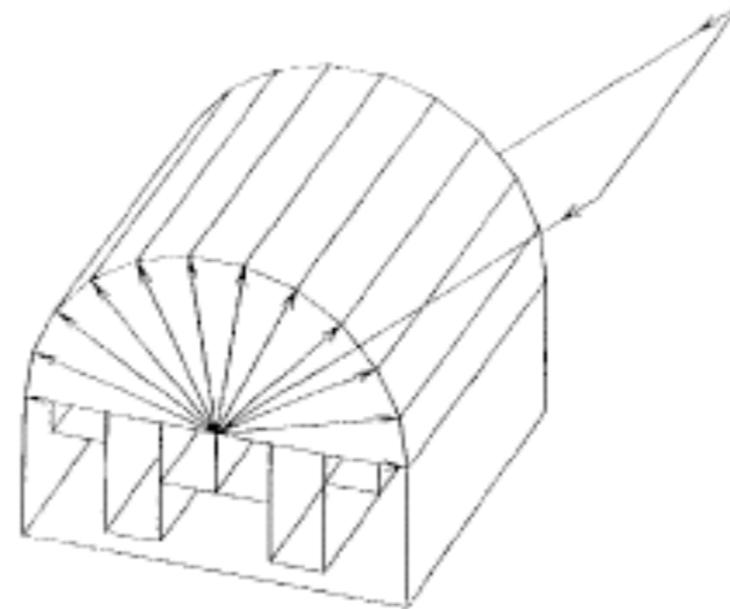
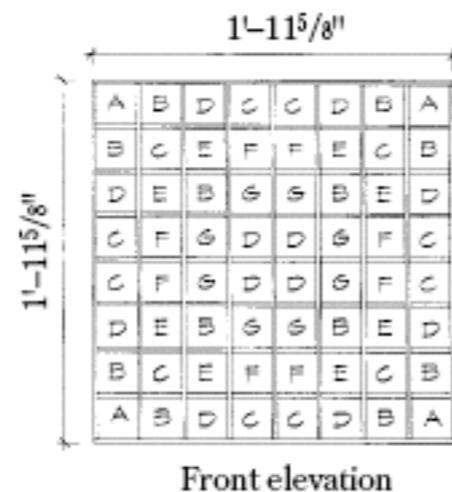
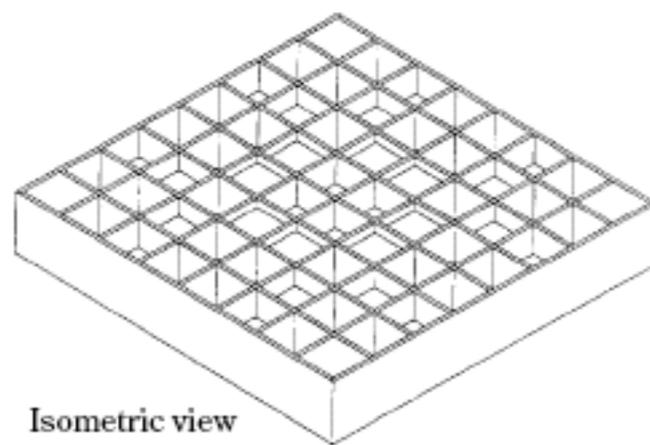


Patented: 2, 027, 658; 5, 027, 920; 4, 964, 486



# 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.



Schema dell'omniffusor

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









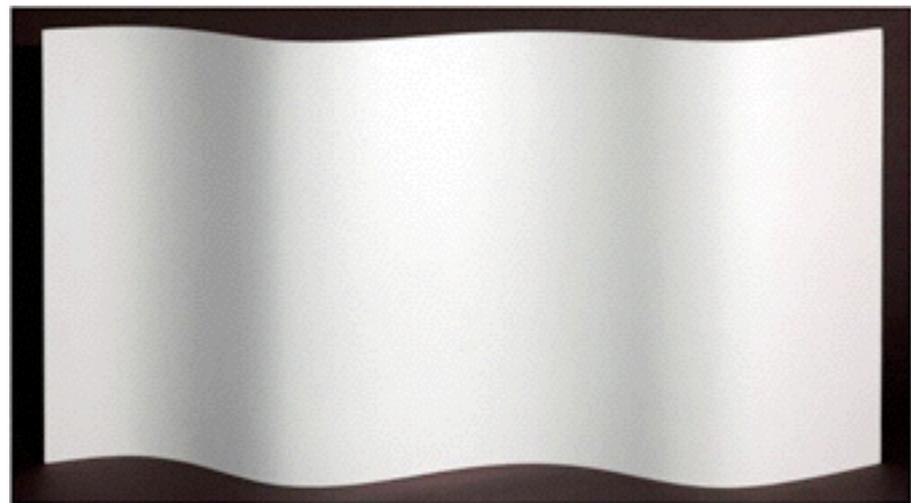
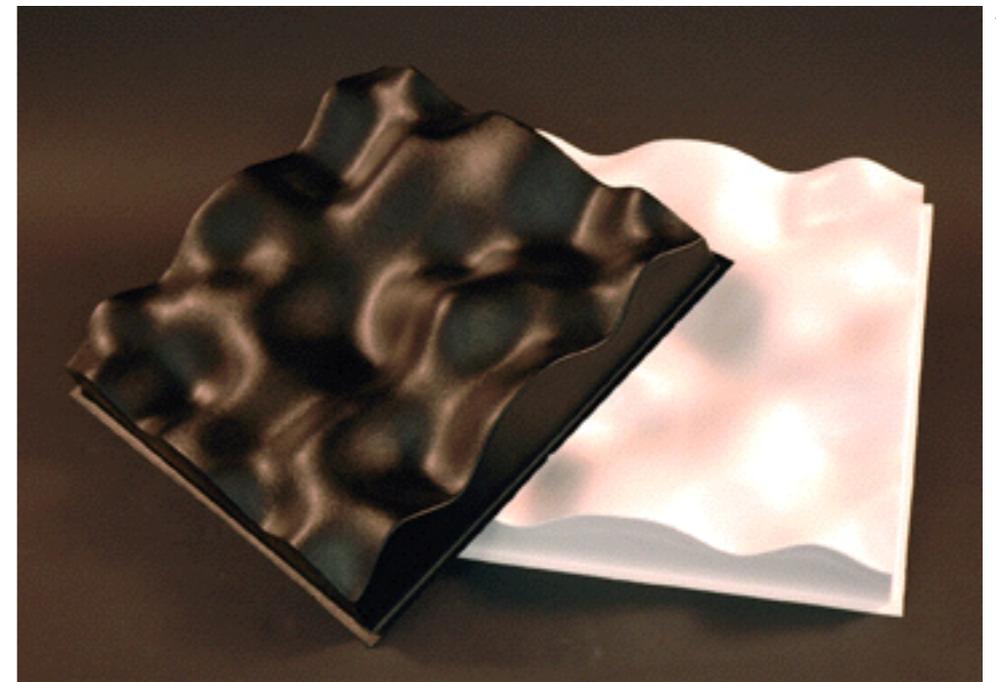
# Diffusori a linee curve

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.

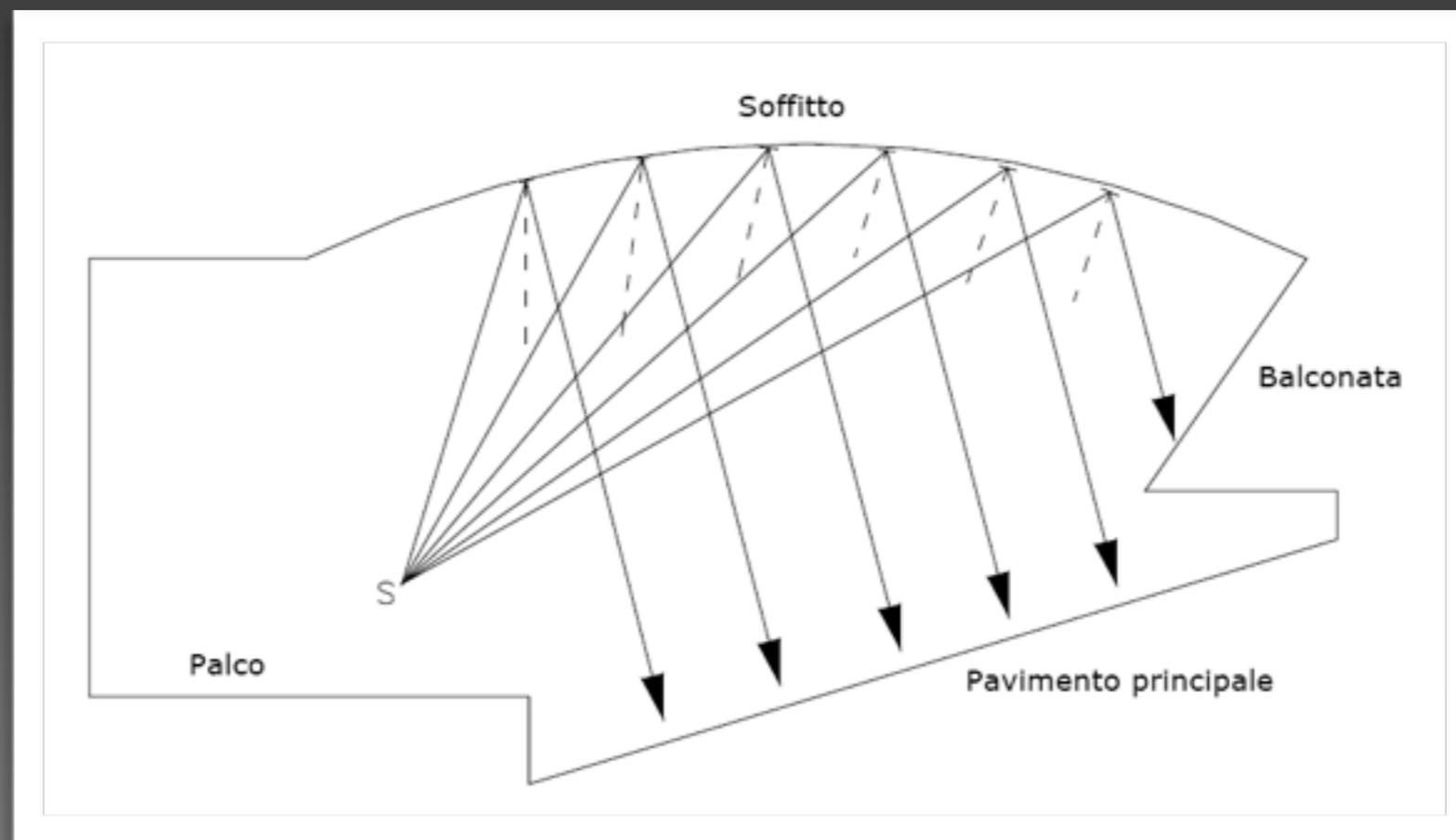




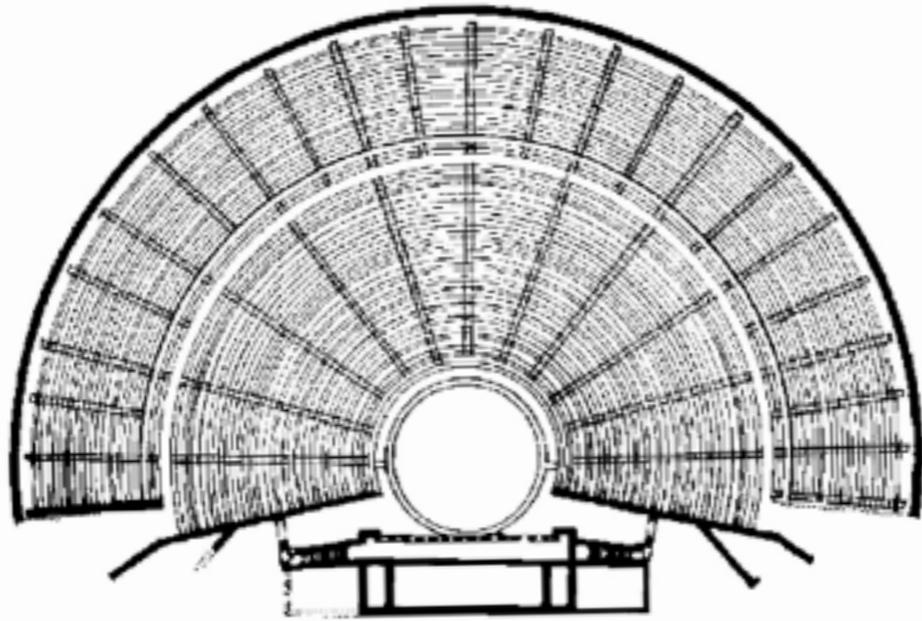
# Room Acoustics:

## Acustica negli ambienti chiusi

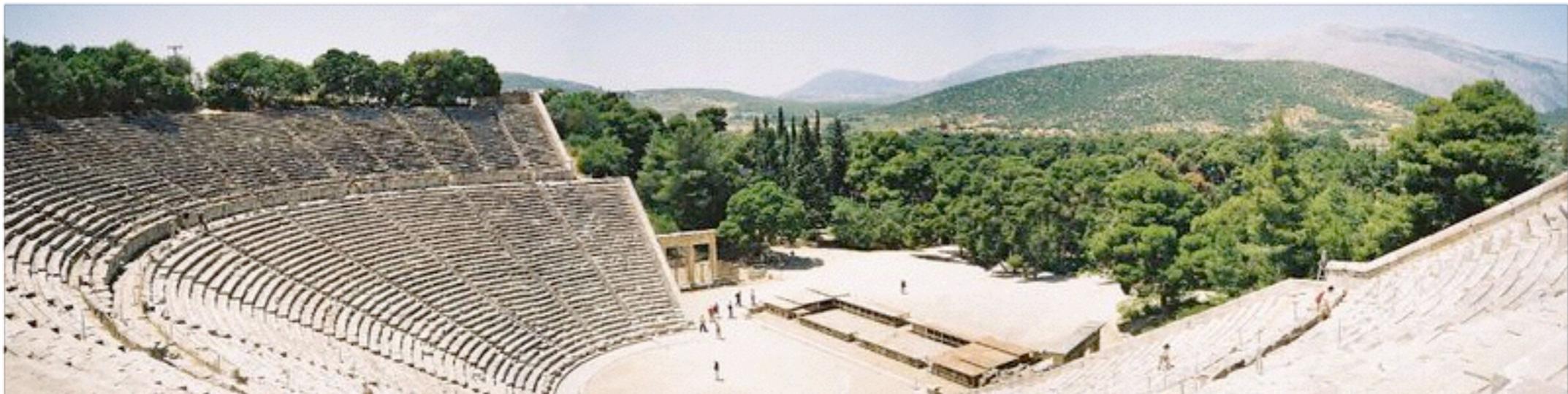
Scienza che studia la propagazione del suono in locali chiusi o comunque in presenza di oggetti capaci di causare effetti significativi di assorbimento e riflessione.



