

PARTE I

IL SUONO E LE SUE INTERAZIONI CON LA MATERIA

In partnership with



LEZIONE 1.1

IL FENOMENO SONORO

In partnership with



IL FENOMENO SONORO



1
Sorgente



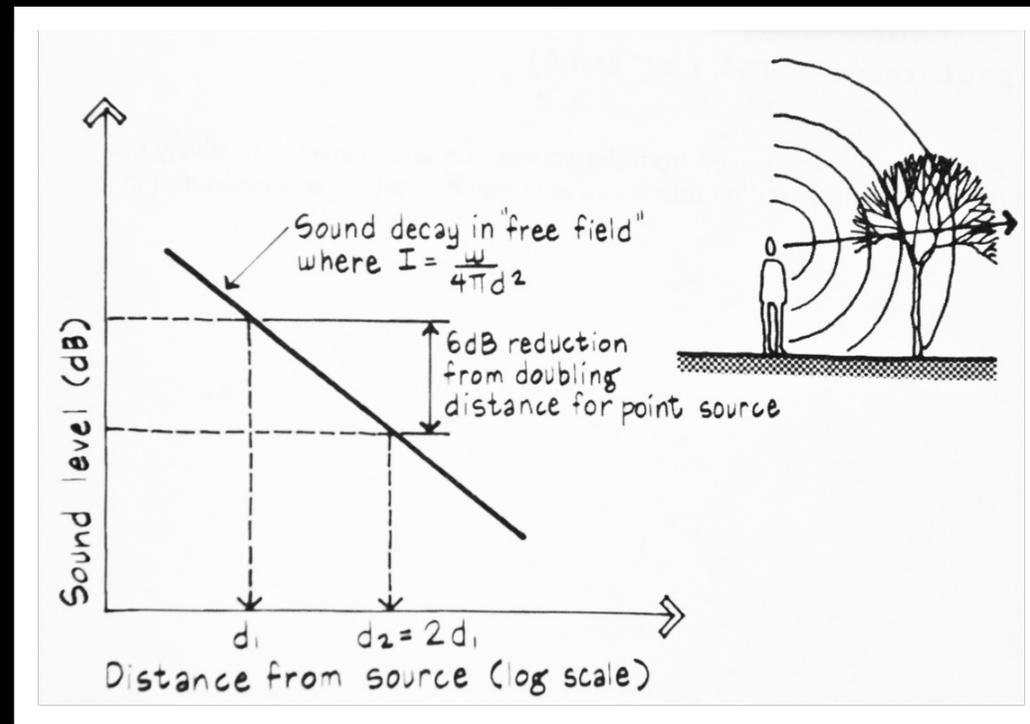
2
Mezzo
(zona di trasmissione)



3
Ricettore

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

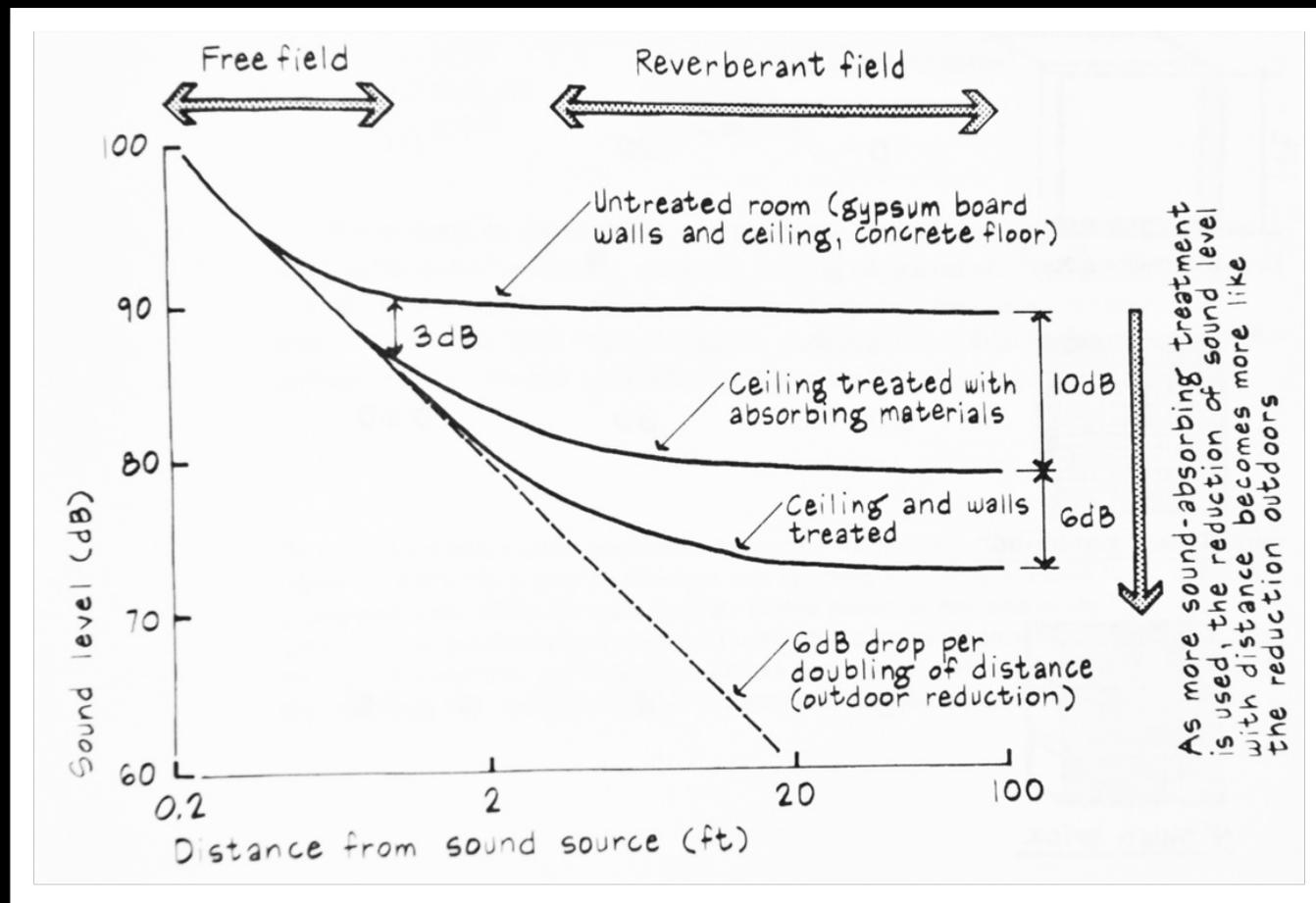
Sorgente Generica $L_p \cong L_w - 10 \log \frac{400}{\rho c} - 10 \log S$

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

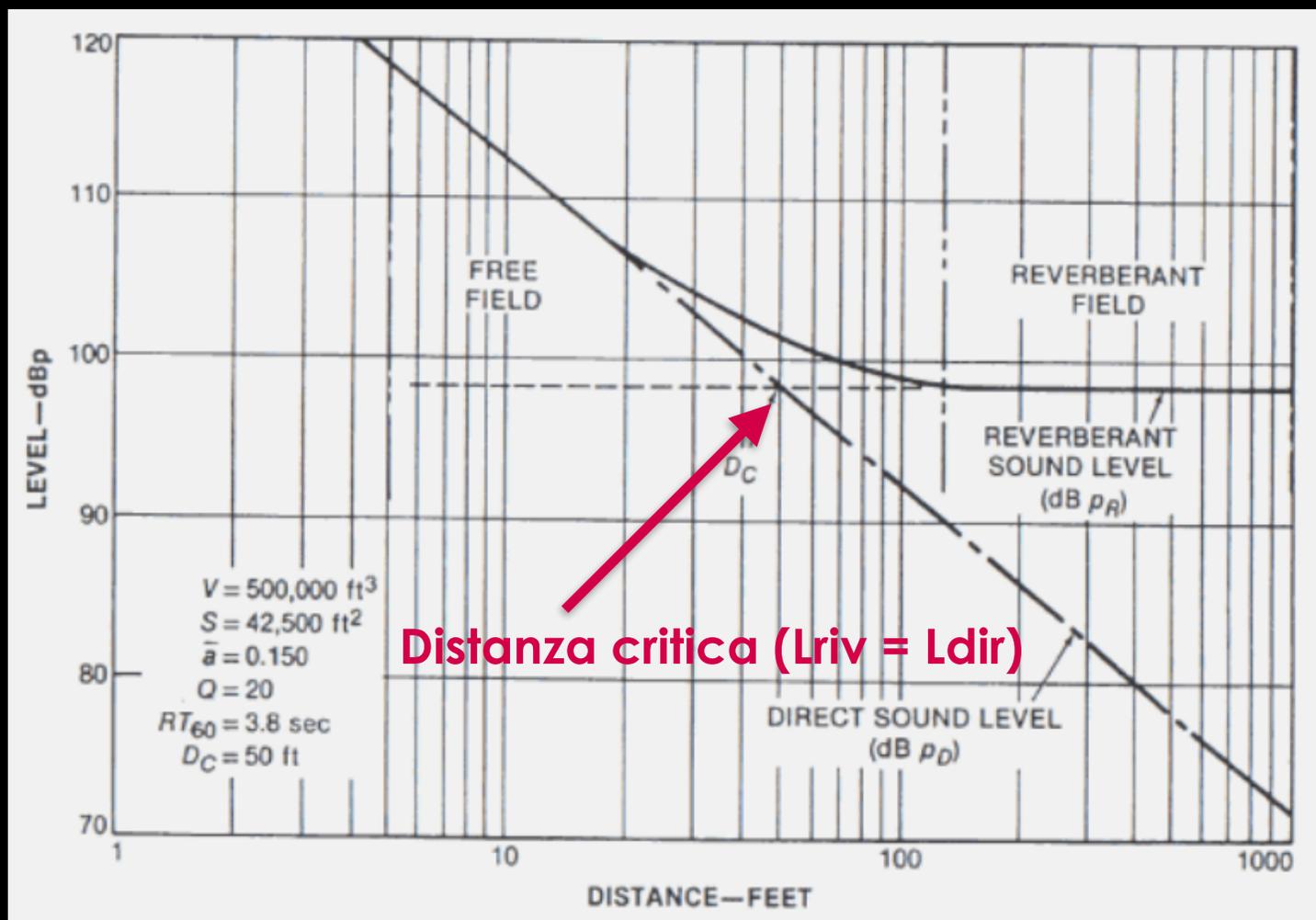
(con approssimazione di campo lontano, ossia:)

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

ATTENUAZIONE DEL SUONO CON LA DISTANZA IN UN AMBIENTE CHIUSO



ATTENUAZIONE DEL SUONO CON LA DISTANZA IN UN AMBIENTE CHIUSO



Tra la regione di campo libero e la regione di campo riverberante, si trova una regione intermedia detta di campo semi-riverberante, nella quale non sono trascurabili né il contributo dovuto al suono diretto (livello diretto), né il contributo dovuto al suono riverberante (livello suono riflesso).

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)

LIVELLI SONORI AMBIENTE CHIUSO

Ambiente chiuso

Campo libero

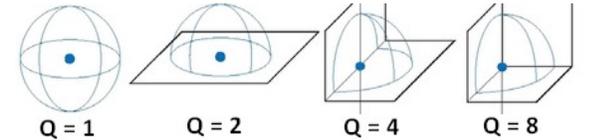
$$L_{dir} = L_w + 10 \log \frac{Q}{4\pi r^2}$$

Campo riverberante

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

Campo semiriverberante

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



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

dove

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

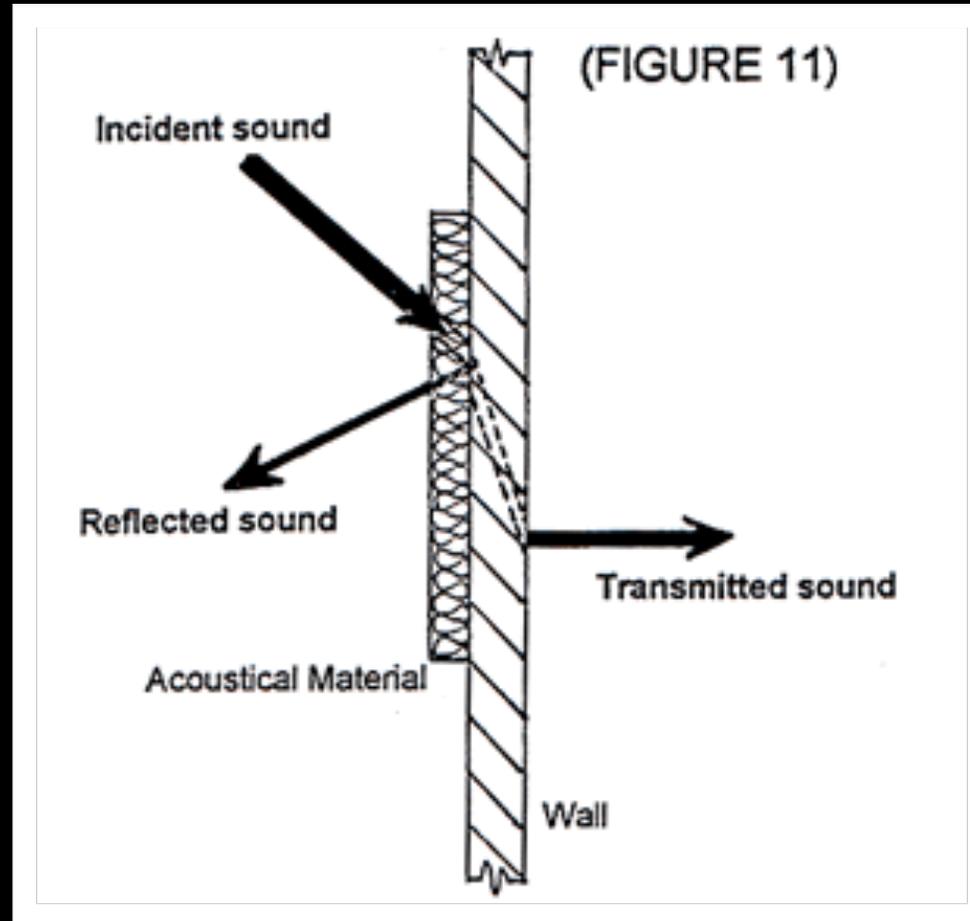
**Se l'ambiente chiuso è
riverberante, il livello di
pressione sonora è
(con buona approssimazione)
lo stesso in tutti i punti.
(L_p non dipende da r)**

LEZIONE 1.2
PROPRIETA' DEI MATERIALI:
Assorbimento, Riflessione e Diffrazione

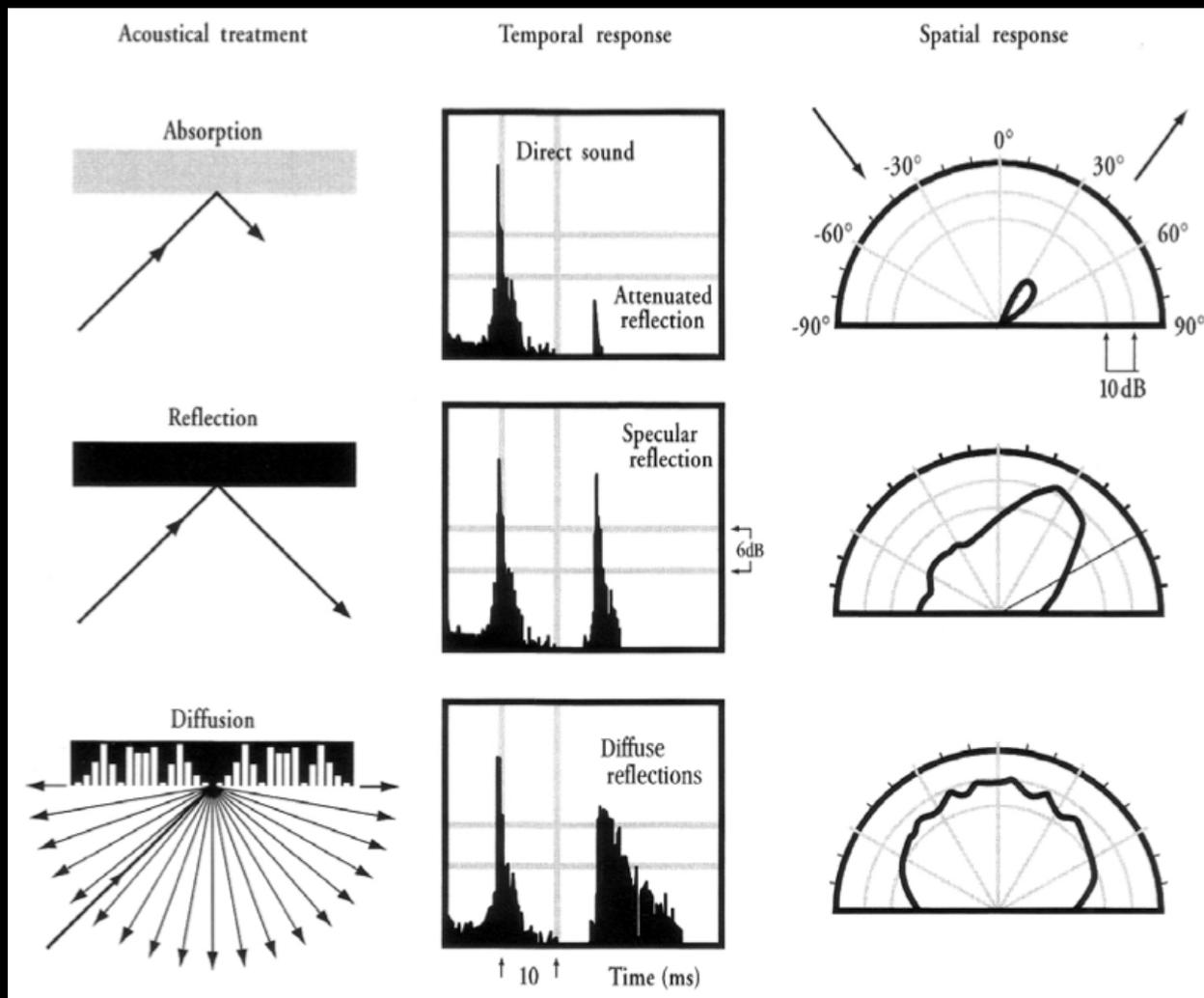
In partnership with



PROPRIETÀ DEI MATERIALI: assorbimento, riflessione e diffusione



SUONO IN UNA STANZA



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

SUONO IN UNA STANZA

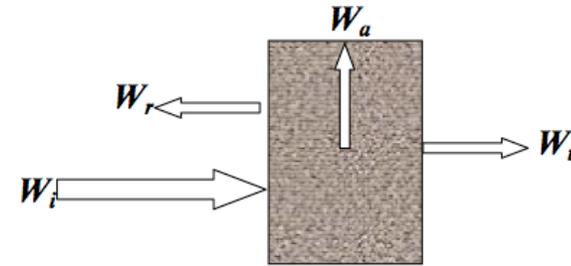
In un ambiente chiuso la porzione di energia riflessa dalle superfici di confine dipende dal loro comportamento acustico, in generale descritto dai coefficienti di riflessione, assorbimento e trasmissione:

Bilancio energetico per il teorema della conservazione dell'energia:

Definisco i coefficienti come rapporti tra energie:

Relazione tra i coefficienti:

Definizione di coefficiente di assorbimento acustico apparente:



$$W_i = W_r + W_a + W_t$$

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

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

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

LEZIONE 1.3

ASSORBIMENTO ACUSTICO PER POROSITA'

In partnership with



ASSORBIMENTO ACUSTICO

Assorbimento acustico
di una superficie:

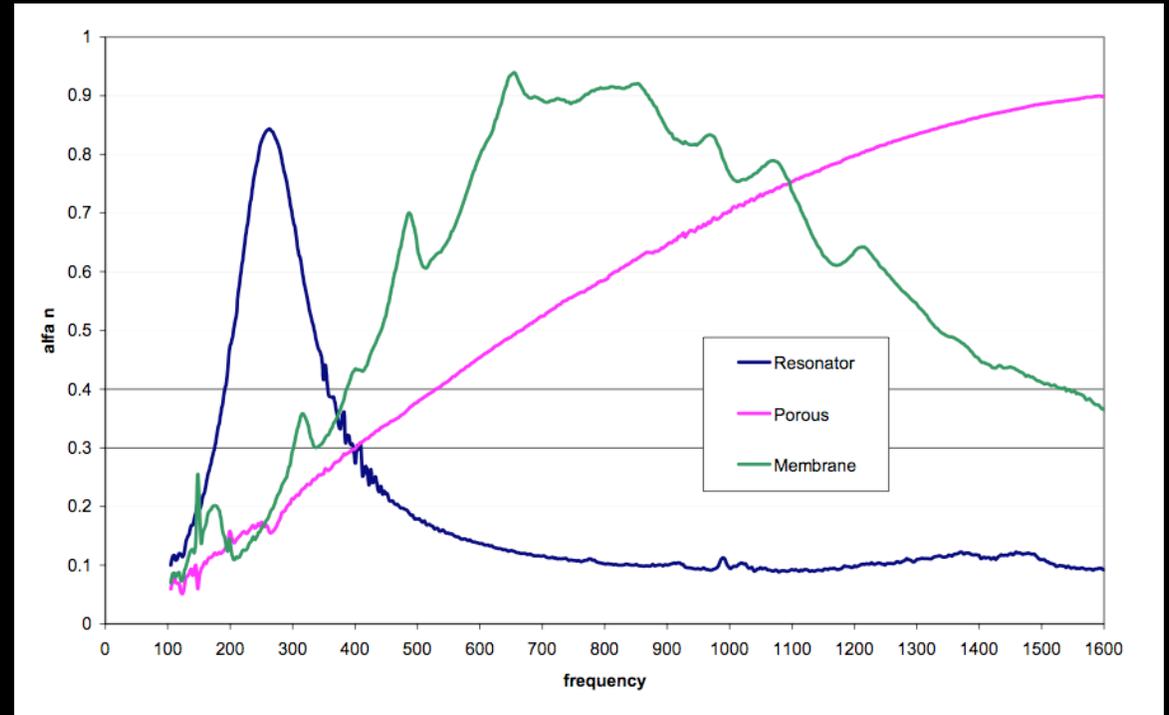
$$A = S \cdot \alpha \quad [\text{m}^2]$$

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



MATERIALI ASSORBENTI PER POROSITÀ

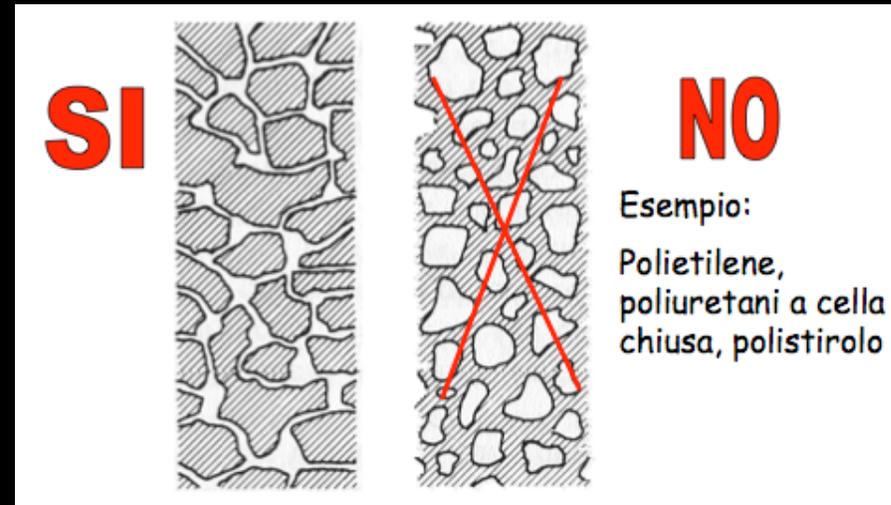
Assorbono l'energia sonora per un fenomeno di tipo dissipativo legato all'attrito viscoso che si genera tra struttura del materiale e particelle d'aria in moto

- 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:

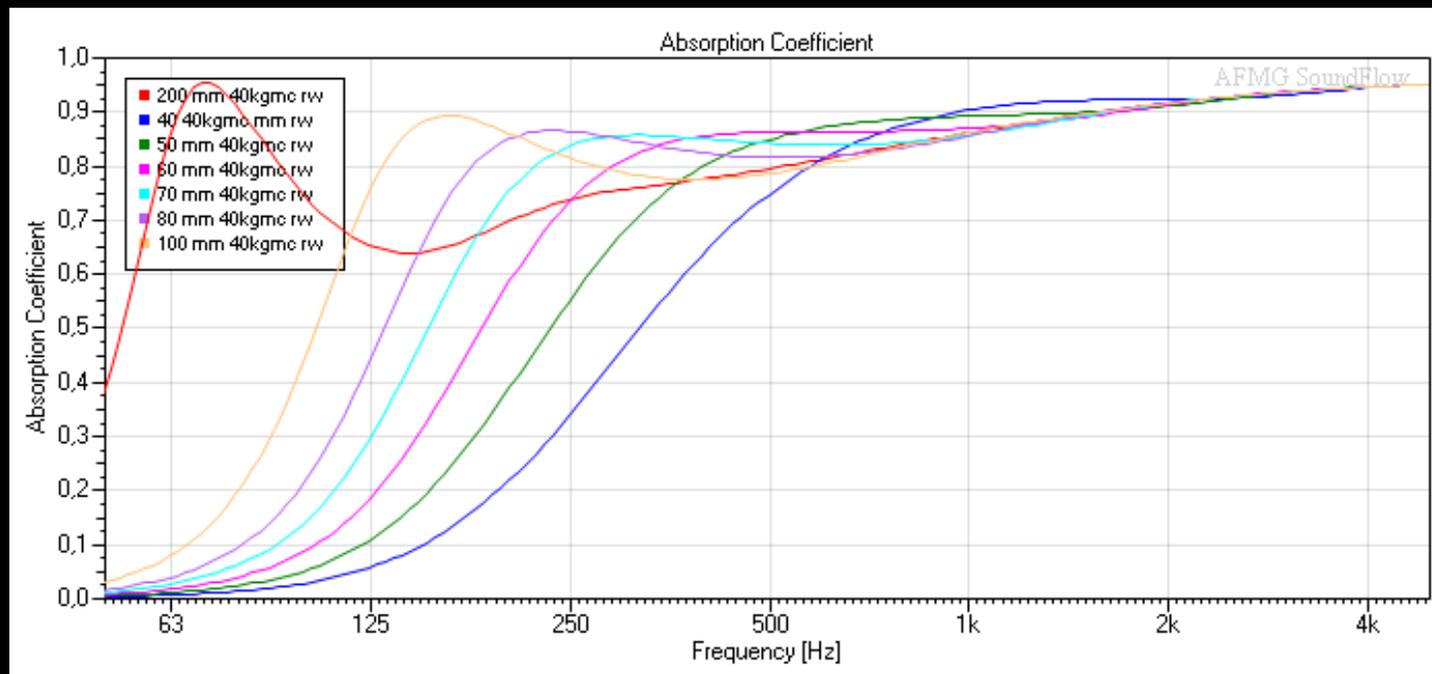
- contengono un'elevata percentuale di aria al loro interno, in collegamento con l'ambiente esterno
- consentono al campo acustico di penetrare al loro interno e di dissipare energia per attrito viscoso sulle pareti della struttura del materiale