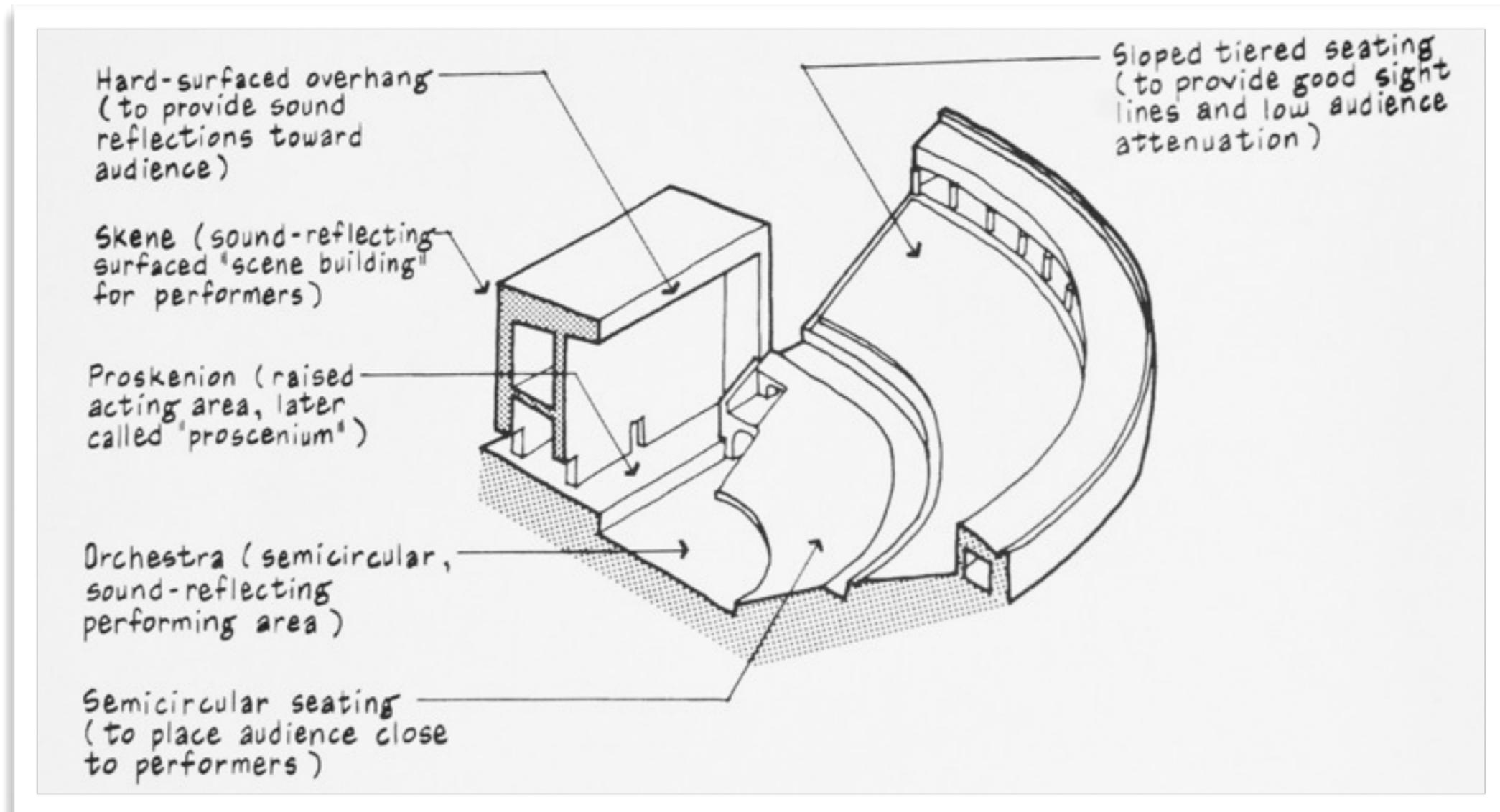
# Nell'antichità: i primi teatri



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

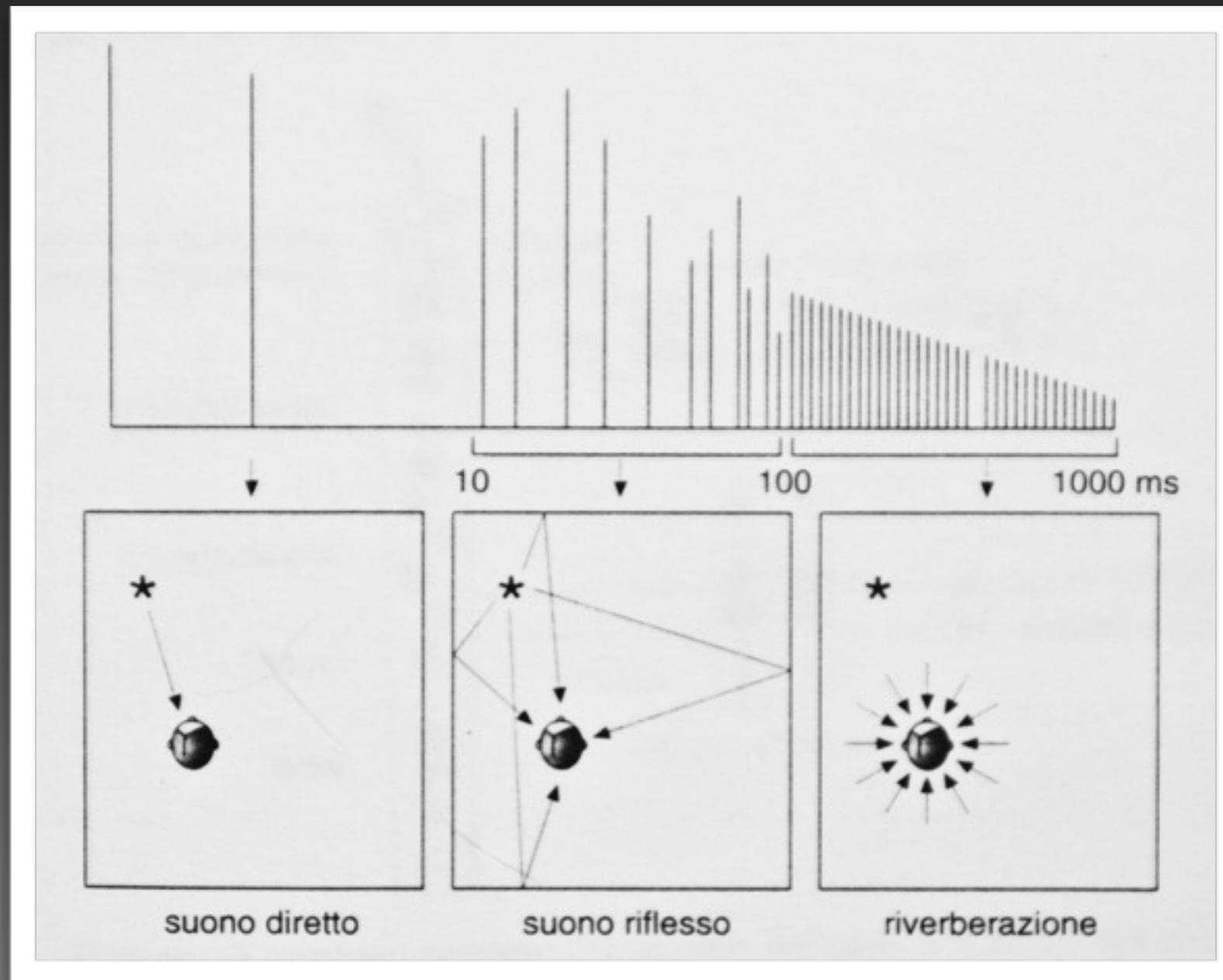
la formula di Sabine presuppone  
alcune condizioni:

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

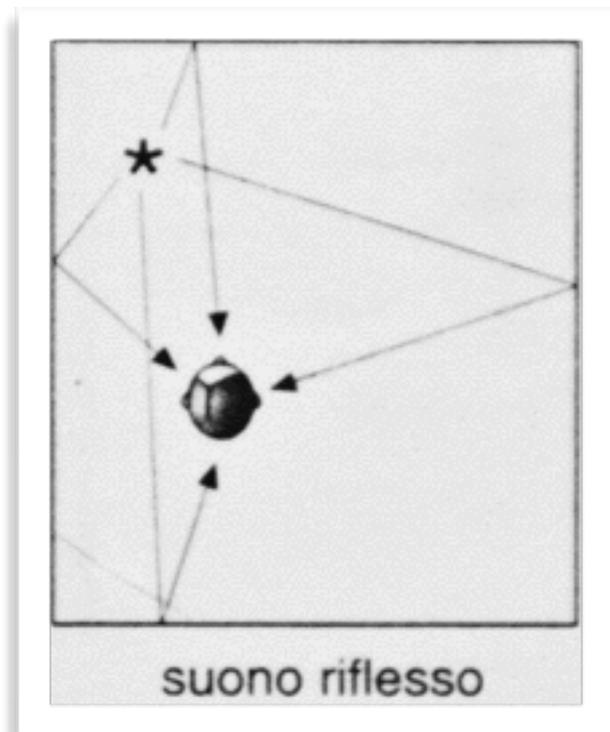
Il **Suono diretto** trasmette informazioni relative a:

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.



# ...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**

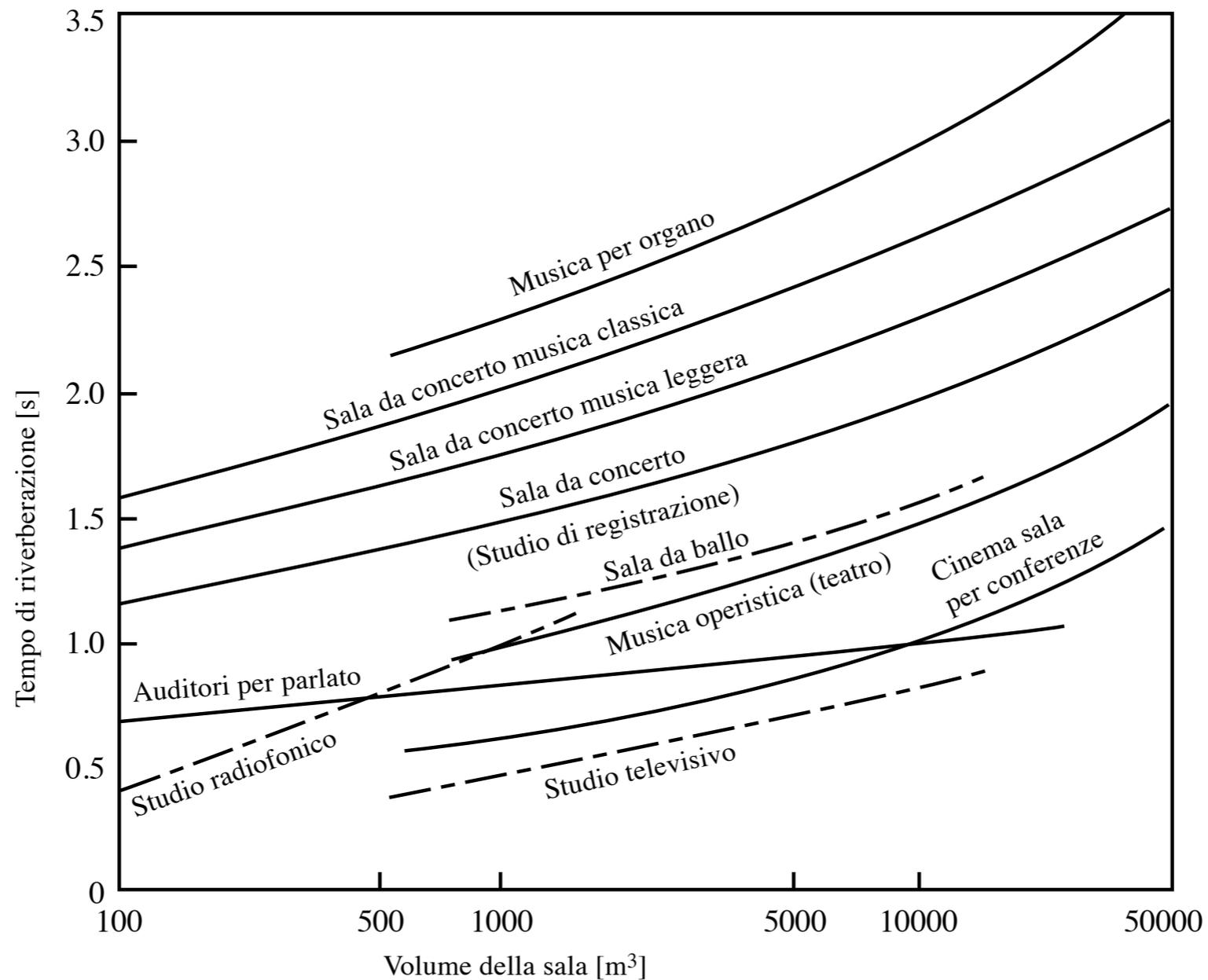
# Tempo di riverberazione ottimale

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.**



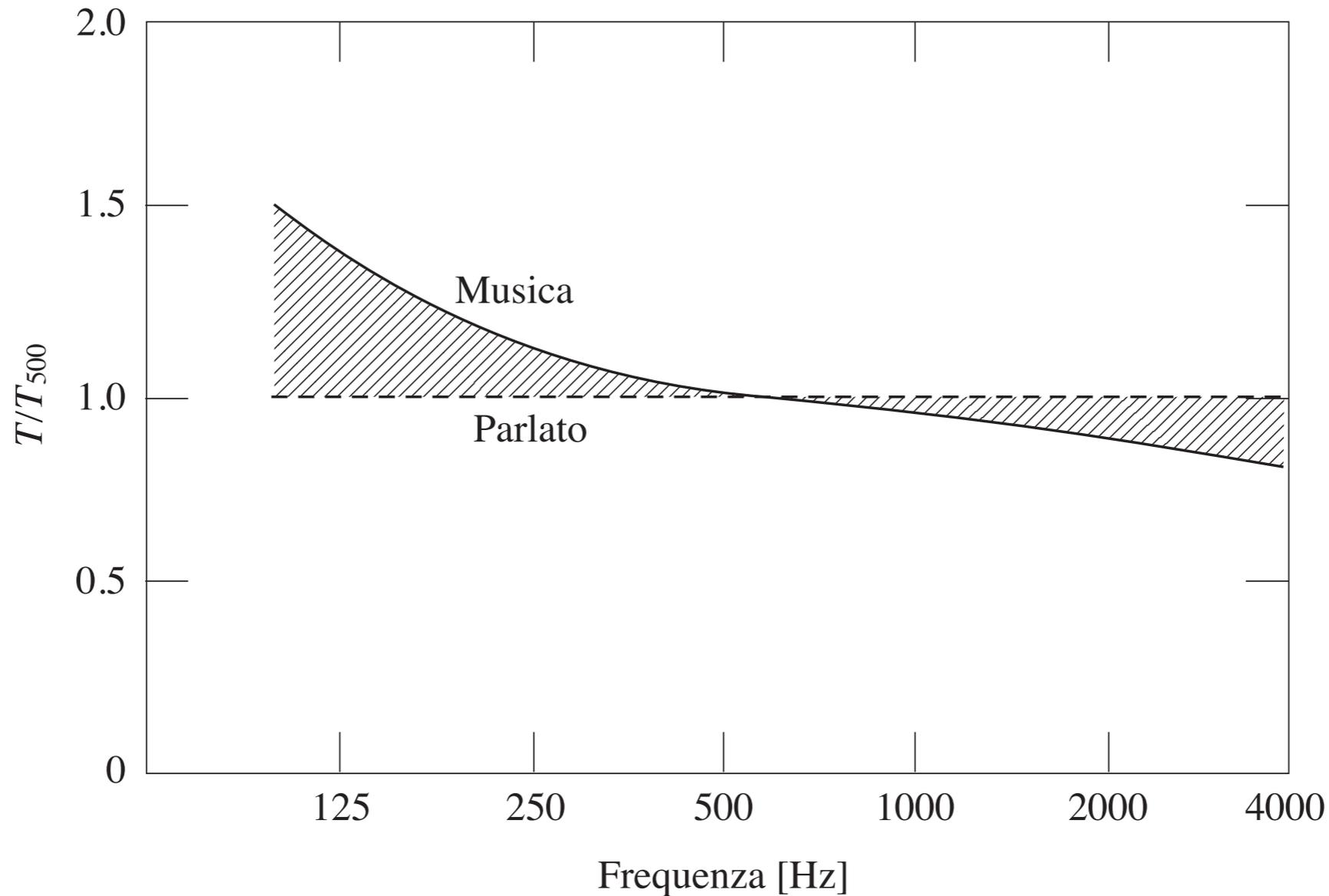
il valore ottimale cresce all'aumentare del volume della sala per una determinata destinazione d'uso:

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

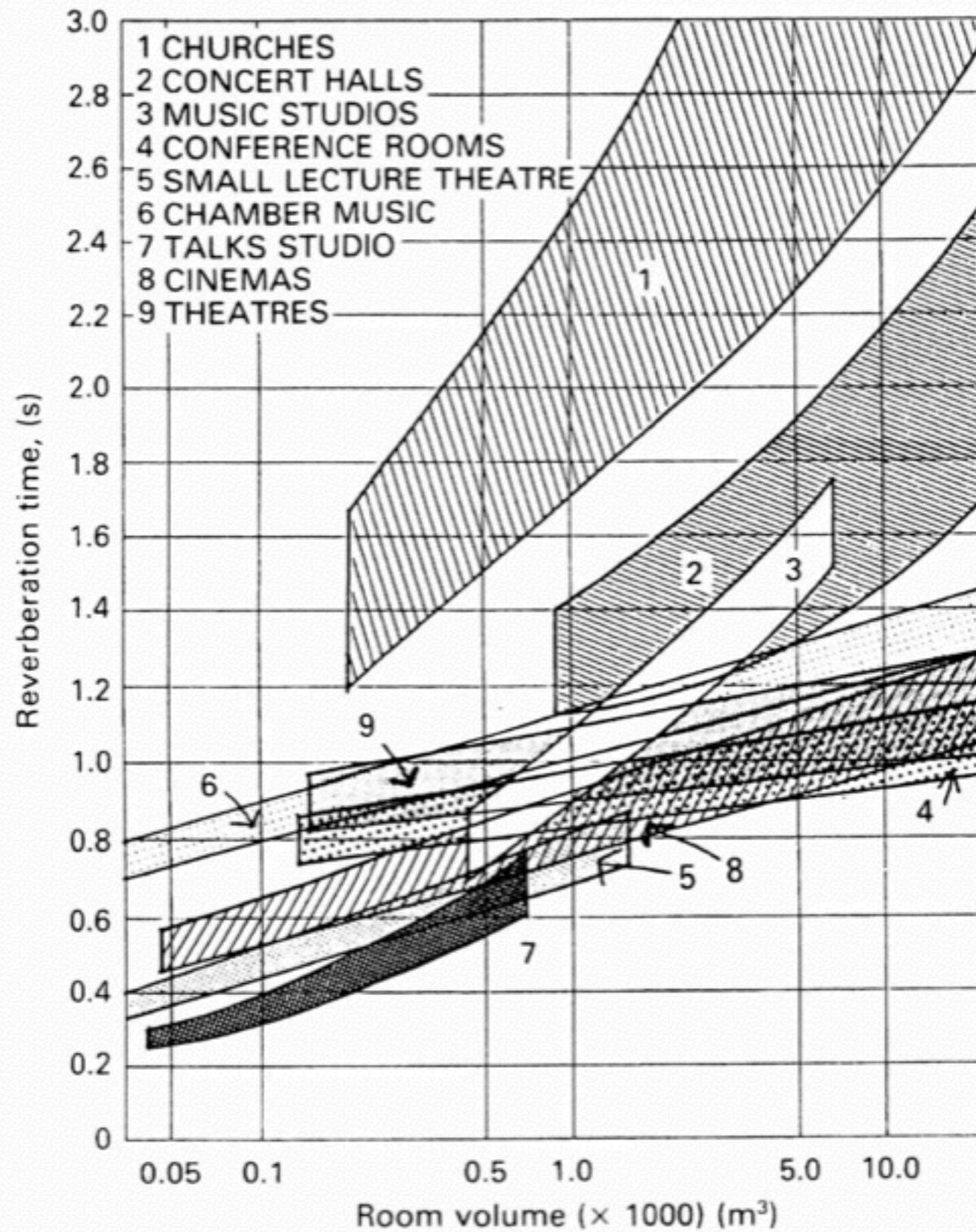
$$RT60_{parlato} = 0.1 V^{1/3}$$

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

# 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

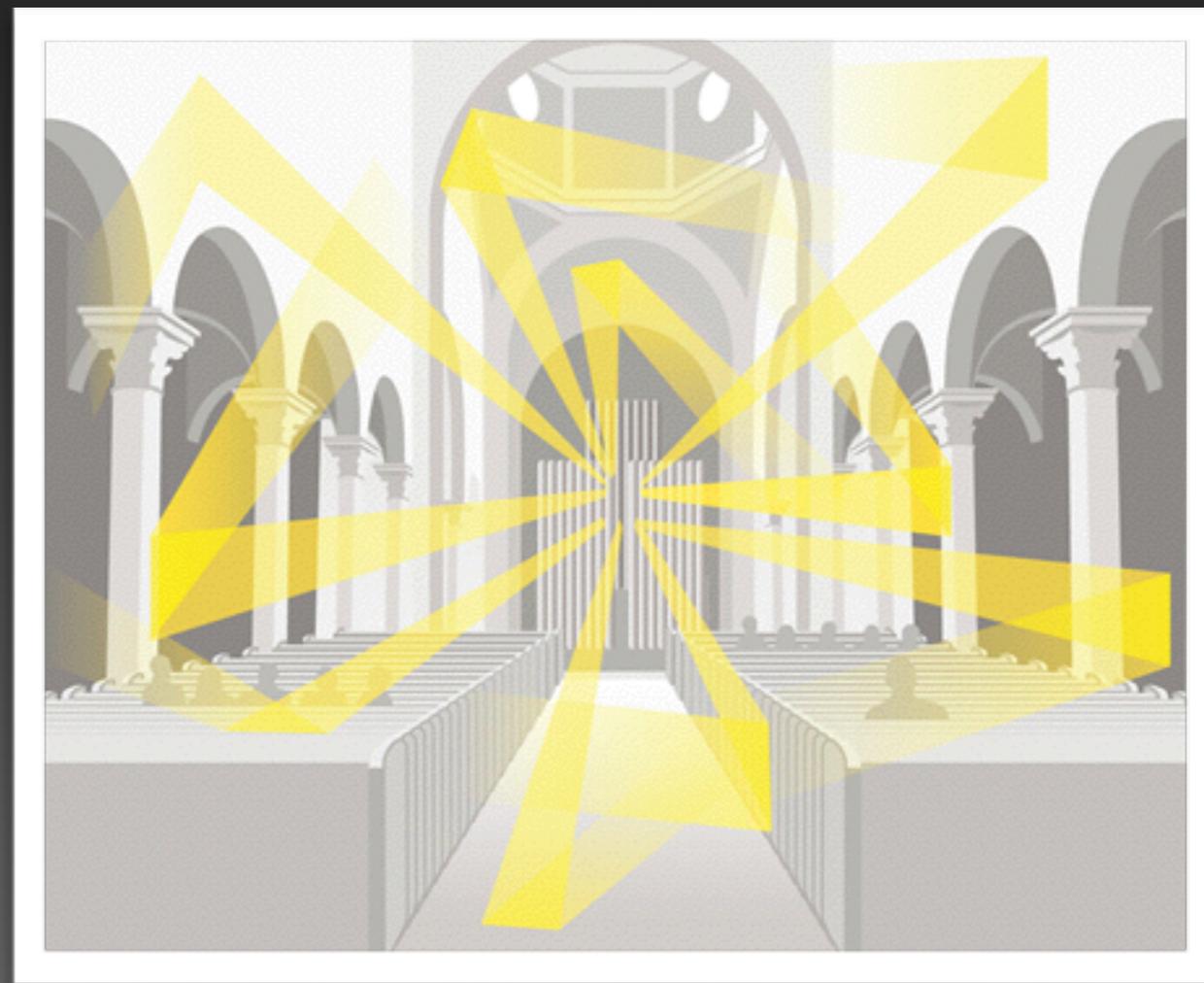


# Valori di RT60 relativi a importanti sale acusticamente efficienti

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

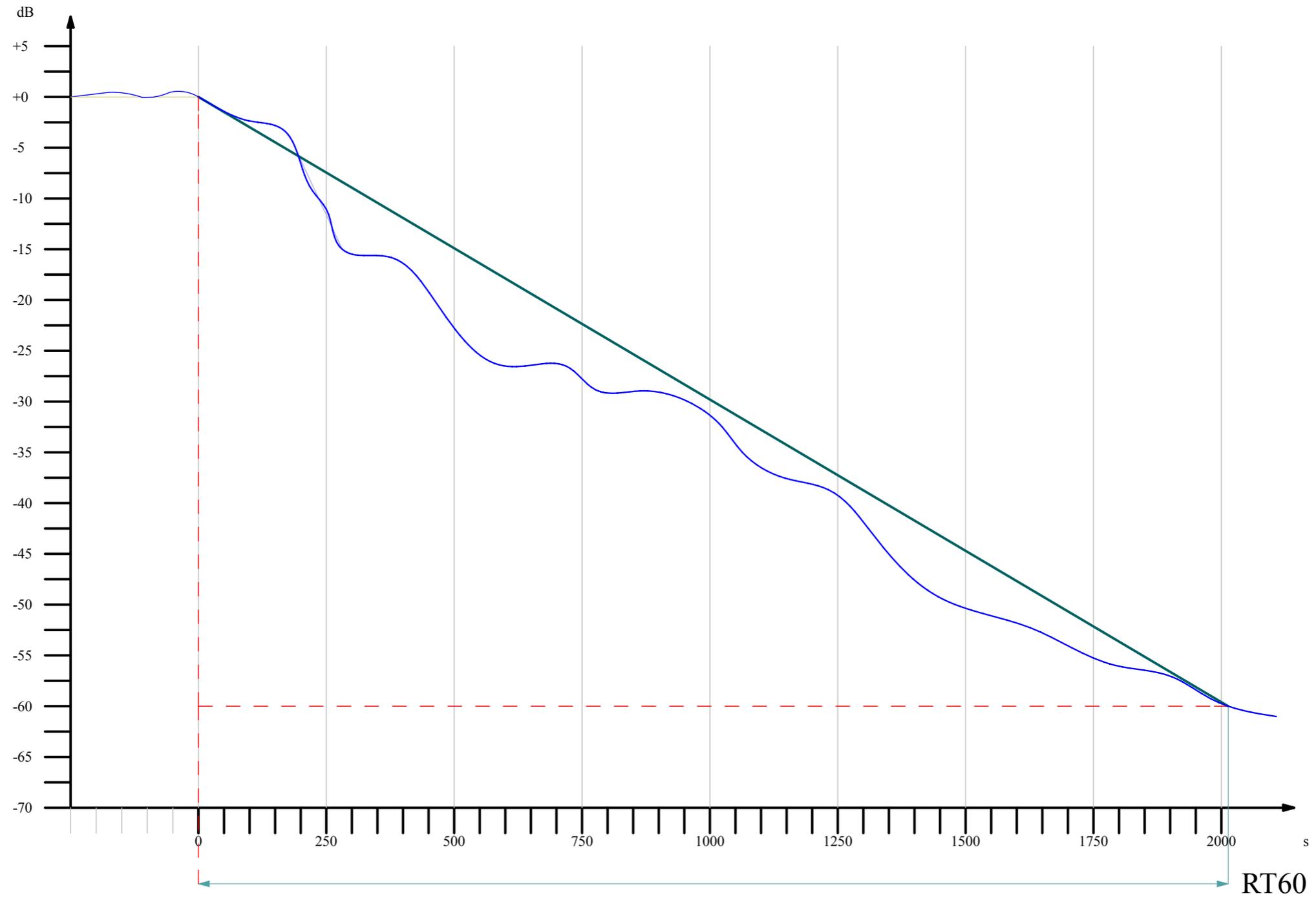
Fig. 1.3. Tempi di riverberazione alle varie frequenze di alcune sale da concerto (da KINSLER, *Fundamentals of Acoustics* 4<sup>a</sup> ed.).

# Tempi di riverberazione



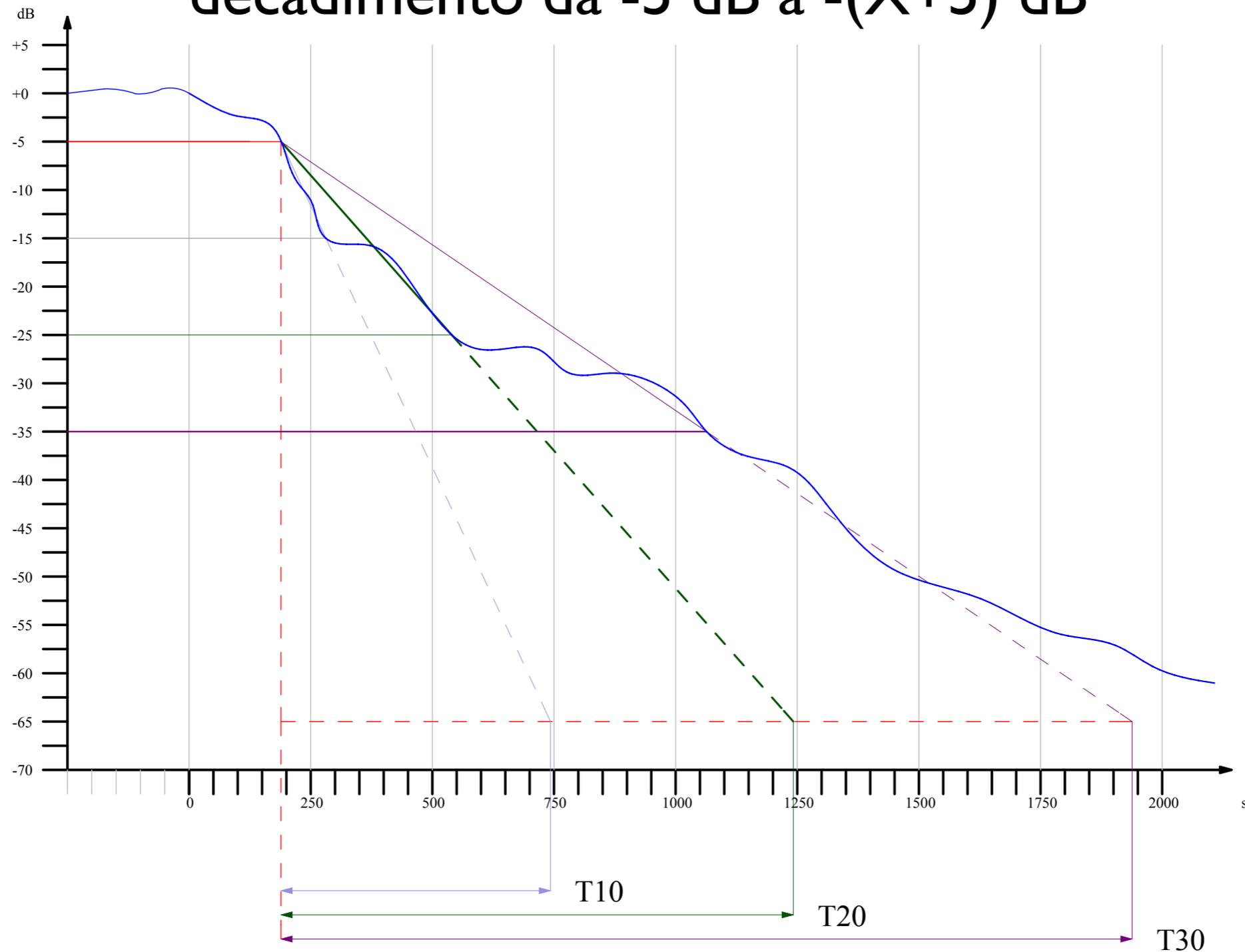
parametri relativi ai tempi di riverberazione tratti dalla  
normativa ISO3382