EFFETTO DELLO SPESSORE NELL'ASSORBIMENTO

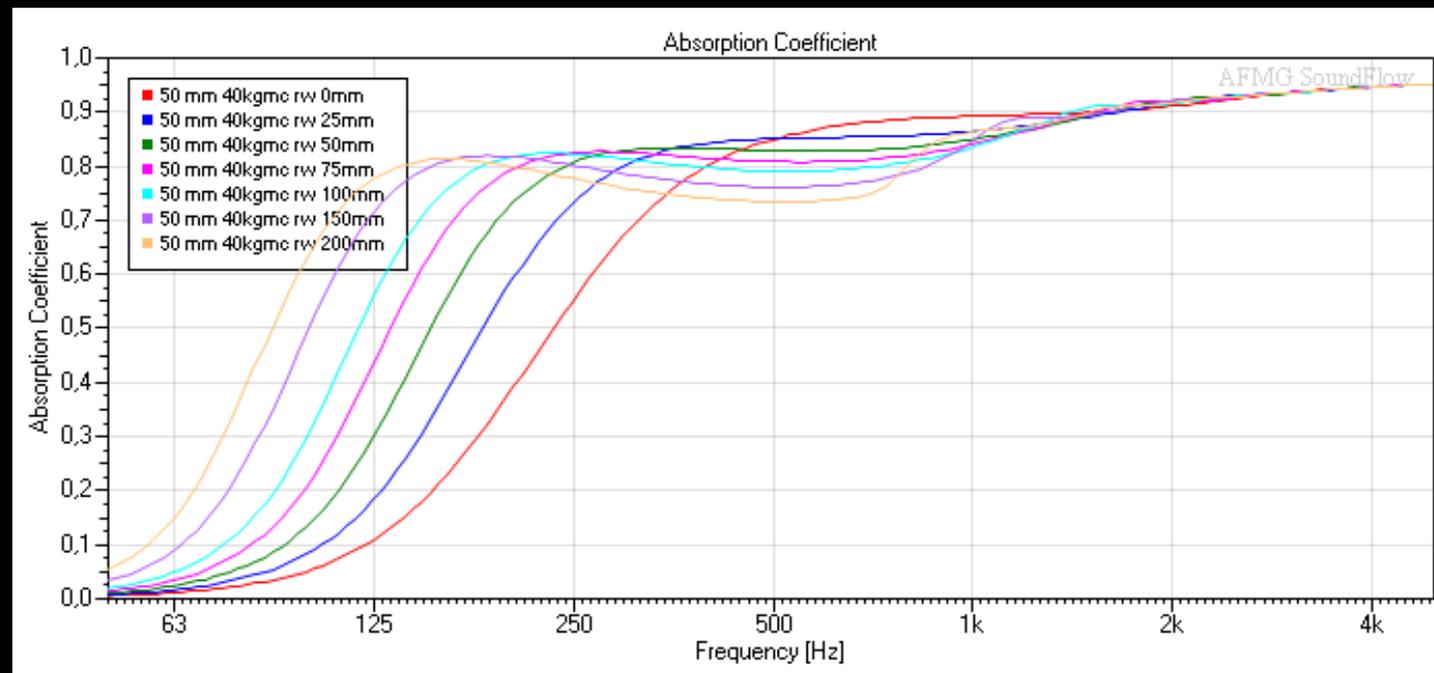
Lo spessore del materiale fonoassorbente aumenta le prestazioni di fonoassorbenza in particolar modo alle basse frequenze.

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



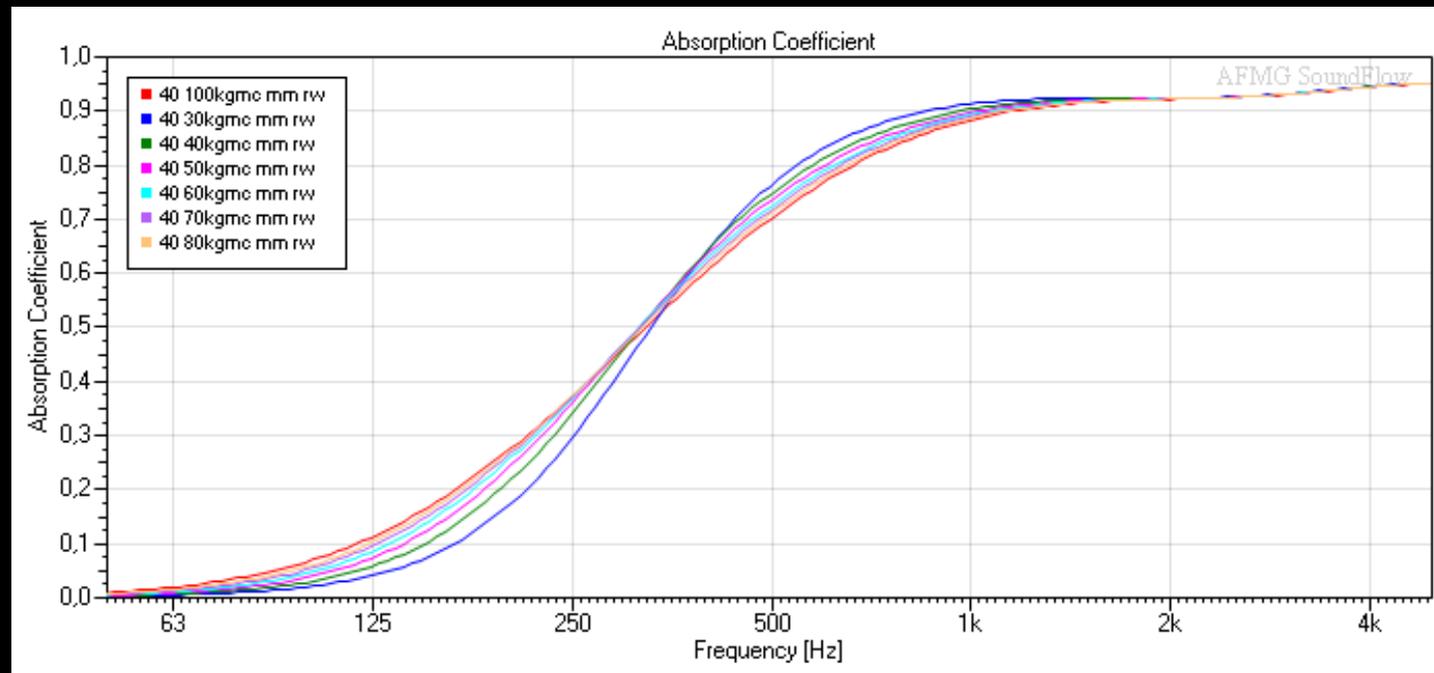
EFFETTO DELLA CAMERA D'ARIA NELL'ASSORBIMENTO

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).



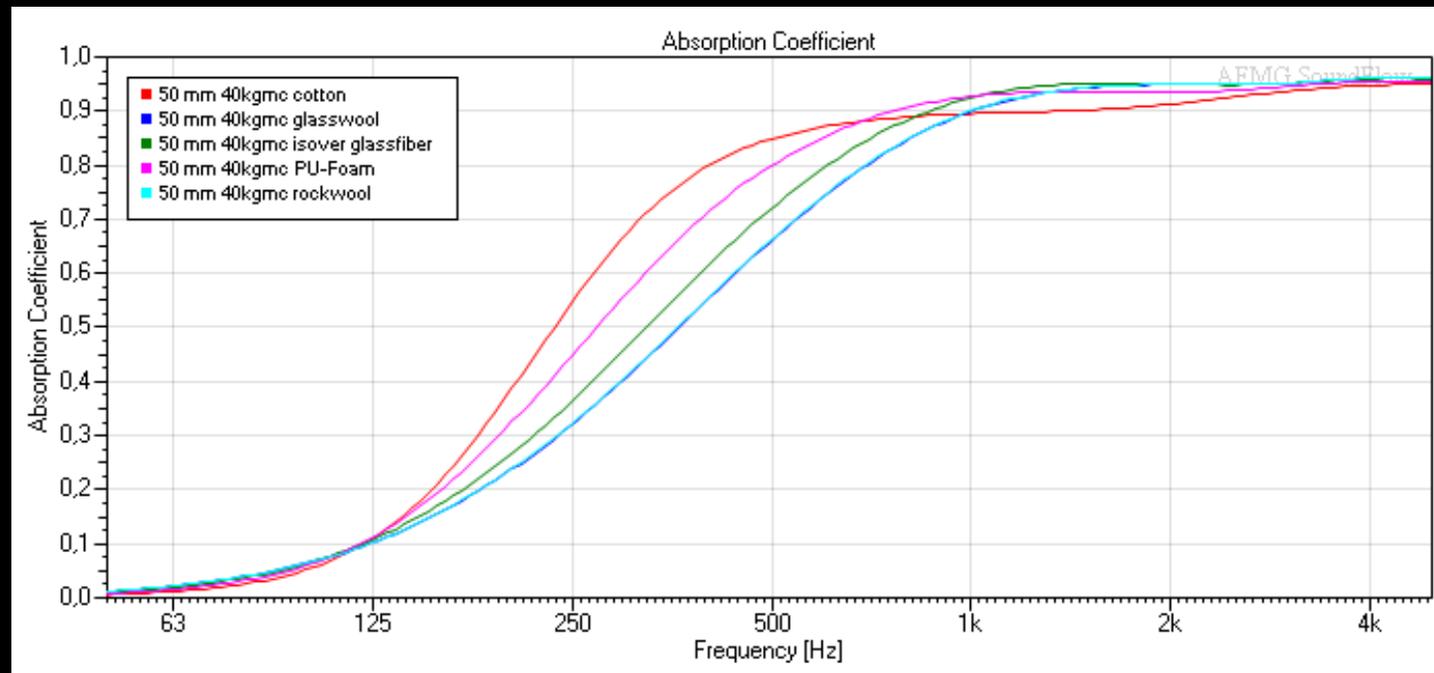
EFFETTO DELLA DENSITÀ NELL'ASSORBIMENTO

La densità influisce poco nell'assorbimento: conviene (economicamente) molto di più utilizzare materiali leggeri (max 40 kg/m³) magari più spessi o montati su camera d'aria.