# RT60



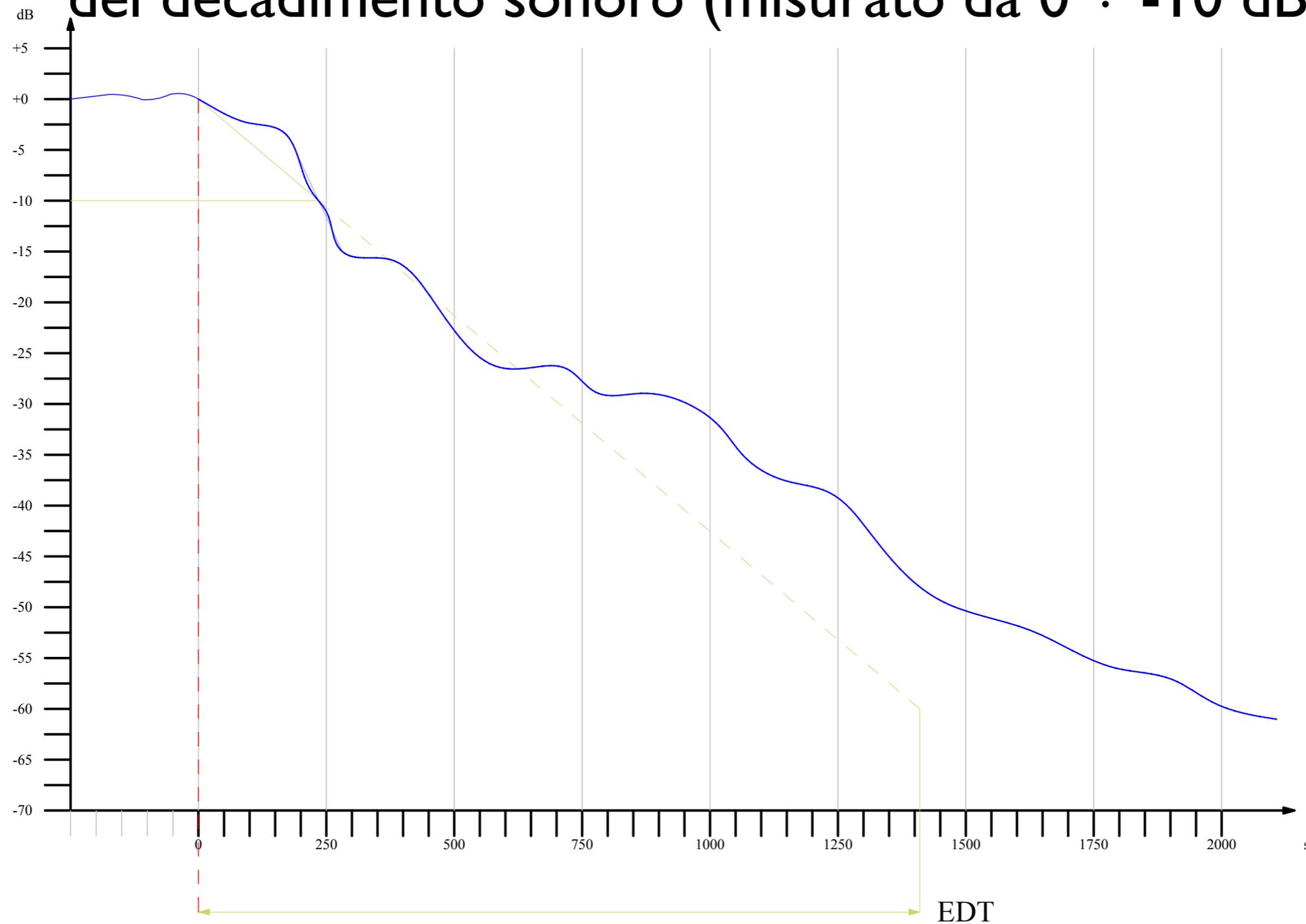
# T10 - T20 - T30 - TX

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



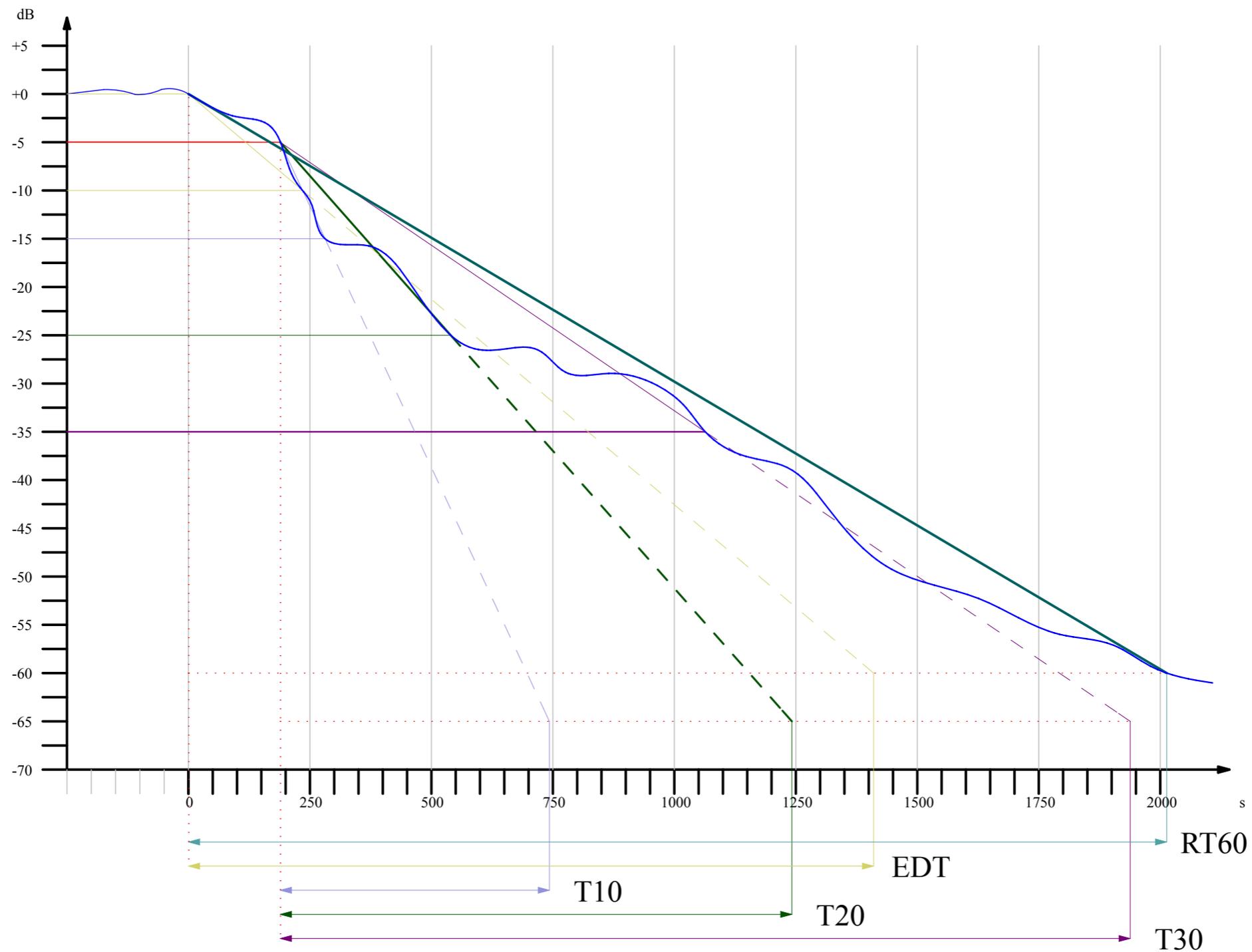
# EDT

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*.

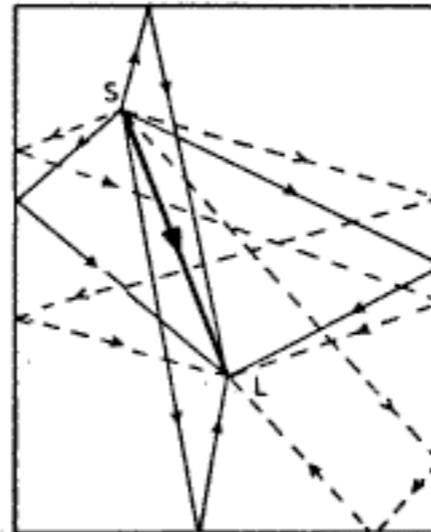
Tentativo di classificazione delle sale da concerto utilizzando parametri oggettivi.



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



**Fig. 1.** Some sound paths from a sound source S to a listener L. The direct sound has been indicated with a heavy solid line. The four sound paths, including single reflections, have been drawn as thin solid lines. Slashed lines indicate sound paths with multiple reflections of which only a small selection has been included. As a matter of fact, the radiated sound is attenuated proportional to the square of the length of the path and by every reflection.

# 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.

# La percezione della direzione

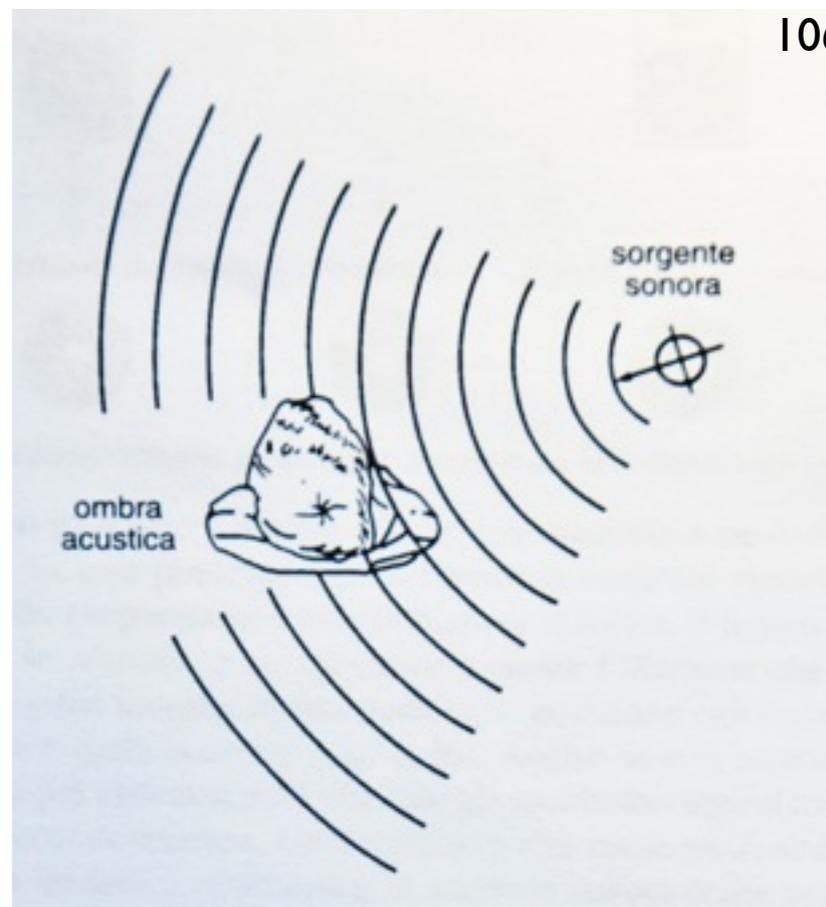
Un orecchio soltanto non riesce a discernere la direzione da cui proviene un suono; per fare ciò sono necessarie entrambe le orecchie.

La capacità delle due orecchie di individuare una sorgente sonora in uno spazio è detta **localizzazione spaziale o binaurale**.

E' l'effetto risultante dell'utilizzo di tre informazioni (percepita dalle orecchie):

1. differenze di intensità fra le orecchie
2. differenze di tempi di arrivo alle orecchie
3. influenza della pinna (parte esterna dell'orecchio)

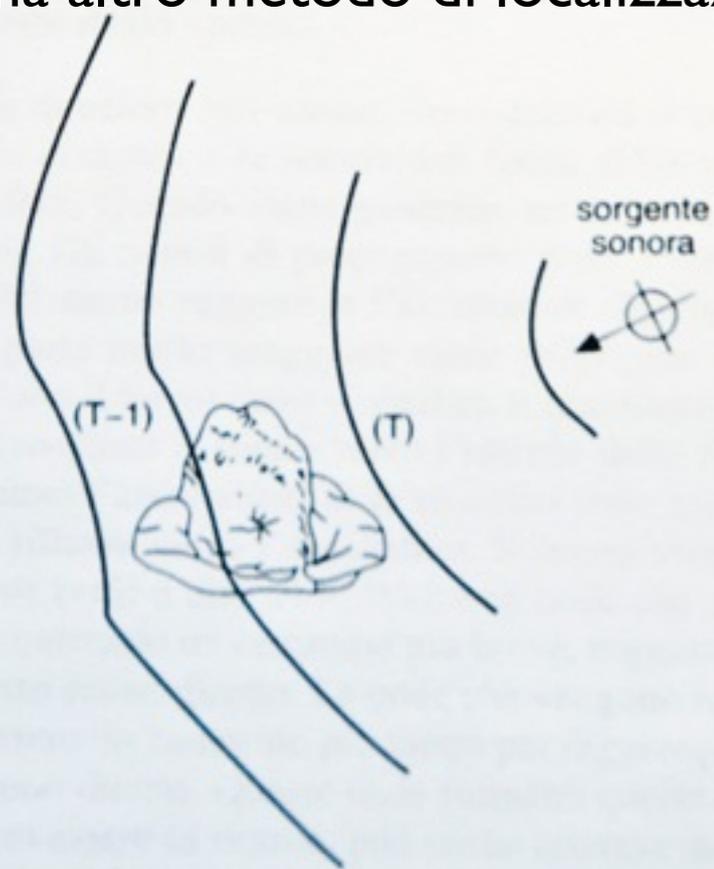
Ad esempio: i suoni di frequenze medie e alte provenienti dalla parte destra arrivano all'orecchio destro con un livello di intensità superiore rispetto all'orecchio sinistro, provocando quindi una differenza di intensità fra le orecchie. Tali differenze si verificano perché la testa funge da ombra acustica permettendo solo ai suoni riflessi dalle superfici circostanti di raggiungere l'orecchio sinistro (fig. a lato).



Dato che i suoni riflessi fanno un percorso più lungo e perdono energia ad ogni riflessione, l'intensità del suono percepito dall'orecchio sinistro risulta ridotta e il cervello comprende che il suono derivante proviene dalla destra.

Questo effetto non assume grande importanza per le basse frequenze, le cui lunghezze d'onda sono molto superiori al diametro della testa e possono facilmente curvarsi attorno alla sua ombra acustica.

Un altro metodo di localizzazione noto come differenze di tempi di arrivo fra orecchie, è usato alle basse frequenze.



Sia nella prima che nella seconda figura sono illustrate piccole differenze di percorso delle onde sonore, dato che la lunghezza del percorso per giungere fino all'orecchio sinistro è leggermente superiore a quella del percorso fino all'orecchio destro. La pressione sonora è quindi recepita all'orecchio sinistro in un istante di tempo successivo rispetto all'orecchio destro; questo metodo di localizzazione, in combinazione con le differenze di intensità fra le orecchie ci dà le informazioni per la localizzazione laterale sull'intero spettro udibile.