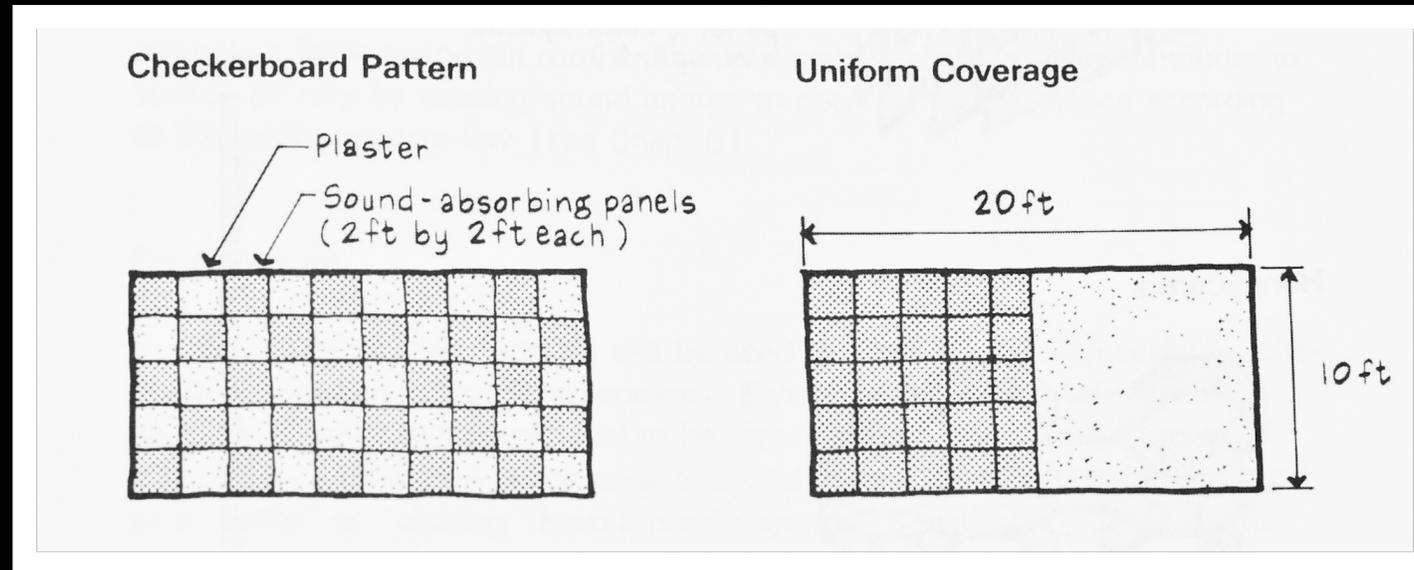


DIVERSI MATERIALI FIBROSI

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



“AREA EFFECT”

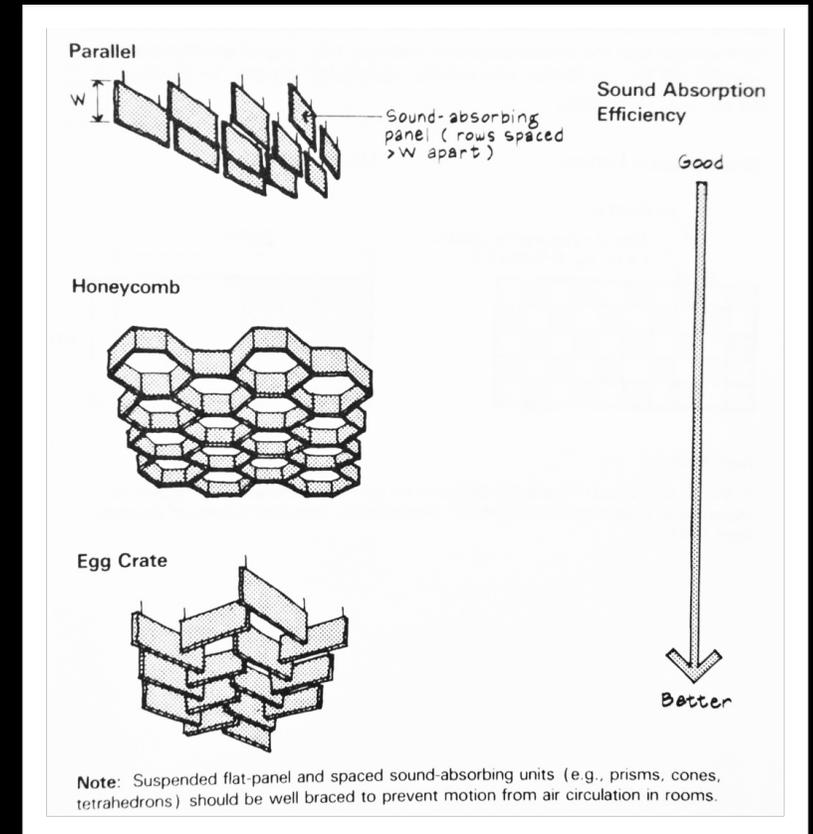
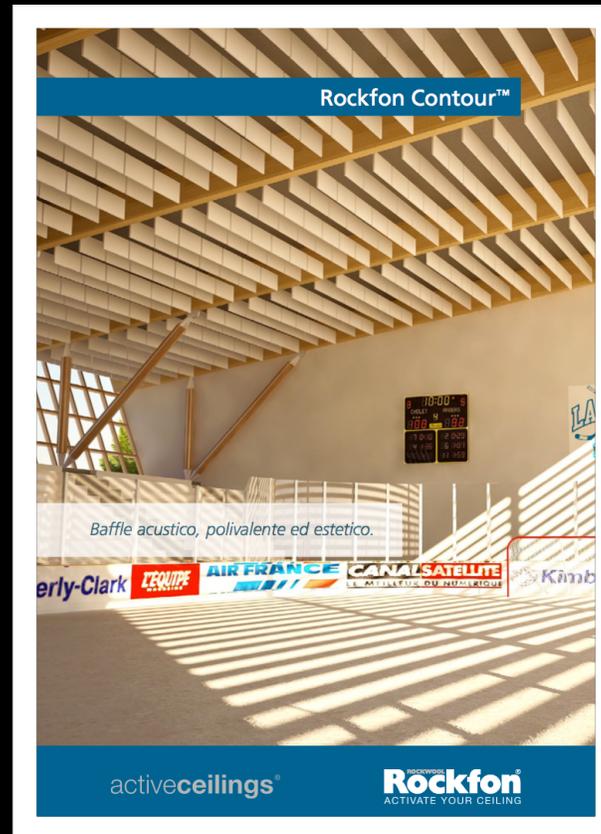


L'efficienza di un materiale fonoassorbente può variare in base alla distribuzione e posizionamento in una stanza. Per esempio 25 pannelli assorbenti assorbiranno più energia sonora se posizionati a scacchiera piuttosto che in modo uniforme.

Questa variazione è dovuta alla diffrazione dell'energia sonora attorno ai perimetri dei pannelli spazati tra loro e all'assorbimento aggiuntivo dei loro bordi.

DIVERSI MATERIALI FIBROSI

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



LEZIONE 1.4

ASSORBIMENTO ACUSTICO PER RISONANZA

In partnership with



COSA SONO QUESTI ASSORBITORI?

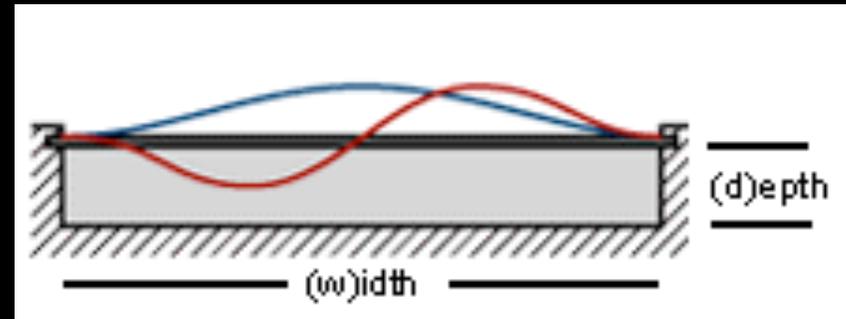
- Il risonatore a membrana, o a pannello, è **una scatola chiusa con uno strato sottile risonante** (una pelle come quella di un tamburo, un elastomero, uno strato più o meno sottile di legno etc.);
- Il risonatore di Helmholtz è **una scatola con un buco.**

ASSORBITORI PER RISONANZA A MEMBRANA

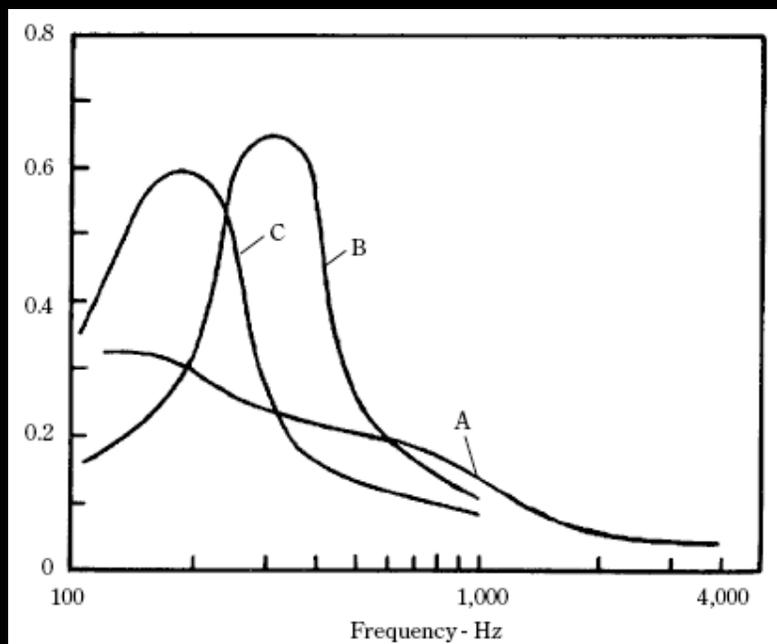
Assorbono l'energia sonora per un fenomeno di tipo dissipativo legato allo smorzamento dell'oscillazione che si genera alla risonanza della massa d'aria parzialmente confinata o di una superficie vibrante sollecitata da onde sonore incidenti su di essa.

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

ρ_A = densità del pannello (kg/m²)
 d = spessore della camera d'aria (cm)