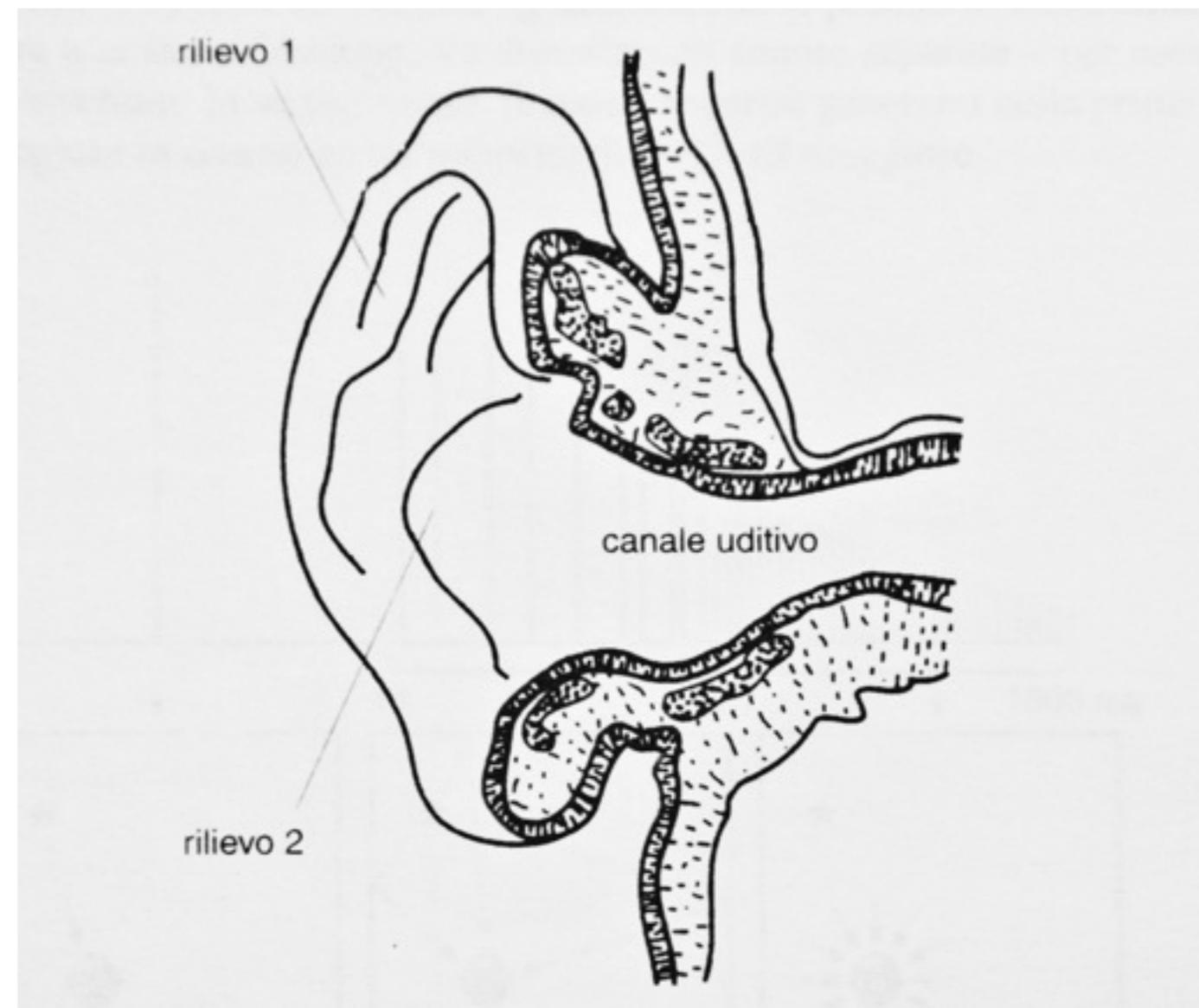
Le informazioni relative all'intensità e ai ritardi ci permettono di capire l'angolazione da cui proviene un suono, ma non se un suono si origina da davanti, da dietro o da sopra.

La pinna, comunque, usa due rilievi che riflettono il suono incidente nell'orecchio; tali rilievi introducono dei ritardi di tempo fra il suono diretto (che raggiunge l'ingresso del canale uditivo) e il suono riflesso dai rilievi stessi (che varia a seconda della posizione della sorgente).

E' interessante notare che da una posizione anteriore fino a  $130^\circ$  rispetto all'asse non ci possono essere riflessioni da parte dei rilievi della pinna, perché esse vengono bloccate dalla pinna stessa.

- I suoni non riflessi che sono in ritardo di un tempo compreso fra 0 e 80 microsecondi saranno percepiti come se si originassero da dietro.
- Il secondo rilievo produce ritardi fra i 100 e i 300 microsecondi, corrispondenti a una sorgente collocata entro il piano verticale.

Le riflessioni ritardate da entrambi i rilievi si combinano con il suono diretto per dare le caratteristiche colorazioni della risposta in frequenza che sono dovute a interferenze di fase distruttive e costruttive a frequenze diverse fra loro.



Il cervello è in grado di comparare queste colorazioni in ciascun orecchio e usare queste informazioni per determinare la localizzazione della sorgente.

Piccoli movimenti della testa forniscono ulteriori informazioni posizionali, dovute alla mutevole prospettiva della sorgente. Comunque queste ultime informazioni sono meno importanti rispetto alle altre localizzazioni.

Se non ci sono differenze fra ciò che percepisce l'orecchio destro e quello che percepisce l'orecchio sinistro, il cervello ritiene che la sorgente sia alla stessa distanza rispetto a ciascun orecchio.

Questo fenomeno permette ai fonici di posizionare un suono non solo nel monitor destro o in quello sinistro, ma anche fa i due monitor in maniera monofonica: inviando lo stesso segnale ai due monitor, il cervello percepisce il suono in maniera identica fra le due orecchie e ne deduce che la sorgente sonora proviene da una posizione perfettamente centrale rispetto all'ascoltatore.

Cambiando il livello proporzionalmente in ciascun monitor, il fonico cambia le differenze di intensità fra le orecchie e perciò riesce a creare l'illusione che la sorgente sonora sia posizionata fra i due monitor in una qualunque posizione egli desidera: questa tecnica di posizionamento è detta **panning**.

Anche se il metodo è ampiamente usato, non è quello più efficace, dato che solo gli ascoltatori equidistanti dai due monitor percepiranno l'effetto desiderato. Un ascoltatore che fosse posizionato molto vicino al monitor di sinistra tenderà a posizionare la sorgente sonora come proveniente da quella direzione, anche se il segnale è stato indirizzato a destra tramite il pan.

Esistono altri sistemi di localizzazione molto più efficaci, come ad esempio il delay digitale (DDL), il variatore di fase, filtri o tecniche di microfonaaggio stereofonico per assegnare un punto di localizzazione fra i due monitor.

# La percezione dello spazio

Oltre a riconoscere la direzione del suono, l'orecchio e il cervello interagiscono per riuscire a percepire la **distanza** e la sensazione fisica dello **spazio acustico** in cui un evento sonoro si verifica.

Quando viene generato, un suono si propaga dalla sorgente verso tutte le direzioni.

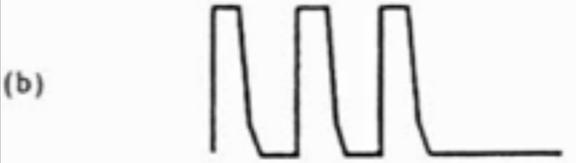
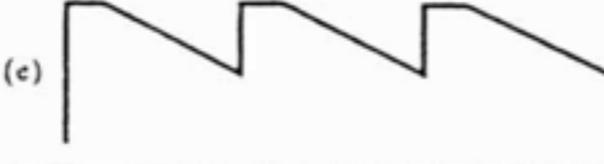
Gli angoli di propagazione sono determinati dalla natura della sorgente:

- una parte del suono raggiunge l'ascoltatore **direttamente**, senza incontrare alcun ostacolo
- una parte molto maggiore viene **propagata** in direzione delle molte superfici che racchiudono il luogo dove si verifica il fenomeno sonoro; se queste superfici sono **riflettenti**, rimandano il suono verso l'interno della stanza, e alcune di queste riflessioni raggiungeranno l'ascoltatore; se le superfici sono **assorbenti**, solo una piccola parte di energia verrà riflessa verso l'ascoltatore.

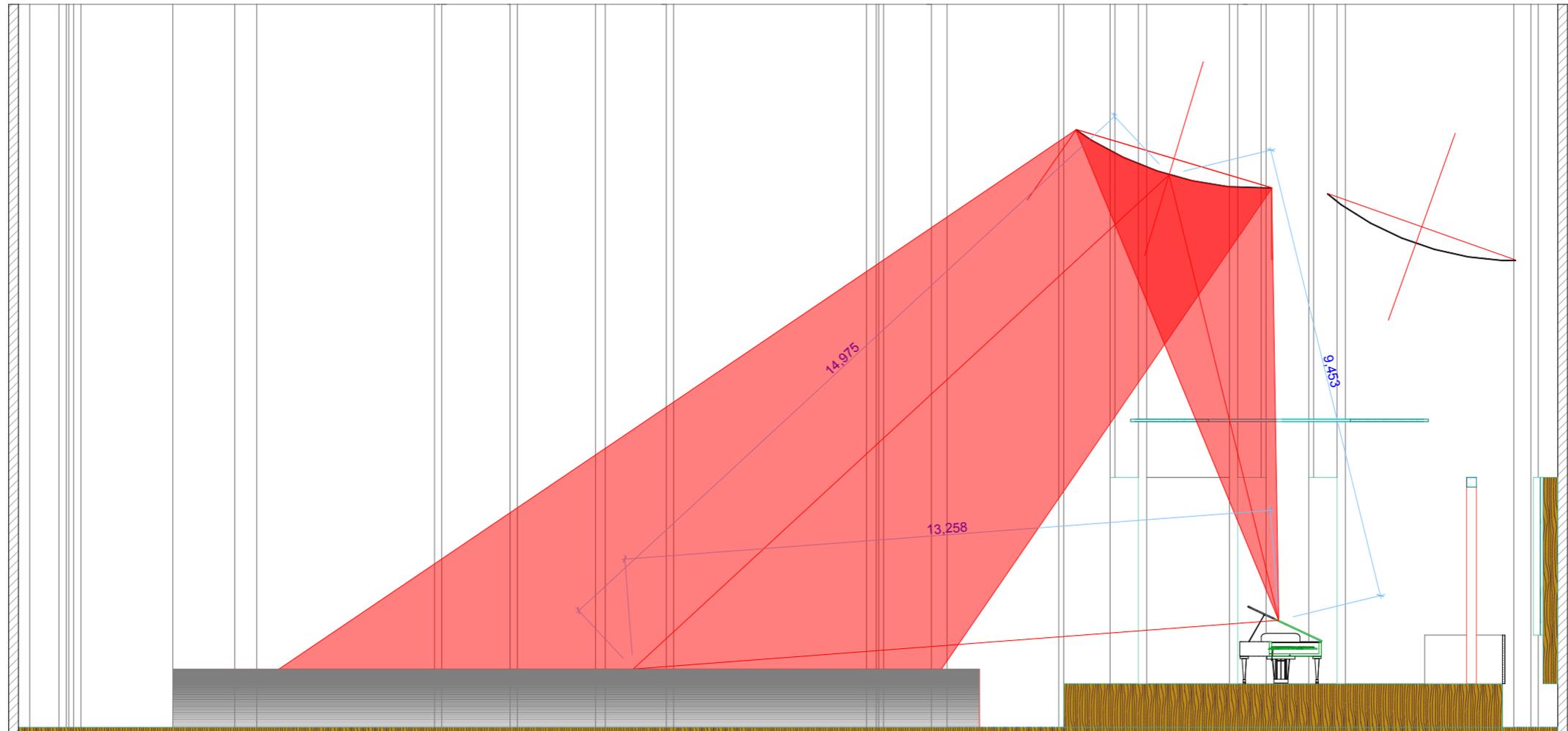
# Altri parametri acustici

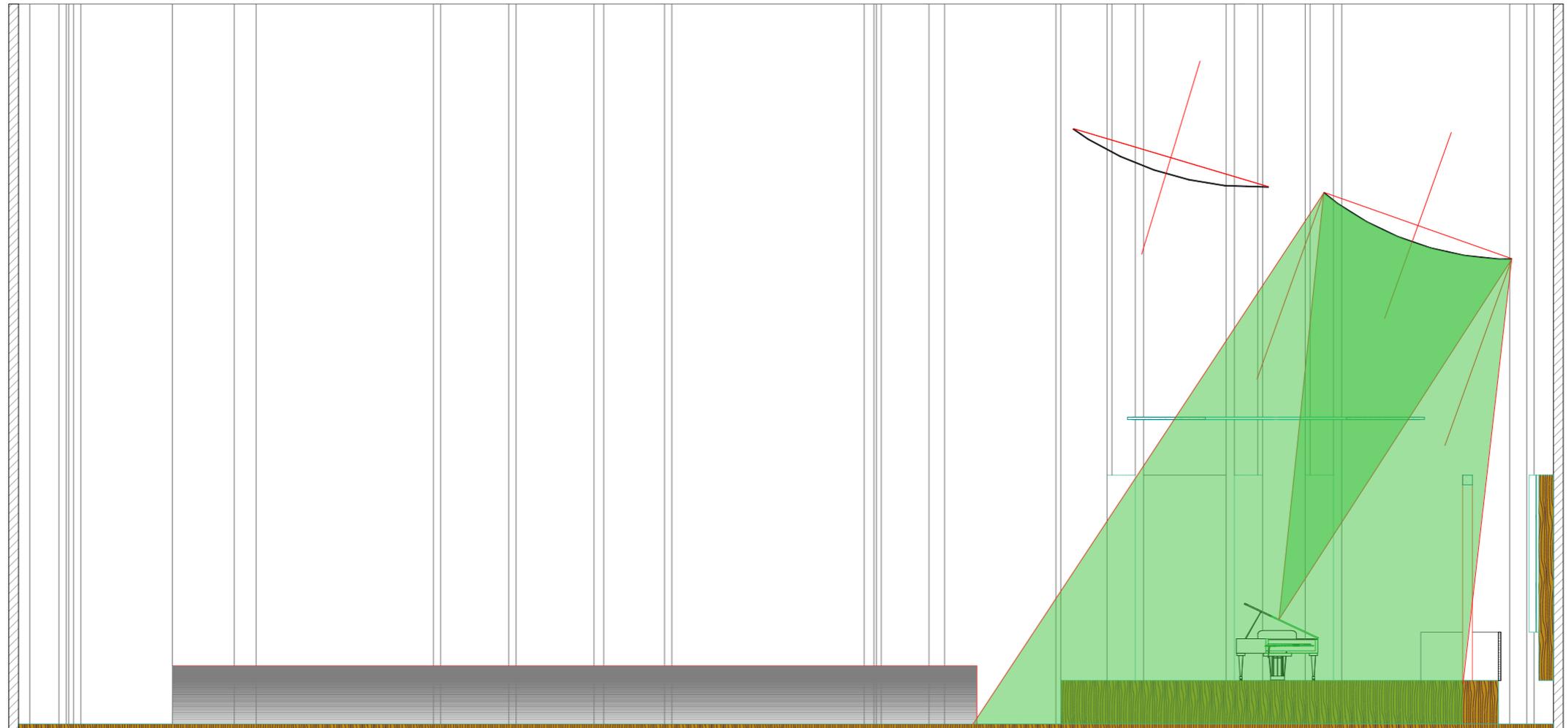
G<sub>ts</sub> TIACC Clarity R<sub>a</sub> STIC80  
 L<sub>f</sub> LIACC C50 BR DirSPL  
 Definition ITD  
 WIACC D50  
 TotSPL

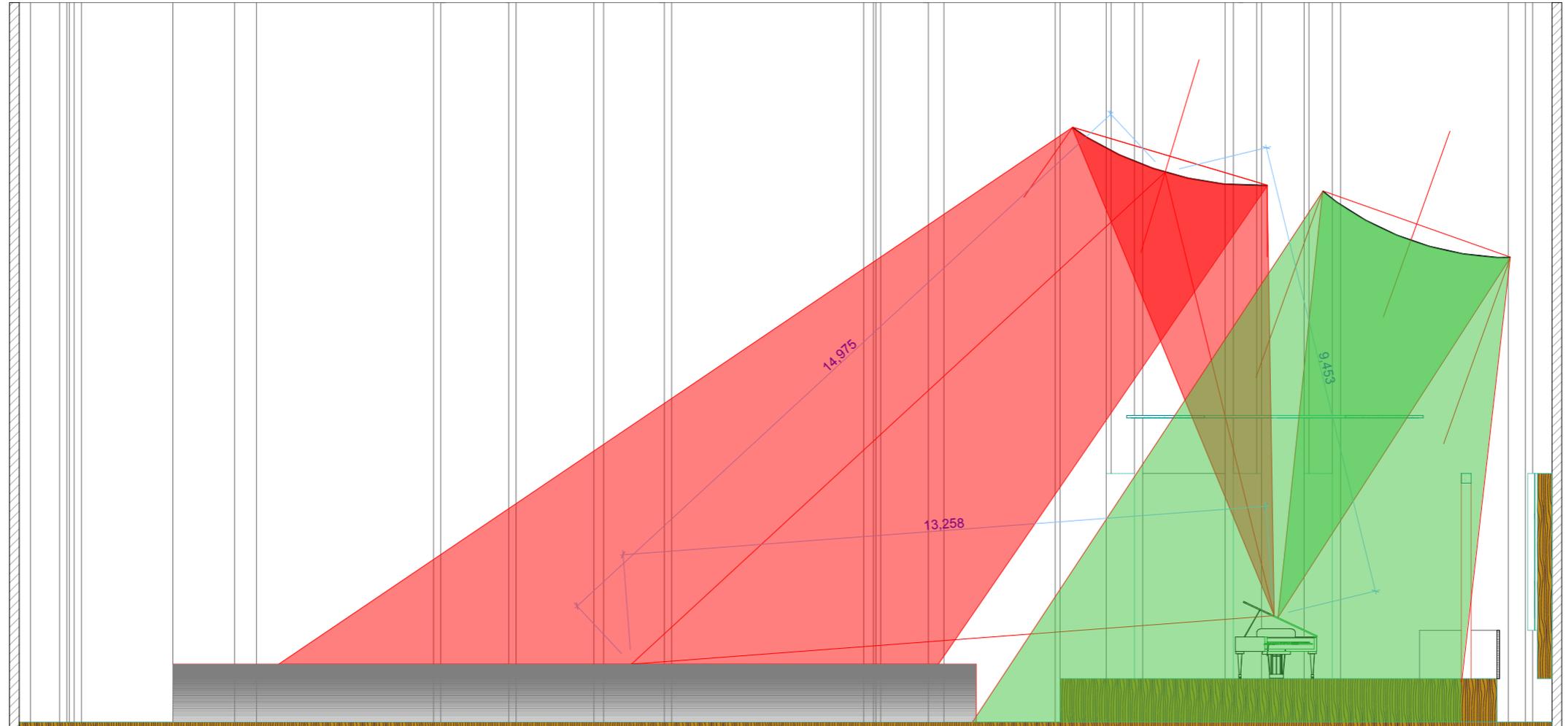
AI<sub>cons</sub> STI

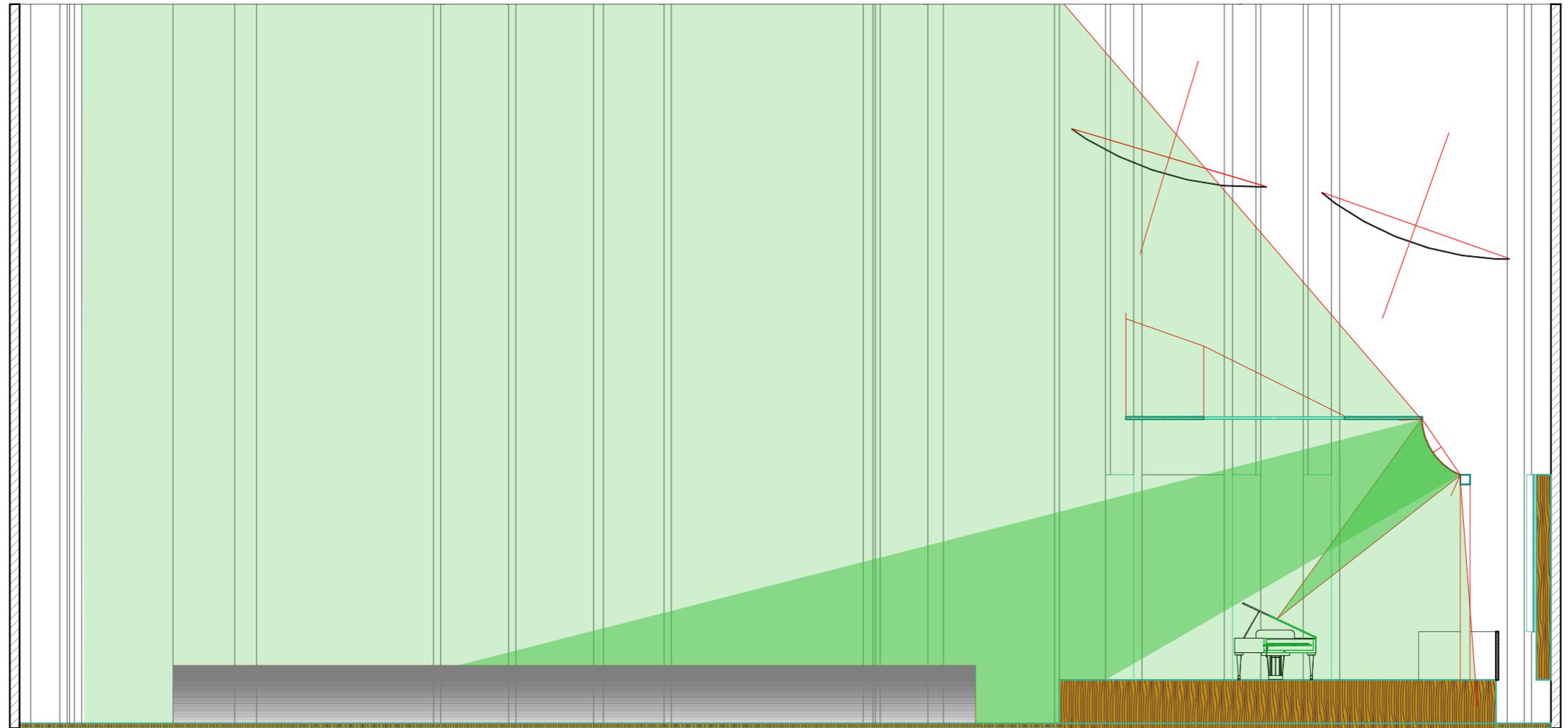
	Condizioni acustiche		Note suonate lentamente		Note suonate velocemente	
	Tempo di riverberazione	Rapporto tra Loudness: suono diretto vs. suono riverberante	Risultato acustico-musicale	definizione e pienezza dei toni	Risultato acustico-musicale	definizione e pienezza dei toni
Toni alla stessa loudness	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

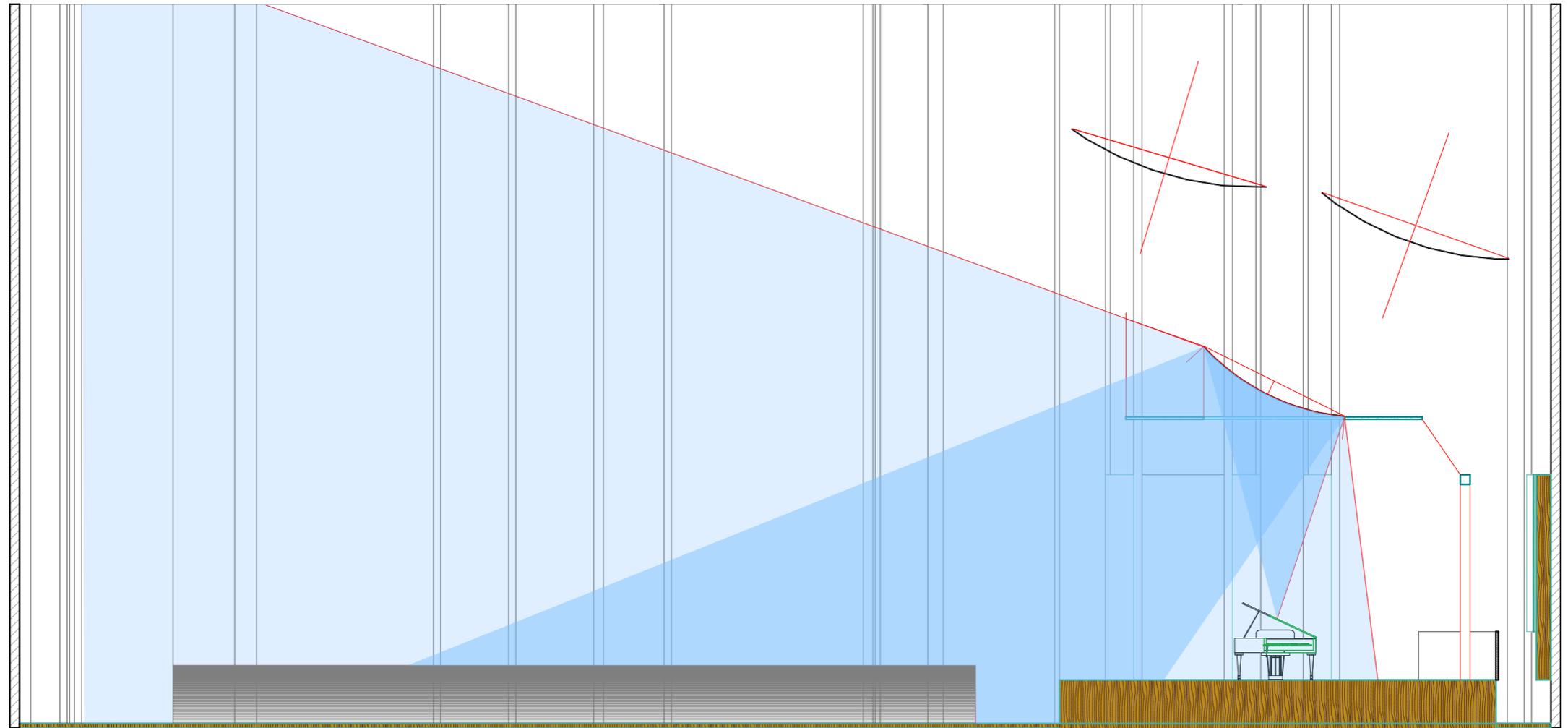
Attributo Soggettivo	Criterio di misura oggettiva	Parametri utilizzati
Chiarezza e trasparenza armonica	Rapporto tra energia vicina e lontana dal suono diretto	Criteri energetici (C80, C50, D50, t
Riverberazione	Decadimento dell'energia sonora	Tempi di riveberazione (T30, T20, T10, EDT)
Spazialità del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