ASSORBITORI A MEMBRANA

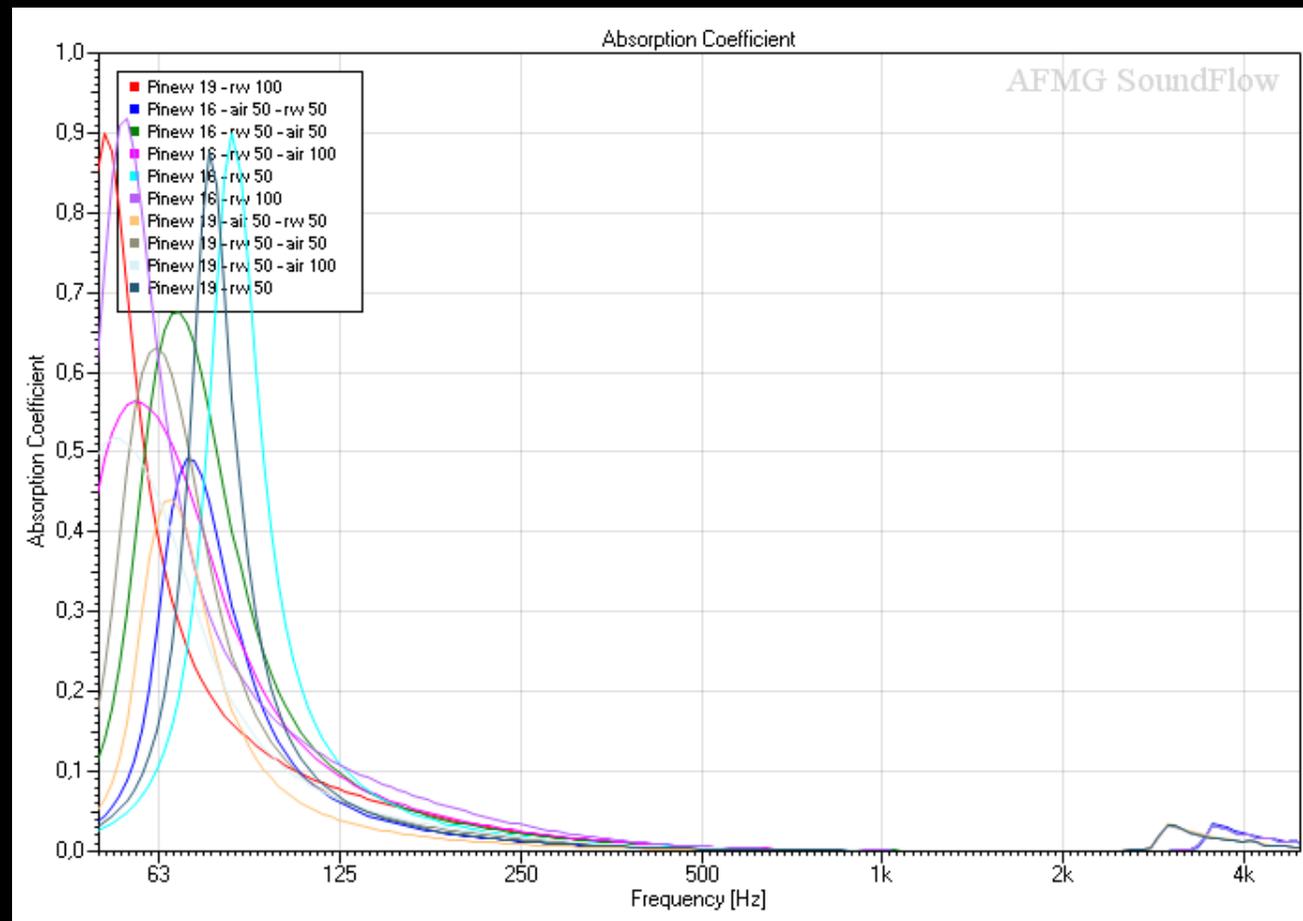


(A) compensato $3/16''$ con $2''$ di aria

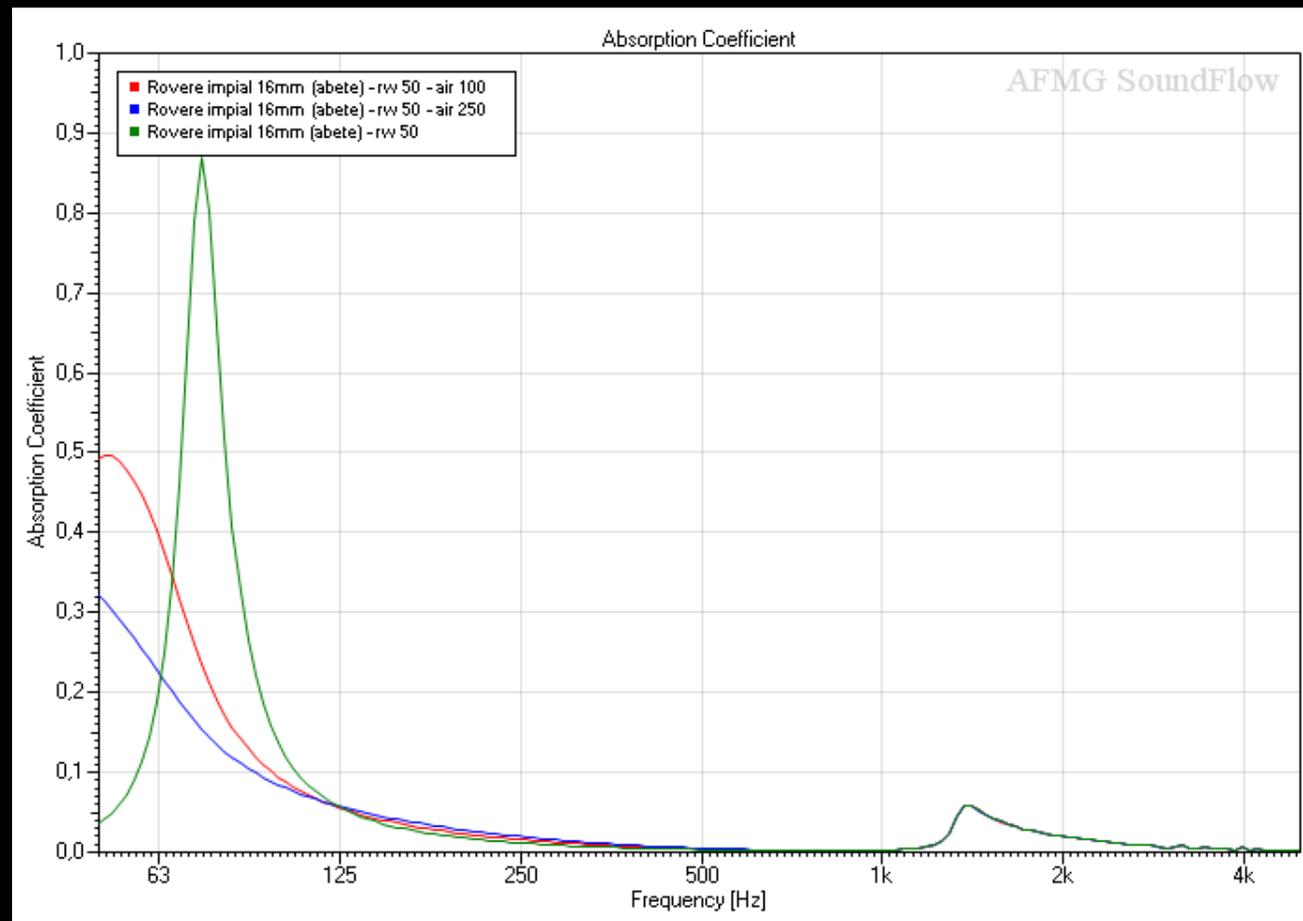
(B) compensato $1/16''$ con $1''$ lana di roccia e $1/4''$ aria

(C) come (B) ma per un pannello di $1/8''$

- 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

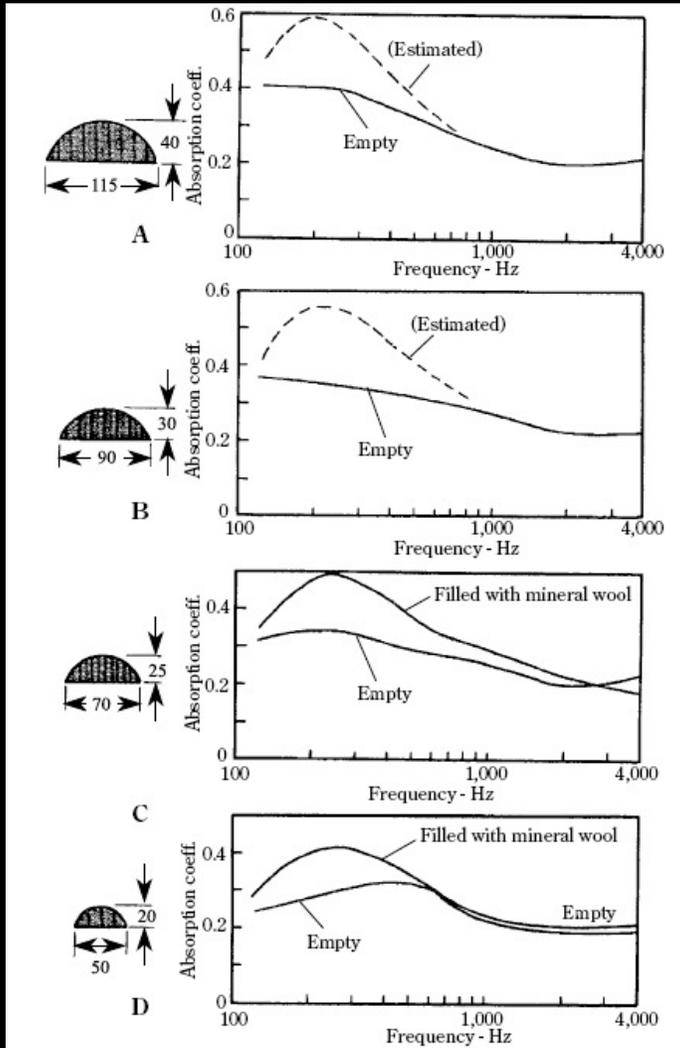


Pannelli risonanti: nella legenda il primo numero indica lo spessore in mm del pannello, la sigla rw indica la lana di roccia e il suo spessore e la sigla air indica la camera d'aria e il suo spessore.



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 polcilindrico 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.







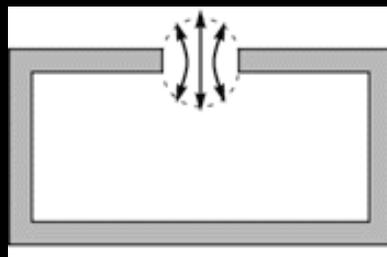


ASSORBITORI PER RISONANZA DI HELMHOLTZ

- **Risonatori di Helmholtz “tradizionali”**
- **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.

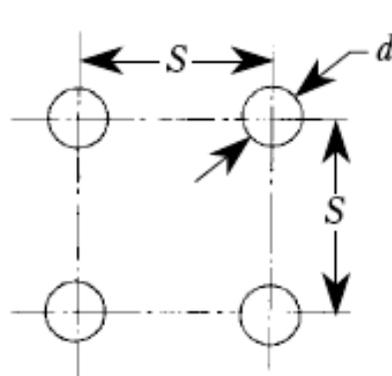
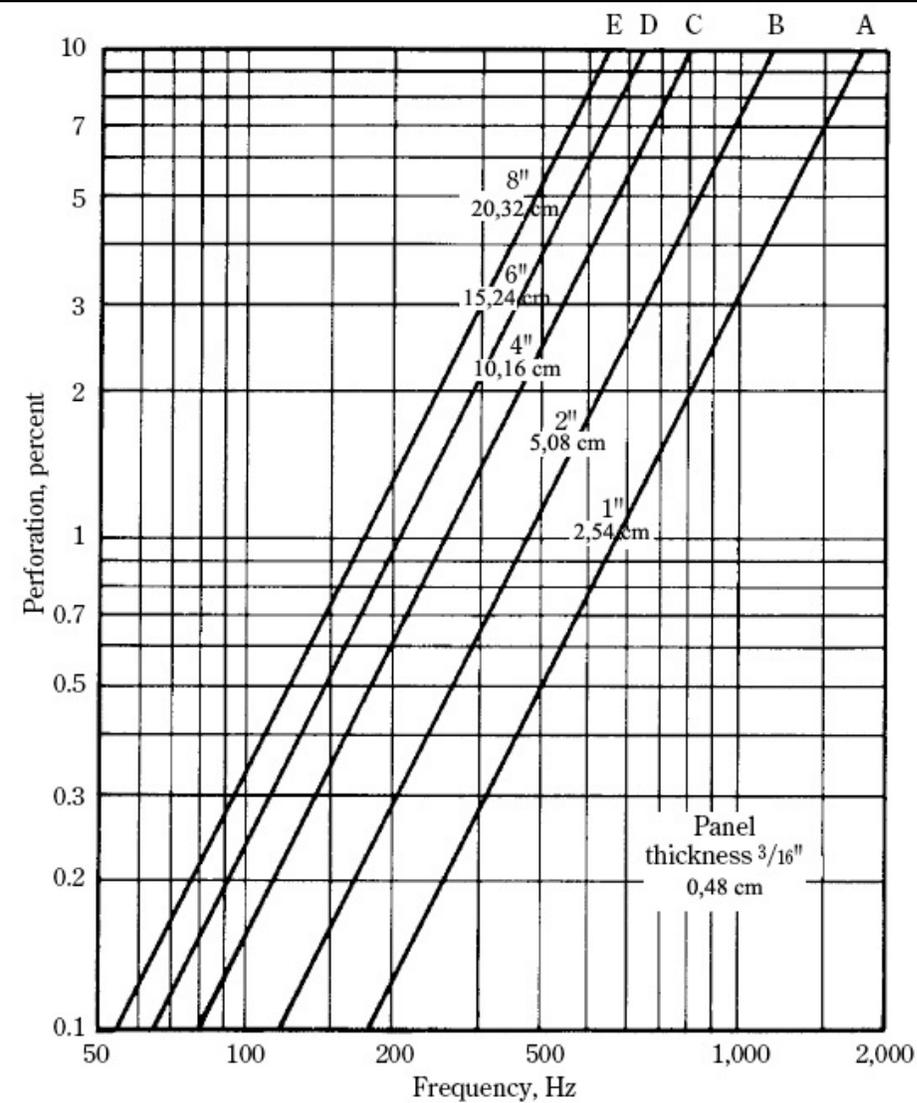
$$f_{Hp} = 508 \sqrt{\frac{P\%}{t \cdot l}}$$

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

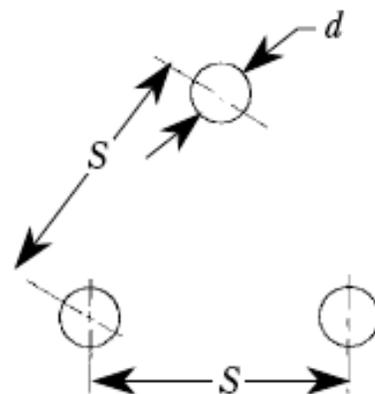
t [cm] = lunghezza effettiva dei buchi, con fattore di correzione applicato (spessore pannello + 0.8 x diametro buco)

l [cm] = profondità della camera d'aria

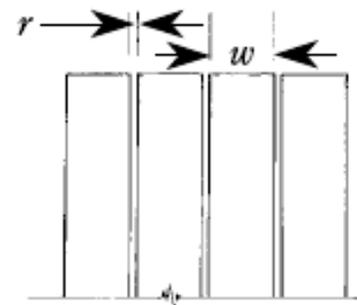
% PERCENTUALE DI PERFORAZIONE



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



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



$$\text{PERF \%} = 100 \left(\frac{r}{w+r} \right)^2$$

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]

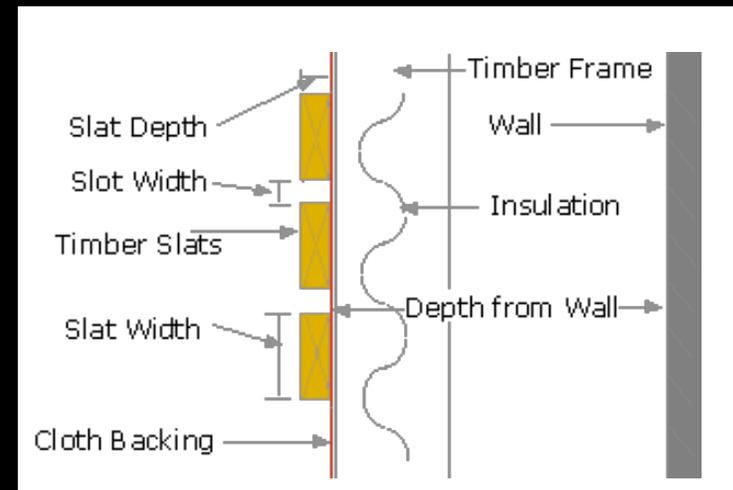
1.2 = mouth correction [cm]