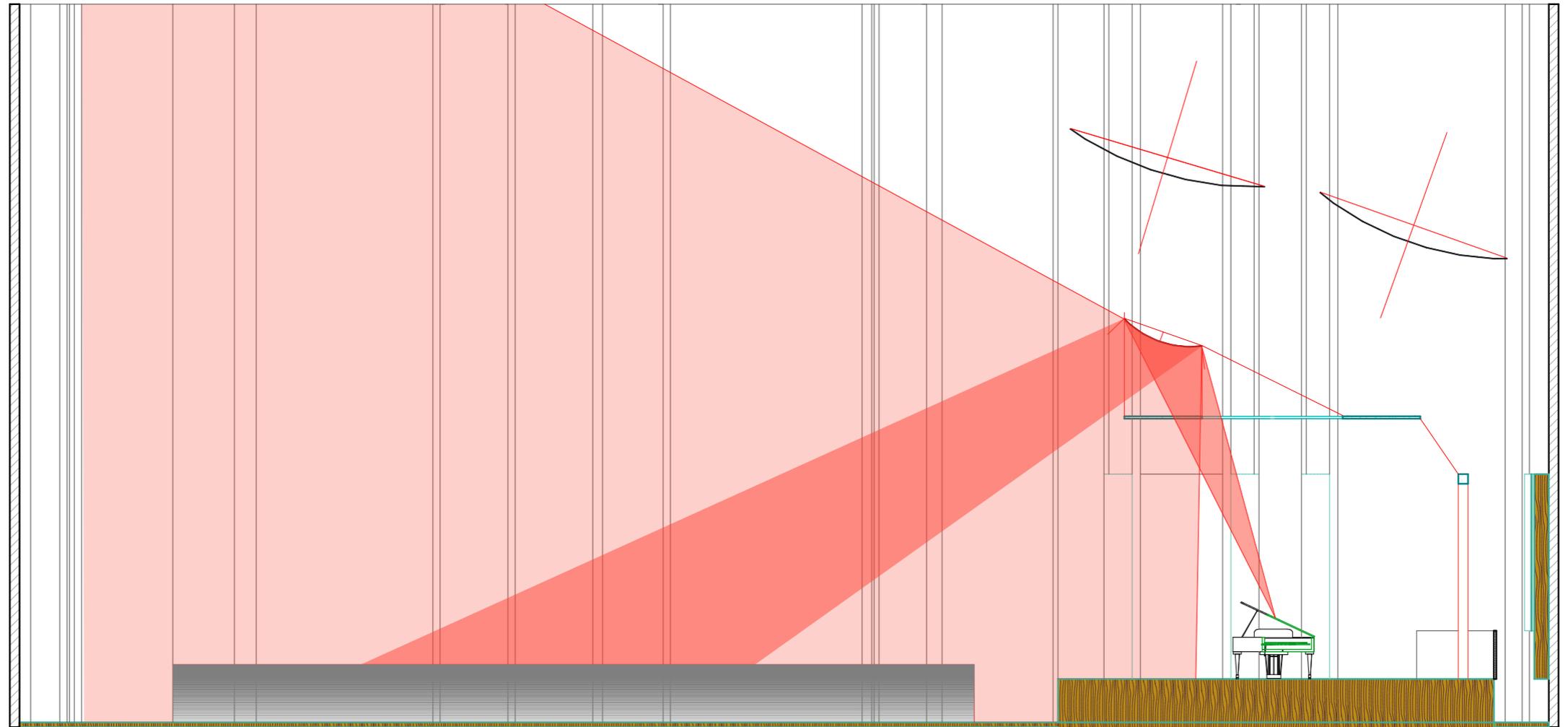


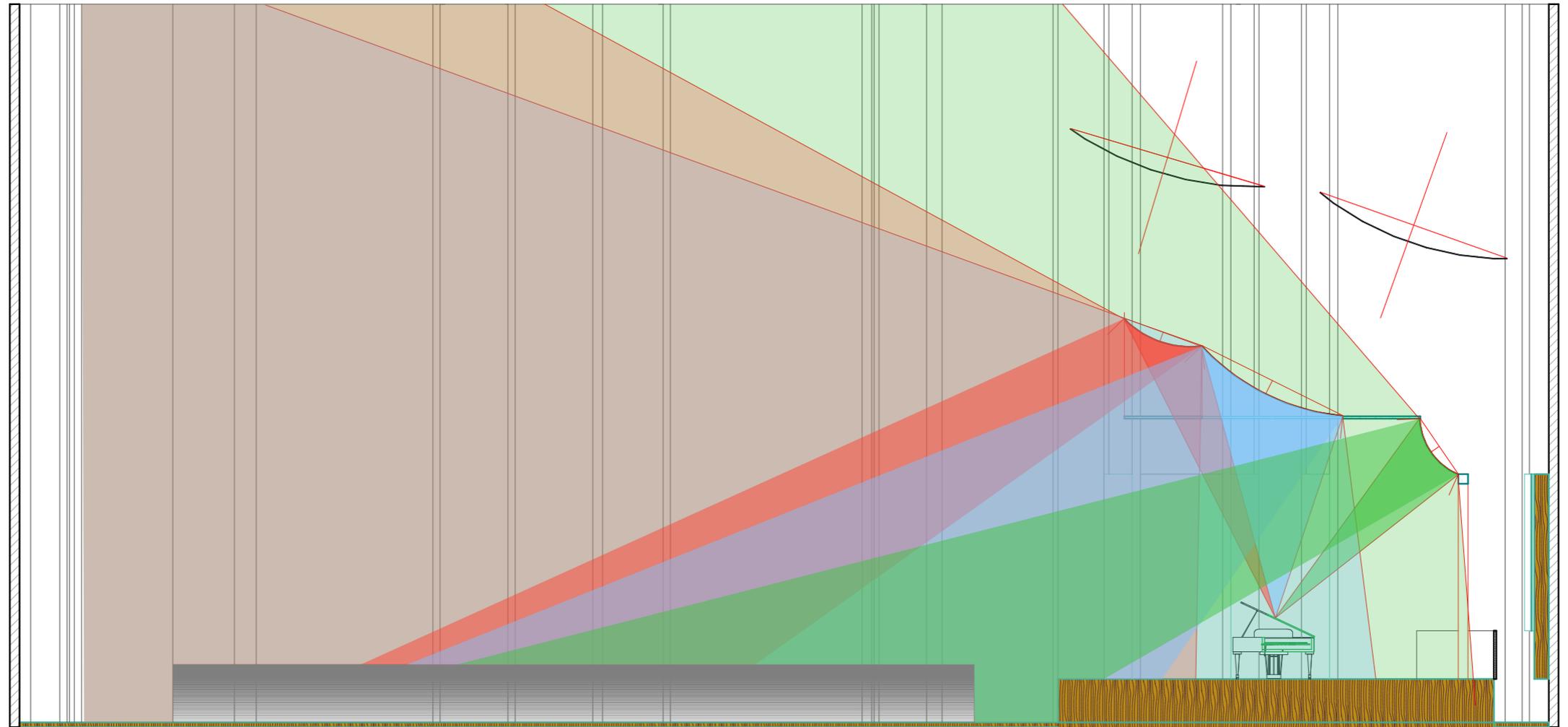


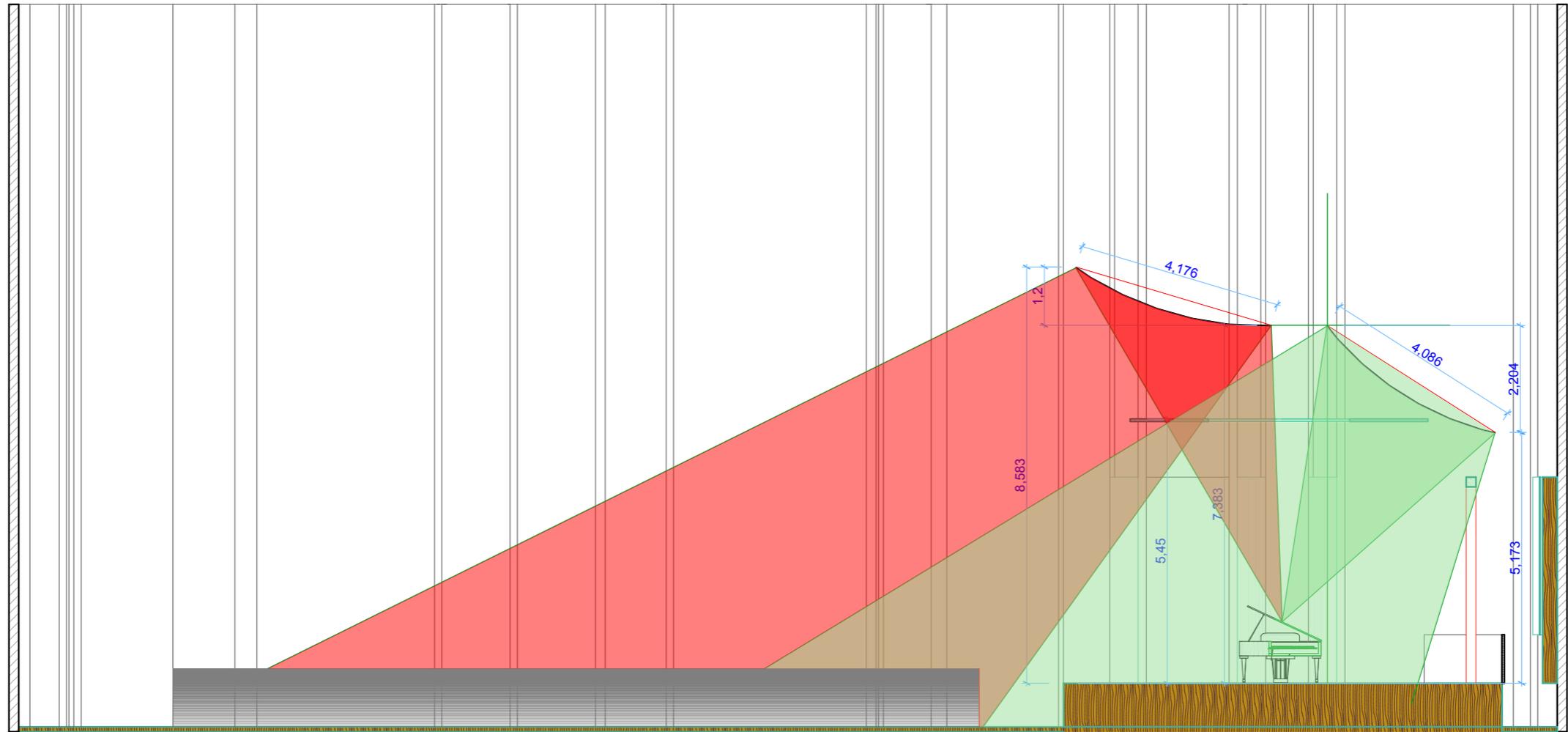


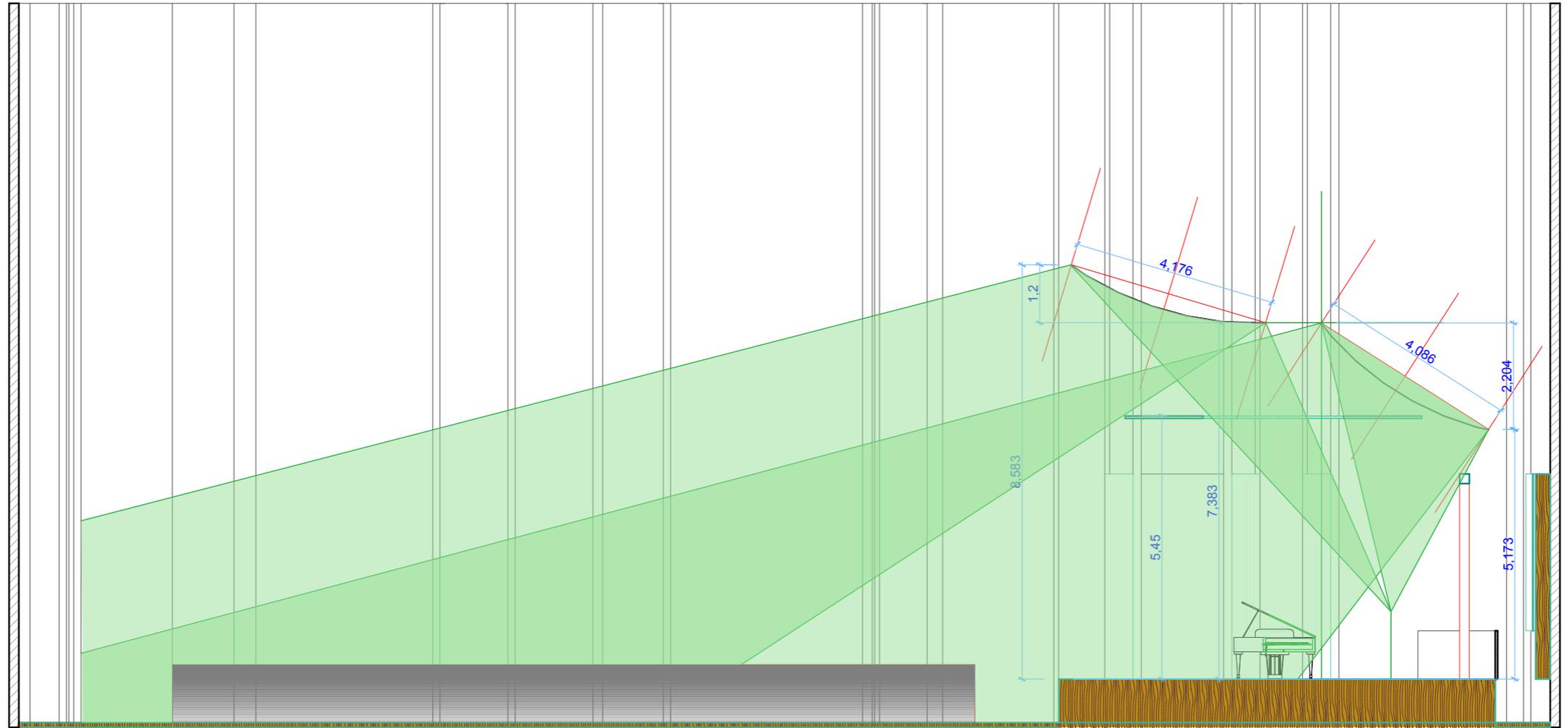






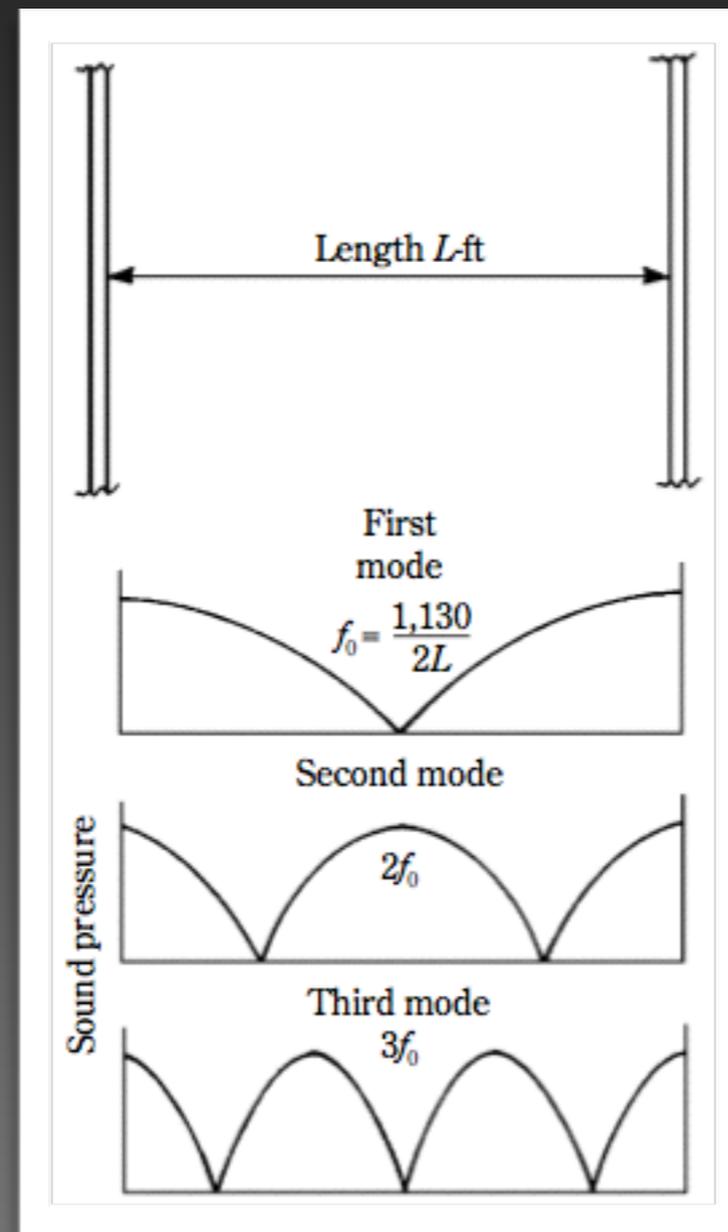






	Pannello frontale		Pannello sul retro	
	Cima	Fondo	Cima	Fondo
<b>Percorso [m]</b> vecchia posizione	10.2	14	15.3	13.7
<b>ITDG [ms]</b> vecchia posizione	30	38	45	40
<b>Percorso [m]</b> nuova posizione	6	9.5	9.1	7.7
<b>ITDG [ms]</b> nuova posizione	17.5	27	26	22.5

# Risonanze modali e onde stazionarie



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

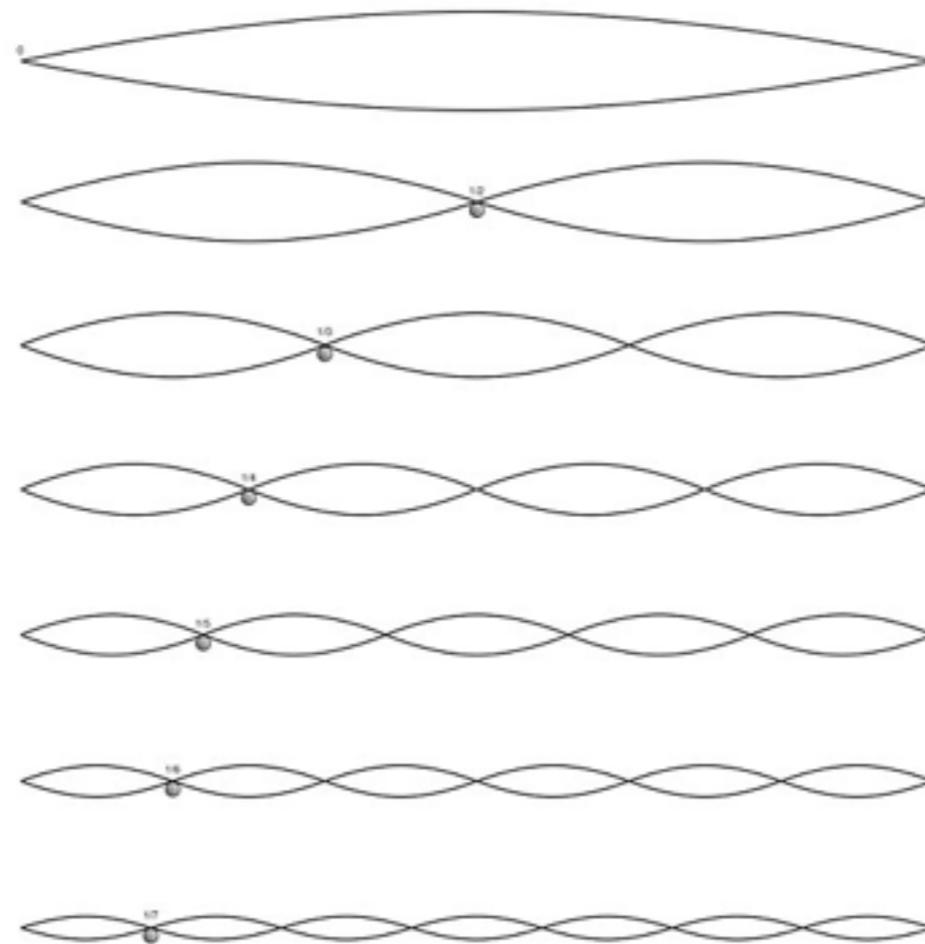
Le onde stazionarie sono il risultato dell'interferenza tra onde progressive e regressive sinusoidali, aventi la stessa frequenza.

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



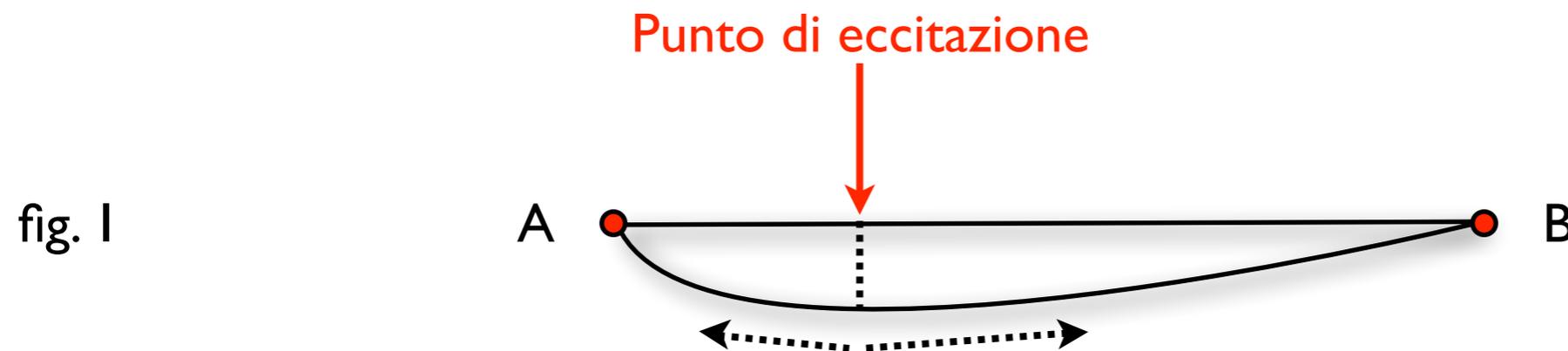
Un esempio di onda stazionaria è la corda di una chitarra.