D = cavity depth [cm]

w = slat width [cm]

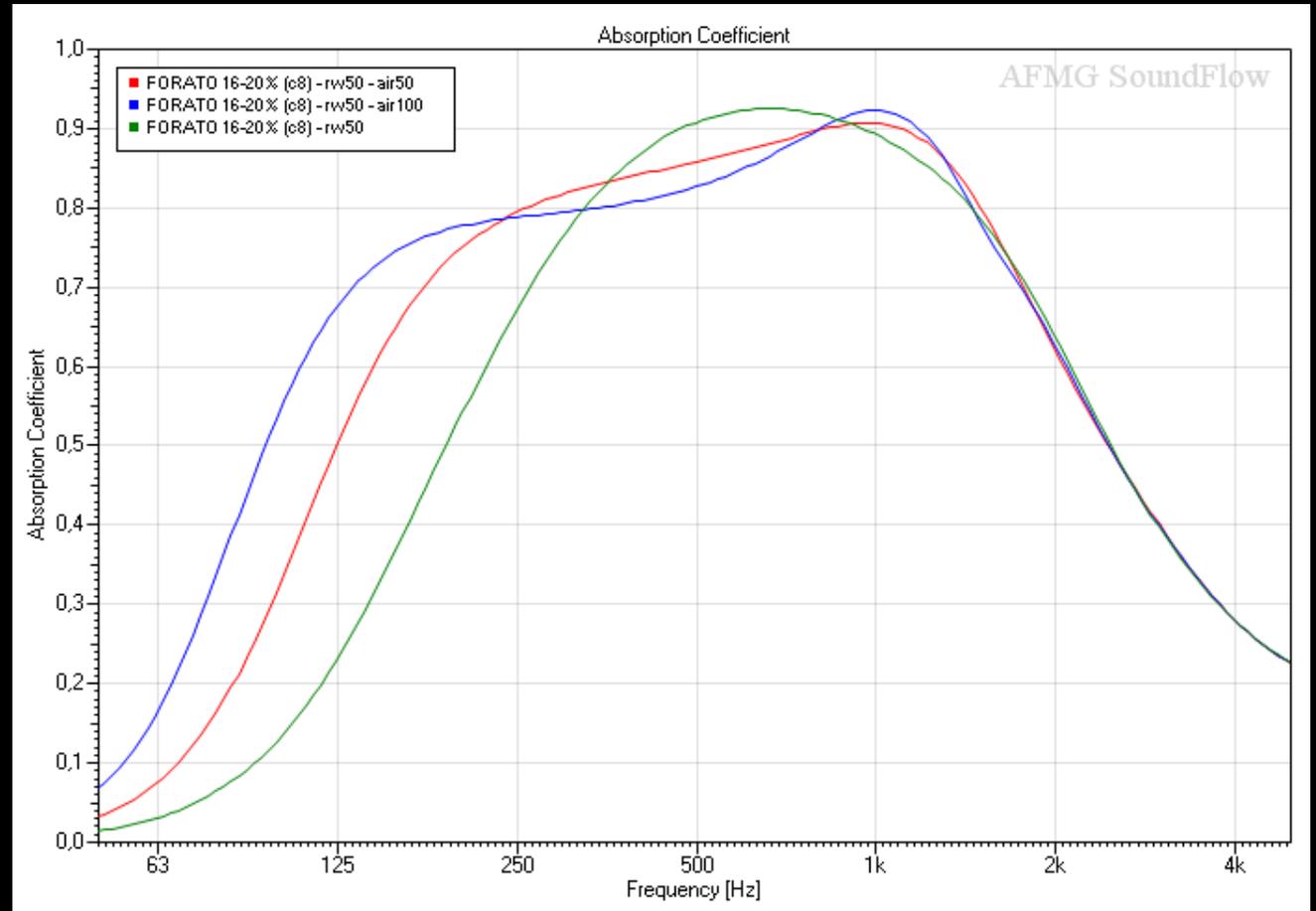
5469 = $c/(2*\pi)$

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



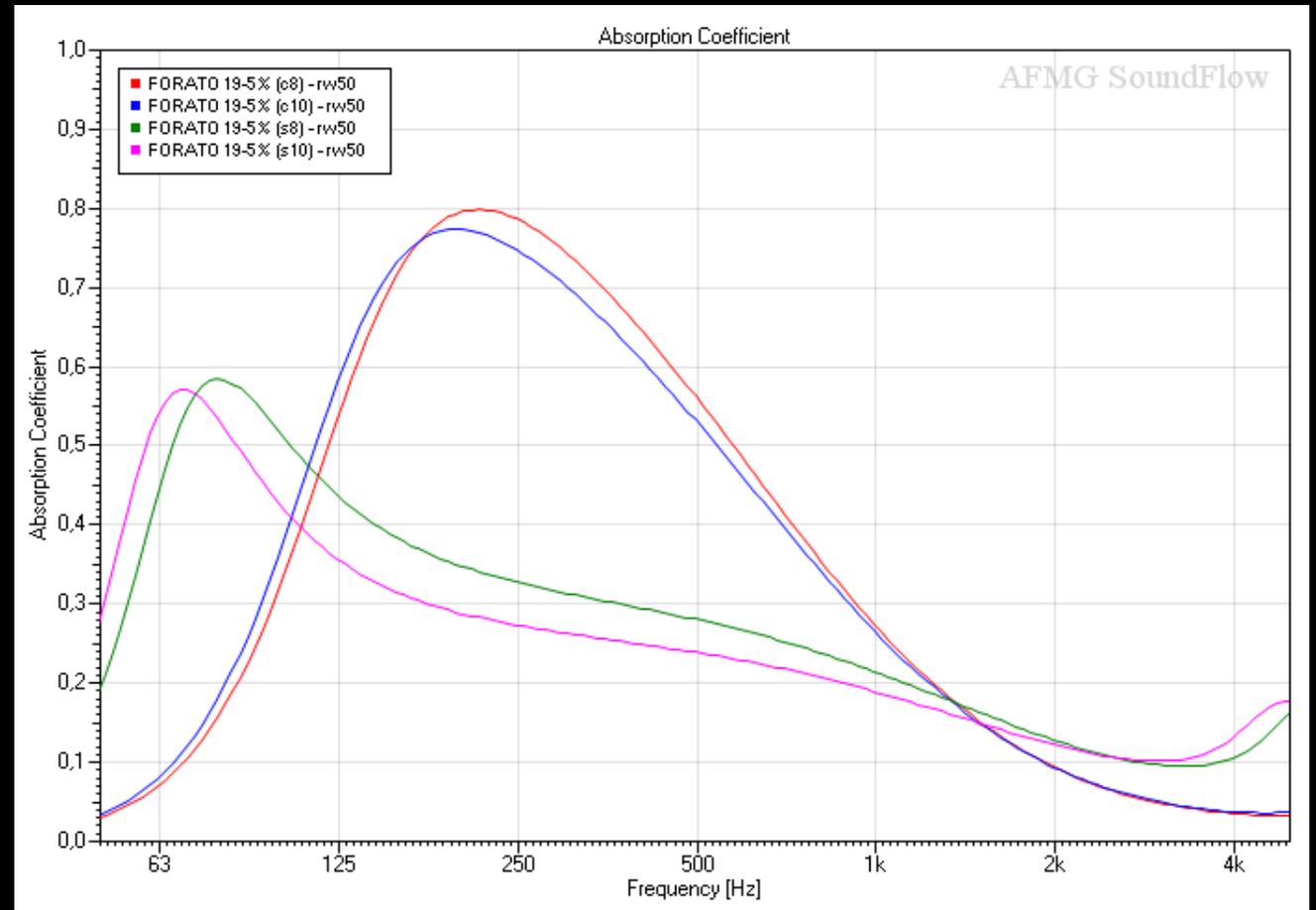
EFFETTI DELLA CAMERA D'ARIA NELL'ASSORBIMENTO

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.