Per rendere meglio l'idea, proviamo ad immaginare una vasca piena d'acqua, dove un'onda incidente riflette contro la superficie verticale provocando un'onda riflessa: questa non si può distinguere da quella incidente perché sono sovrapposte ed hanno i nodi in comune.



# Le onde stazionarie nell'acustica

Se esaminiamo col rallentatore il comportamento di una corda elastica sollecitata da un movimento vibratorio, possiamo vedere che dal punto in cui ha agito la forza esterna (il martelletto del pianoforte, l'azione dell'archetto sulla corda del violino, il pizzico sulla corda dell'arpa, etc.), la vibrazione si propaga lungo la corda in due direzioni opposte.



Poichè la distanza che le due onde devono percorrere è solitamente diversa, avviene che quella che procede verso A raggiungerà per prima il punto terminale, dove si *rifletterà* invertendo sia il percorso sia la fase, con la cresta cioè rivolta in senso contrario a quello di partenza: nel frattempo l'altra onda avrà percorso un po' del suo cammino.

E' chiaro quindi che ad un certo istante si avrà la situazione riportata in fig. 2, alla quale seguirà quella di fig. 3 e così via, con ripetute riflessioni e ripetuti incontri fra le due onde, ma con ampiezza di movimento sempre decrescente.



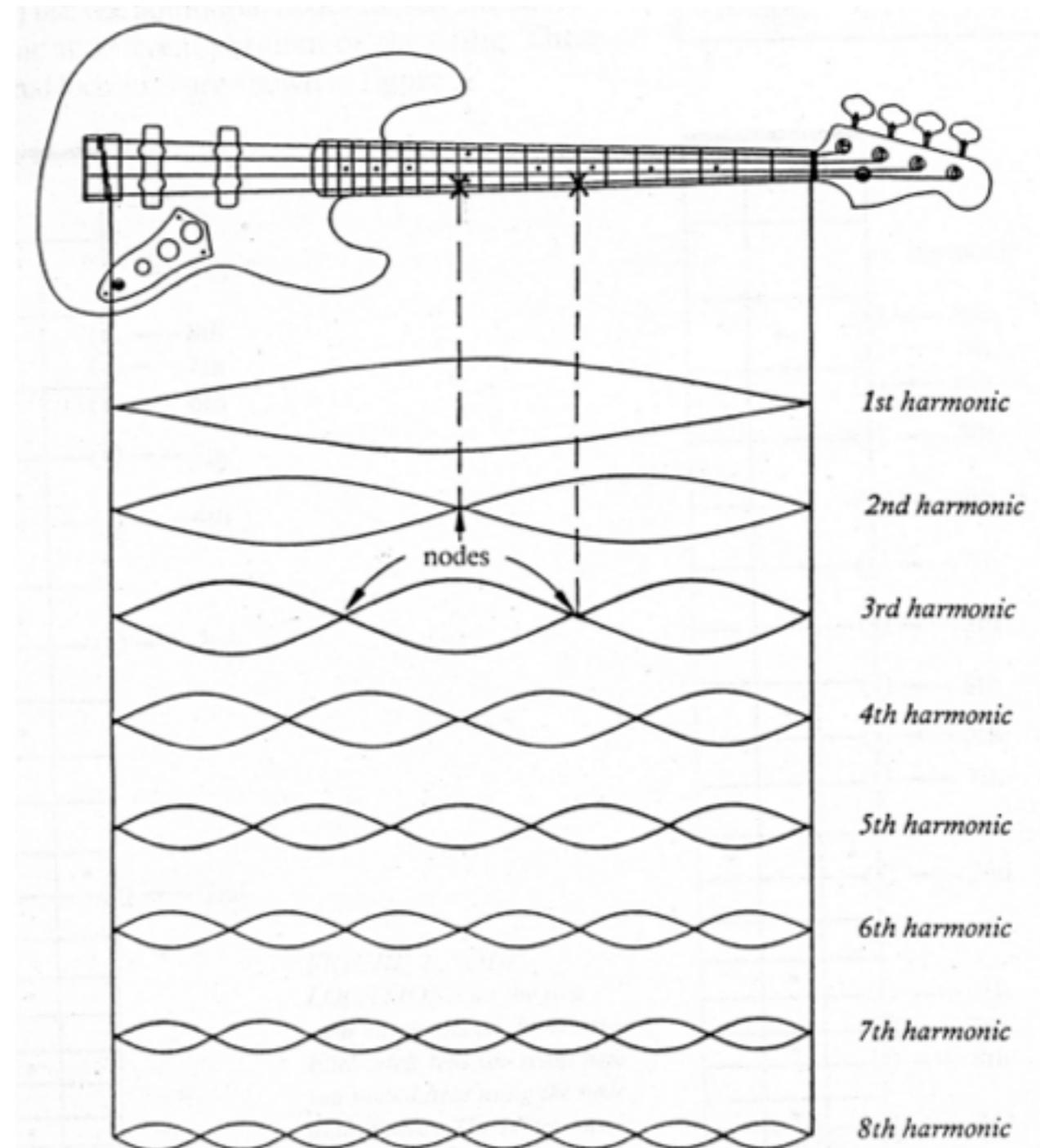
# Caso di uno strumento a corde

Cosa sono questi armonici e perché si riescono a formare soltanto in alcune determinate parti del manico?

Ogni corpo che vibra o che si muove produce compressioni e rarefazioni nell'aria nelle immediate vicinanze.

Queste compressioni e rarefazioni si propagano nell'aria come onde sonore, in modo analogo a come si propagano le onde prodotte da un sasso che cade in uno specchio d'acqua. Le onde sonore sono direttamente associate alle vibrazioni del corpo e ne rispecchiano le caratteristiche. Nel caso di uno strumento a corda le vibrazioni sono molto facili da studiare, tralasciando per ora tutte le complicazioni legate ad eventuali casse o tavole risonanti accoppiate alle corde stesse.

La corda vibrante produce delle vibrazioni a seconda dei suoi modi di oscillazione. Tutte le onde prodotte sono di tipo stazionario (dato che la corda è fissata agli estremi). Studiamo dunque i modi di oscillazione della corda:



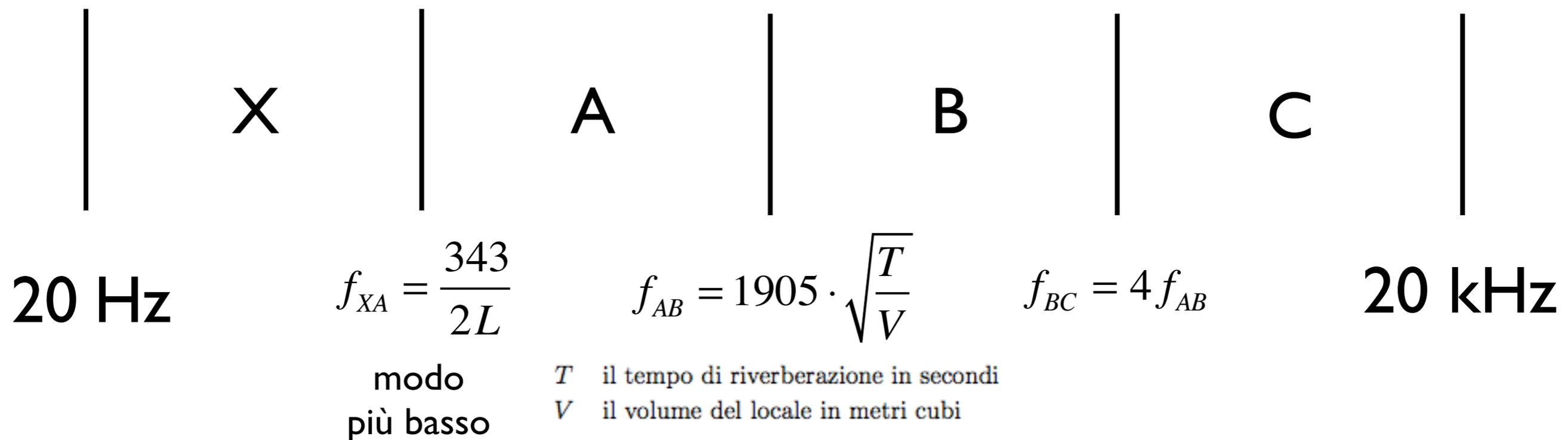
# Divisione spettro udibile

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... $n$

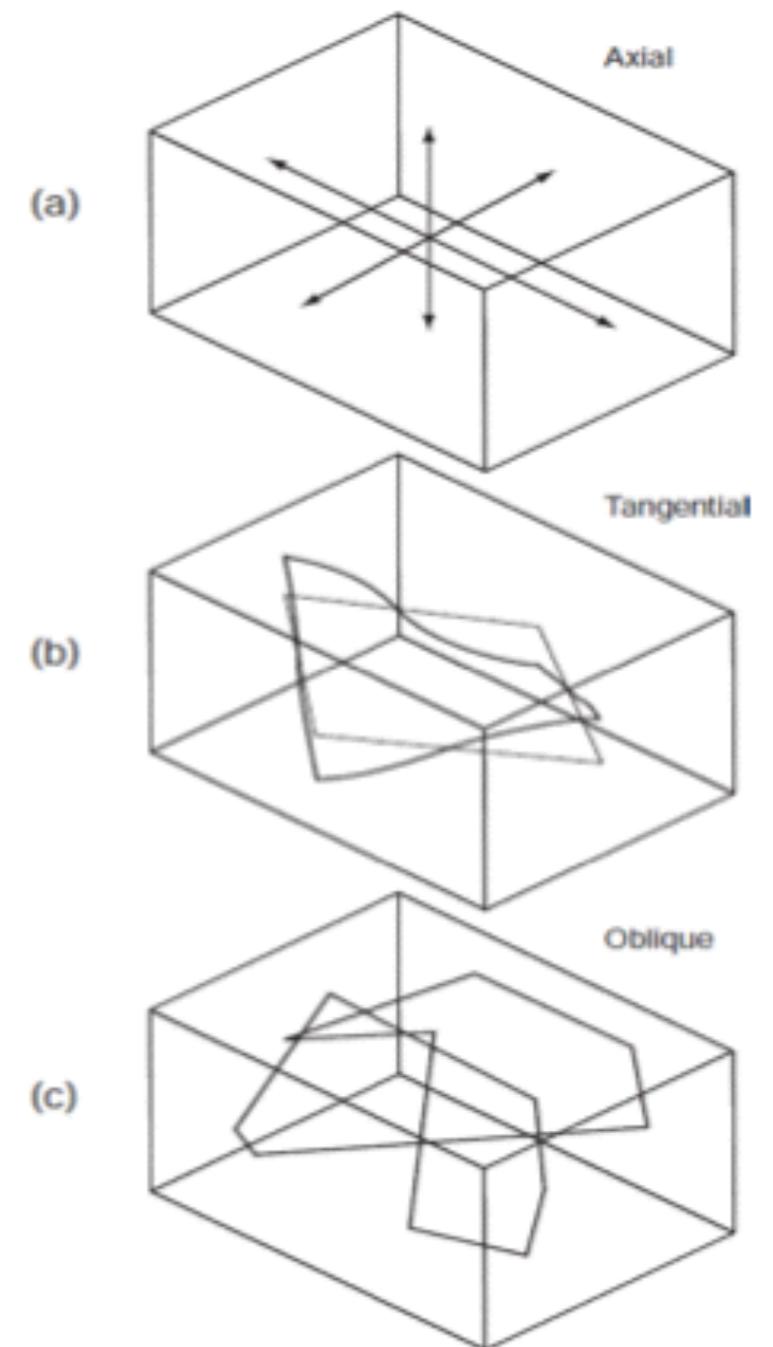
# Analisi Modale

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^3]

Proporzioni 1:1.29:1.54

Indici Modali da valutare: 0..4

=====> Modi : 125

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

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

# Plot del numero dei modi nelle diverse bande di frequenza

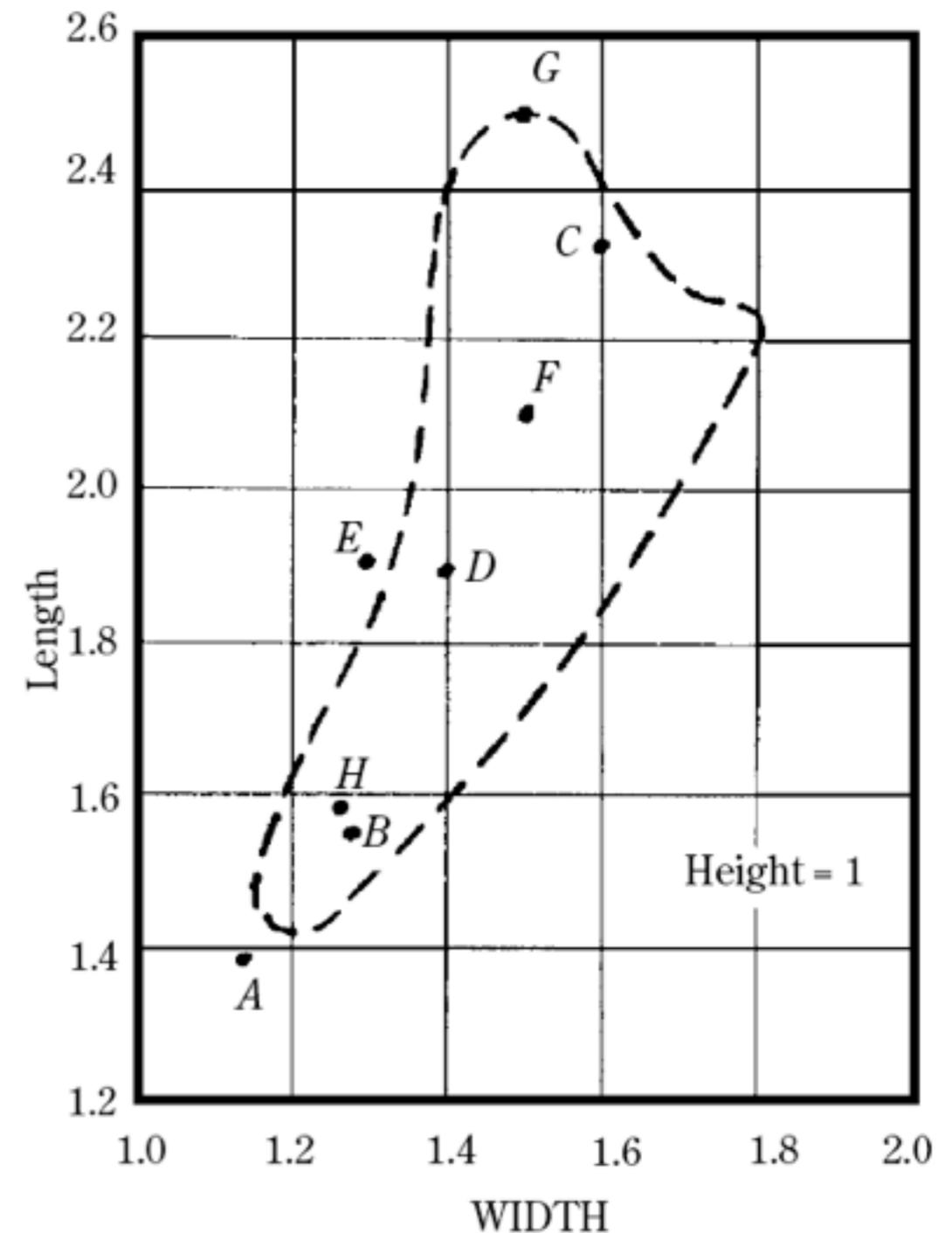
Lo step successivo è quello di studiare le dimensioni degli ambienti sulla base della distribuzione modale e quindi trovare le proporzioni migliori e degli standards

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

# Proporzioni per locali rettangolari

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

Area di Bolt



# Modi per locali non rettangolari

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

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

# Bibliografia e testi di riferimento

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

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

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

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

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

David Egan: "Architectural Acoustics";

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

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

Yoichi Ando: "Architectural Acoustics";

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

Marshall Long: "Architectural Acoustics";

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

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