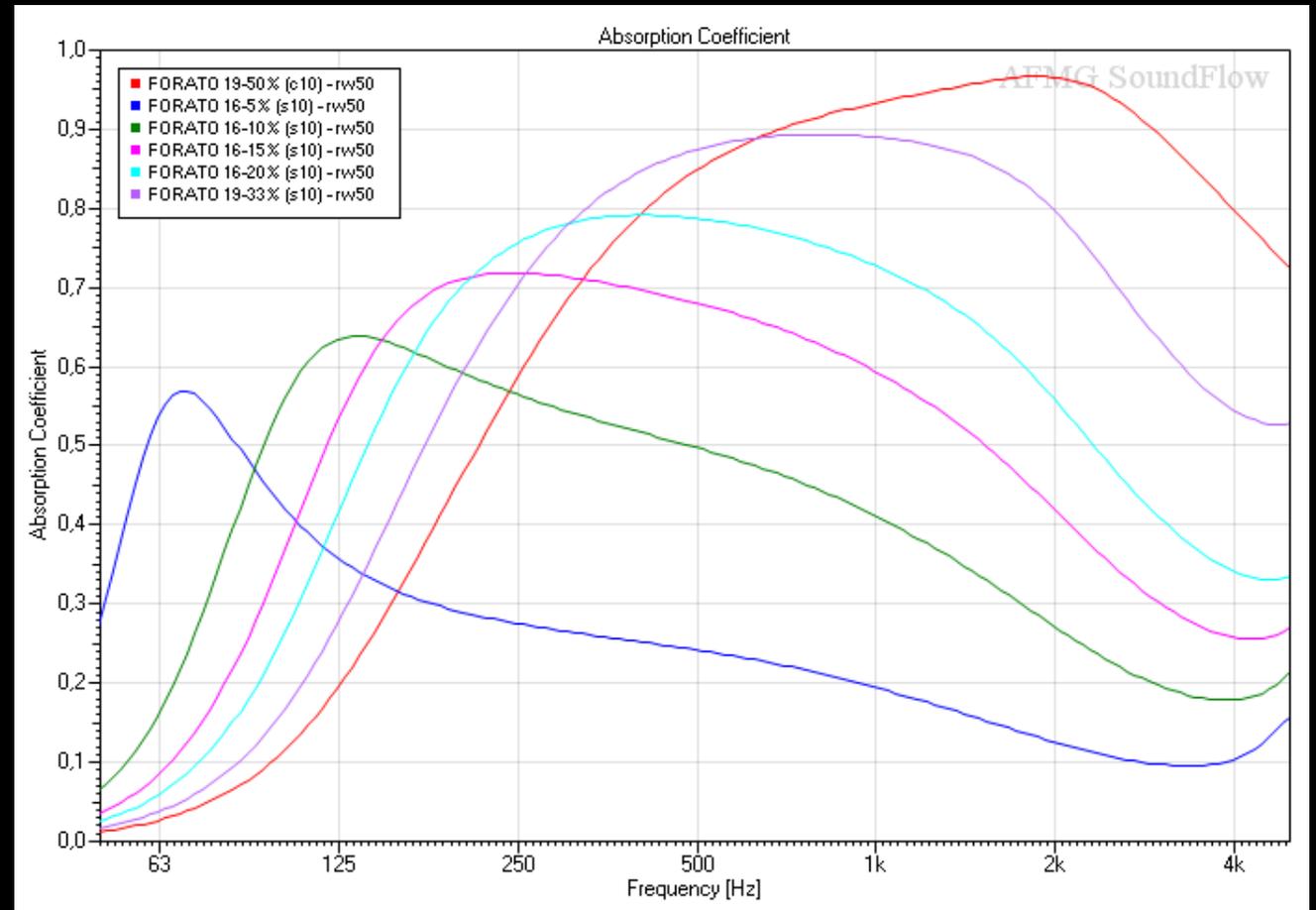
EFFETTI DEI TIPI DIVERSI DI PERFORAZIONE NELL'ASSORBIMENTO

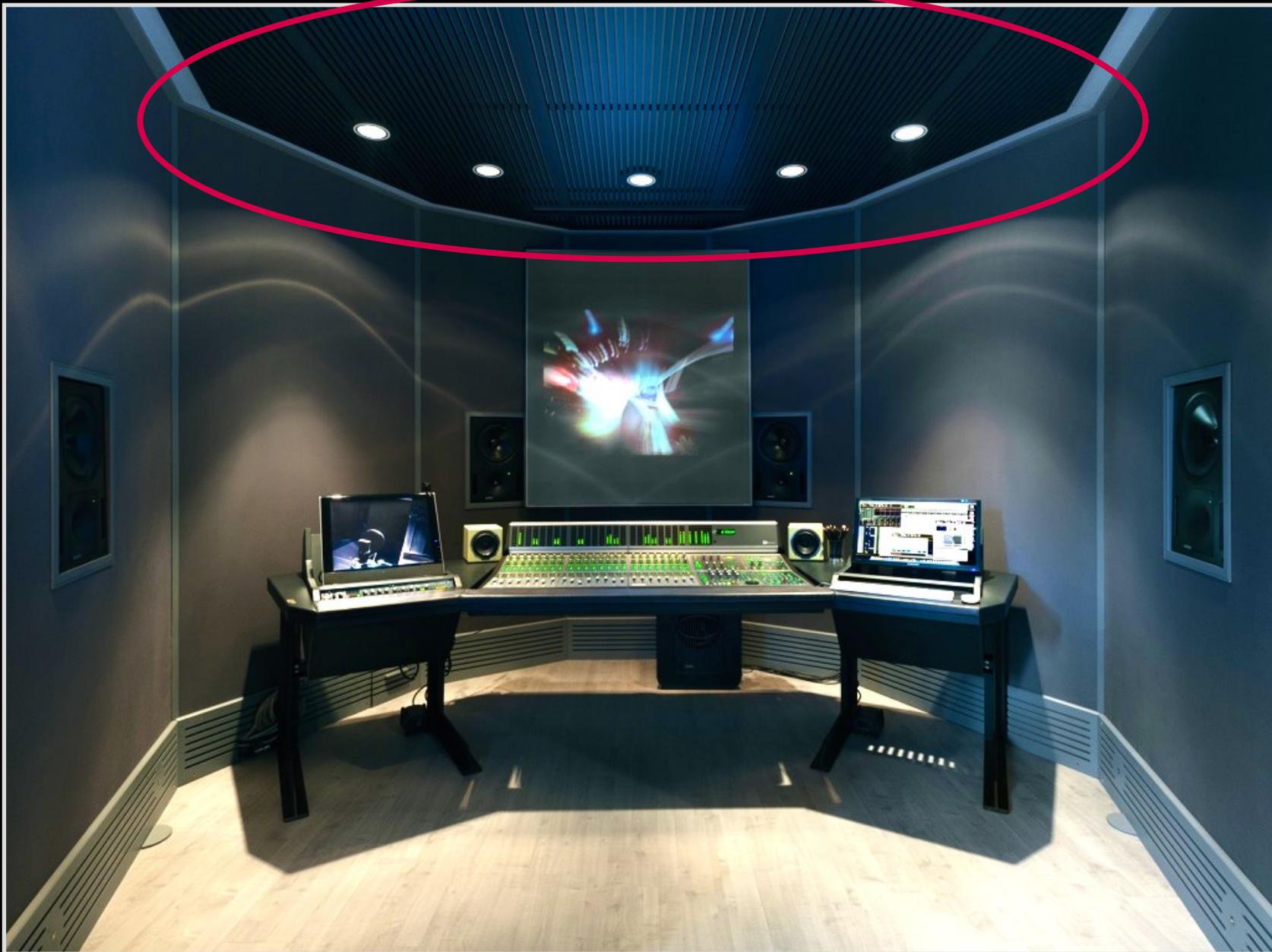
Pannelli forati risonanti (stesso spessore e percentuale foratura, ma di tipo diverso: c = circolare, s = a stecche): nella legenda il primo numero indica lo spessore in mm del pannello, poi c'è la percentuale di foratura (5%), la sigla rw indica la lana di roccia e il suo spessore (50 mm).



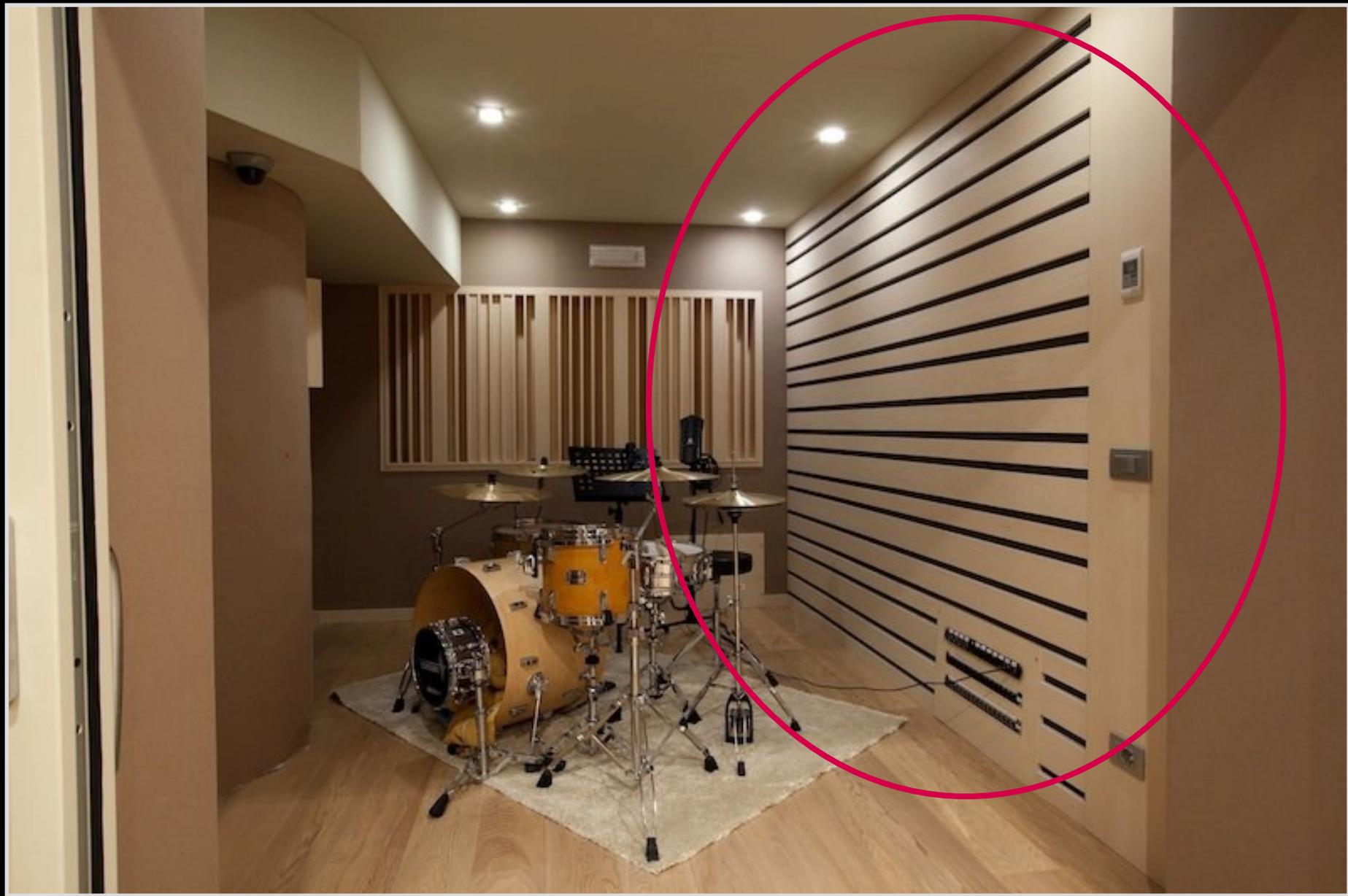
EFFETTI DELLA PERCENTUALE DI FORATURA NELL'ASSORBIMENTO

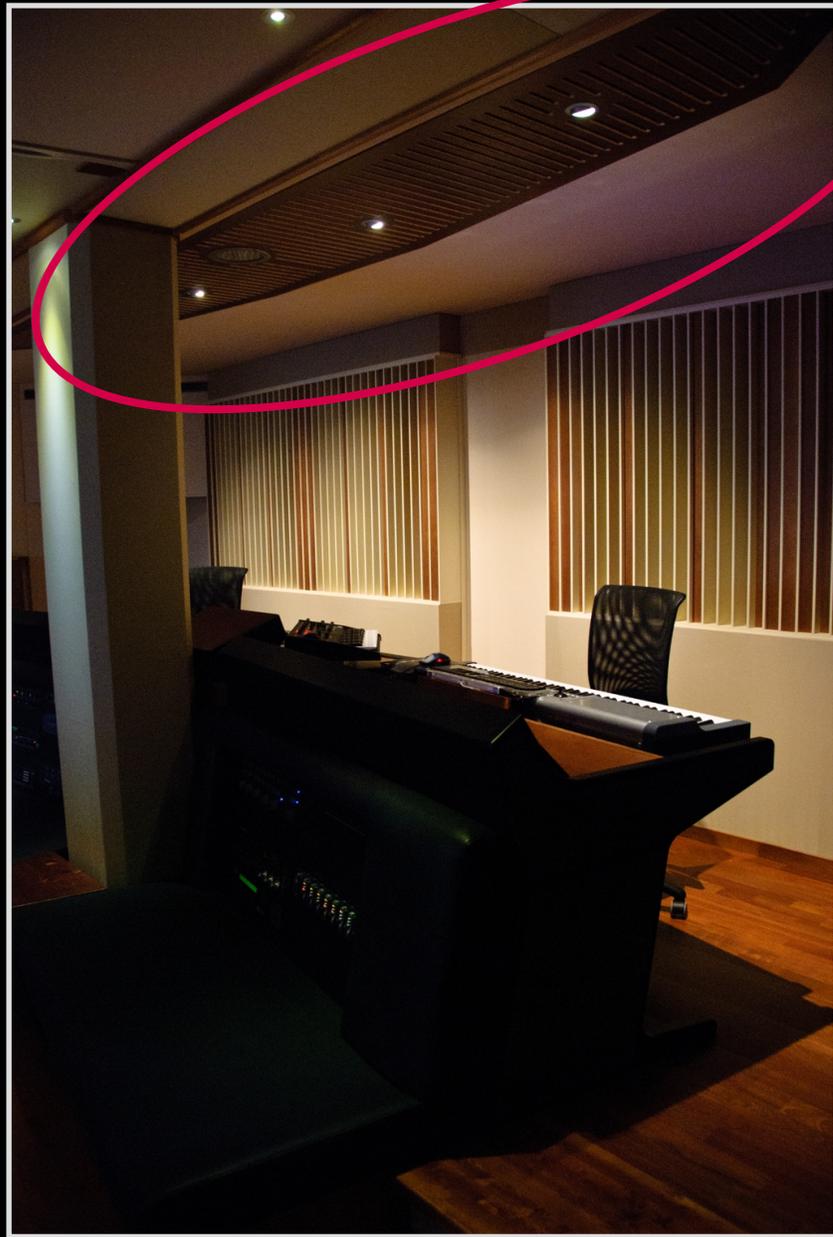
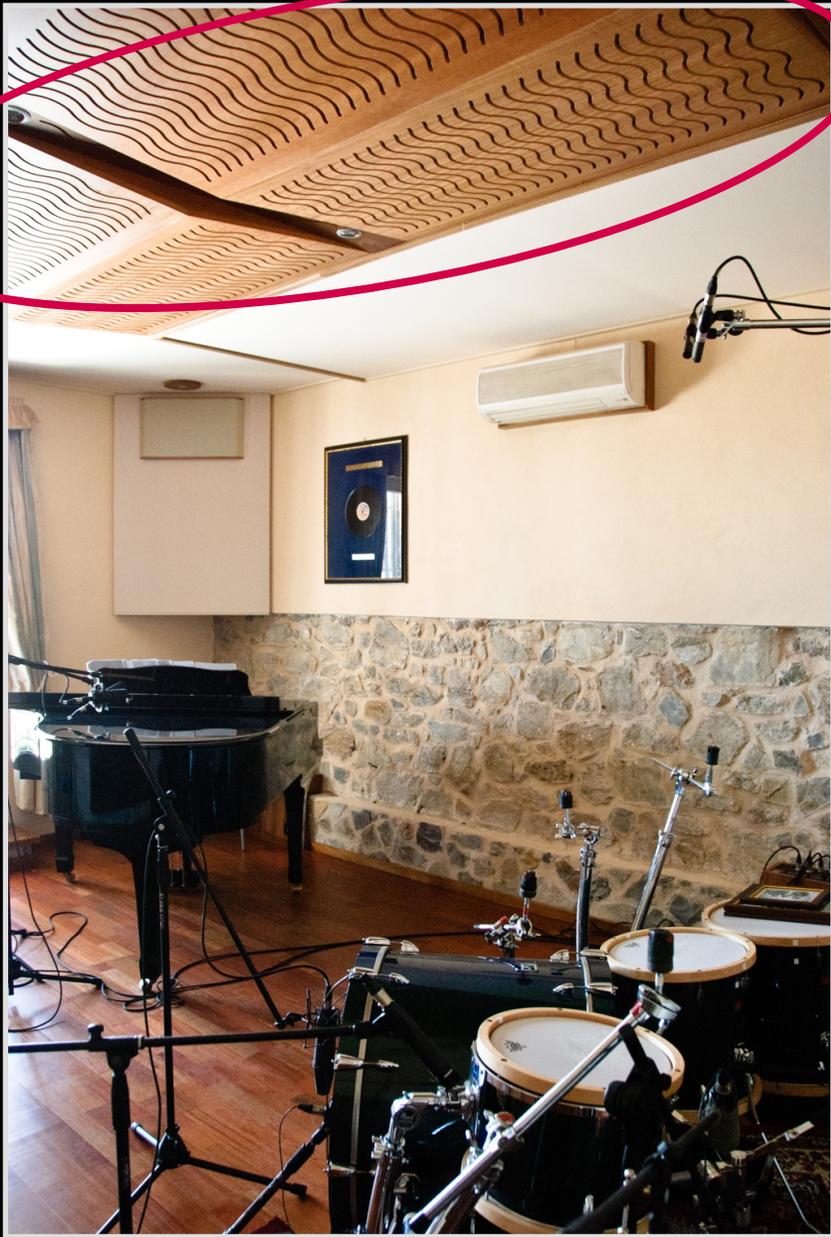
Pannelli forati risonanti [stesso montaggio e materiale fonoassorbente (lana di roccia 50 mm), cambia la percentuale di foratura, il tipo (c = circolare, s = a stecche) e lo spessore del pannello]: nella legenda il primo numero indica lo spessore in mm del pannello, poi c'è la percentuale di foratura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







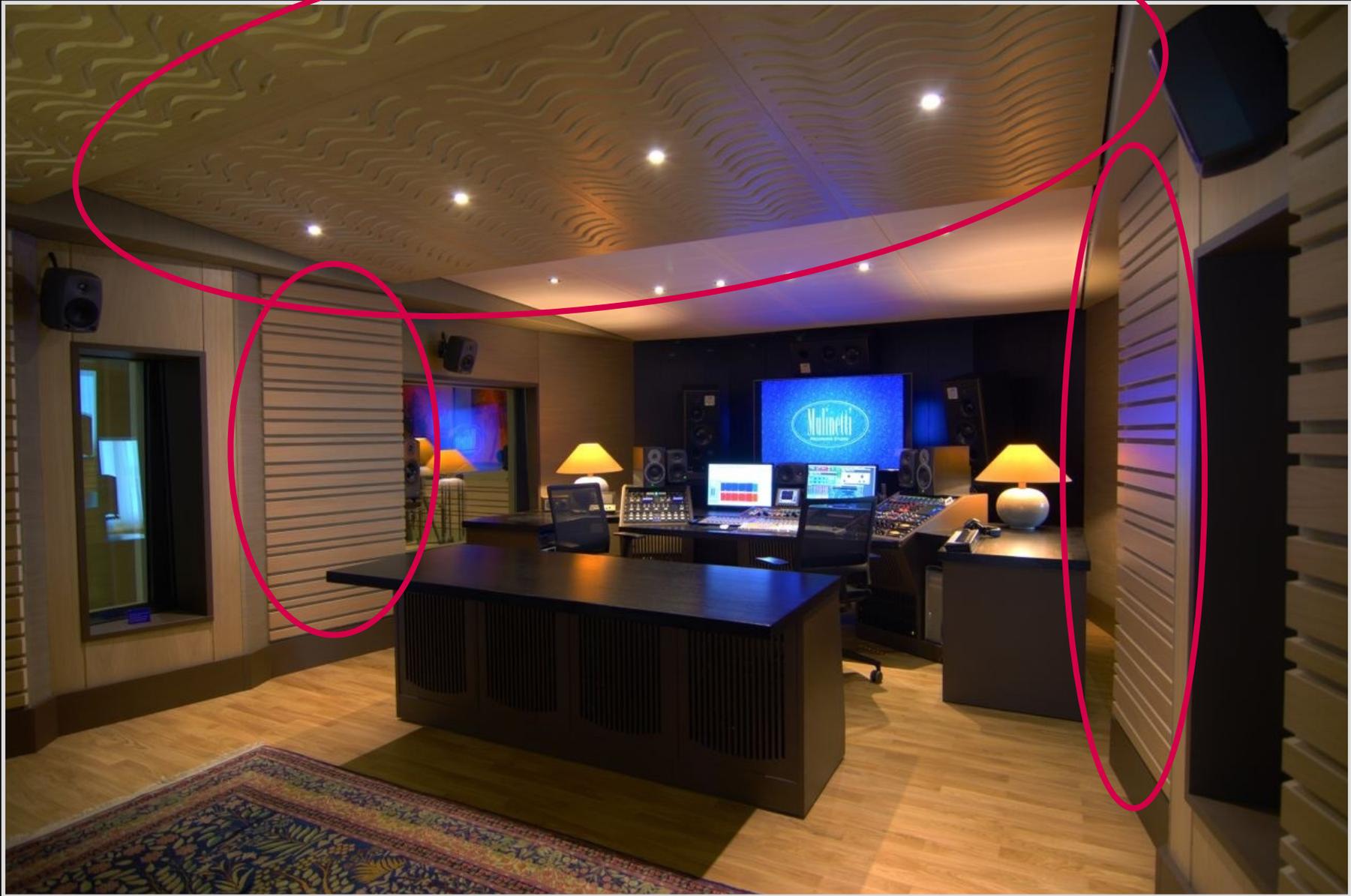






BLURoom di GROVILLE :: CONTROL ROOM ::





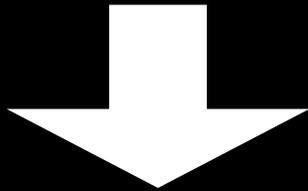
LEZIONE 1.5
ONDE SONORE
caratteristiche ondulatorie del suono

In partnership with



ONDE ACUSTICHE

Il suono è un fenomeno di tipo ondulatorio



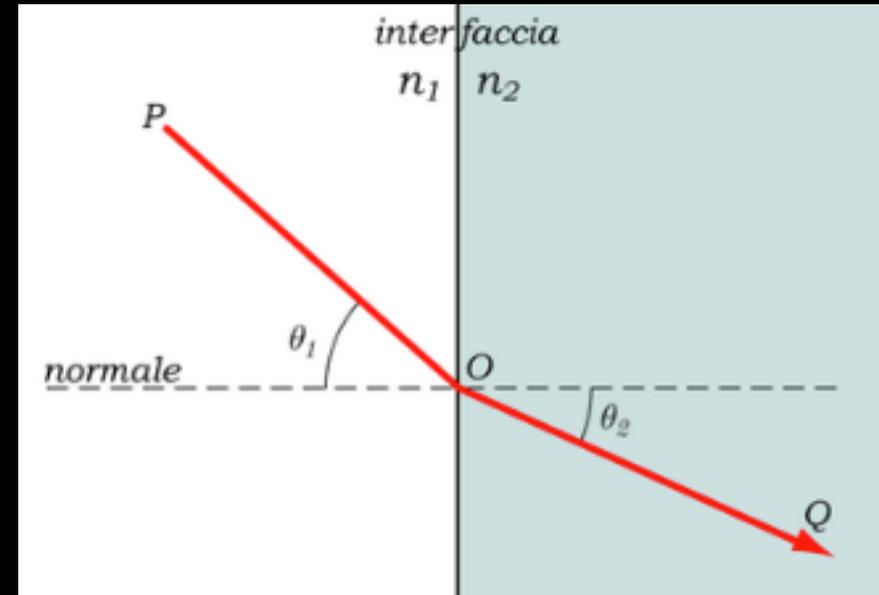
è soggetto ai tipici comportamenti ondulatori:

- 1. Rifrazione**
- 2. Riflessione**
- 3. Interferenza**
- 4. Diffrazione**

1. RIFRAZIONE

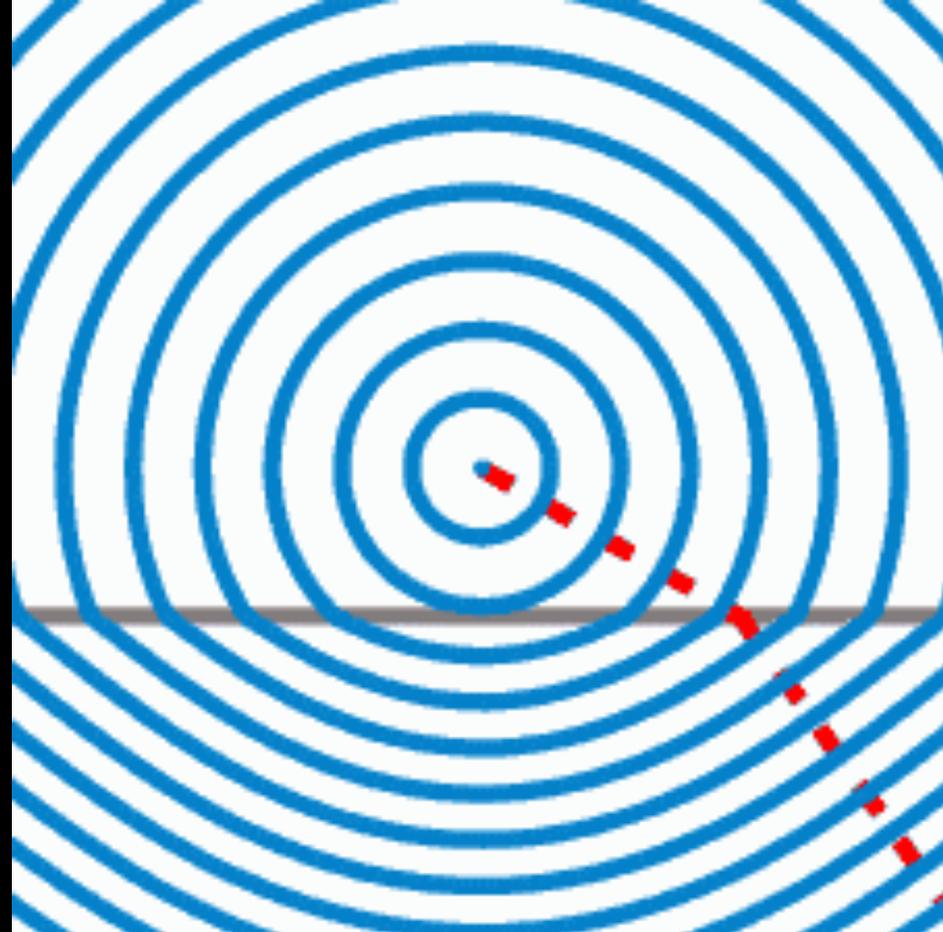
- Il fenomeno della rifrazione consiste in un cambiamento di direzione di propagazione dell'onda quando attraversa la superficie di separazione di mezzi con densità diversa. Questo cambiamento dipende dal rapporto fra le diverse velocità di propagazione dell'onda nei due mezzi.
- La rifrazione è governata dalla legge di Snell: Se il raggio proviene da una regione con indice di rifrazione n_1 ed entra in un mezzo con indice n_2 , gli angoli di incidenza i e di rifrazione r sono legati dall'espressione:

$$\frac{\sin i}{\sin r} = \frac{v_1}{v_2} = \frac{n_2}{n_1}$$



RIFRAZIONE

- Il fronte d'onda quando entra in un mezzo con indice di rifrazione maggiore



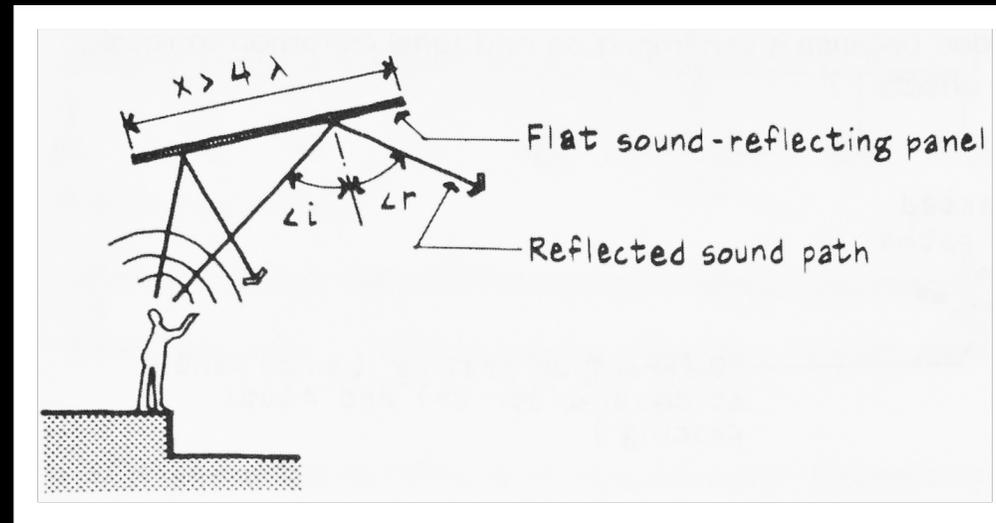
RIFRAZIONE DELLA LUCE NELL'ACQUA



DOVE TROVIAMO LA RIFRAZIONE IN ACUSTICA?

- in realtà la rifrazione la troviamo un po' dappertutto, ma soprattutto nei problemi legati all'isolamento acustico;
- è stato mostrato quanto la velocità del suono nei solidi (e nei liquidi) sia solitamente maggiore che nei gas come l'aria, ora possiamo capire che nel passaggio da un mezzo ad un altro (ad esempio aria/muro) avviene un trasporto diverso di energia sonora a seconda del tipo di velocità di propagazione del suono nel mezzo stesso.

2. RIFLESSIONE



Se la dimensione della superficie x è superiore ad almeno 4 volte la lunghezza d'onda incidente λ , allora avviene la riflessione e 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.

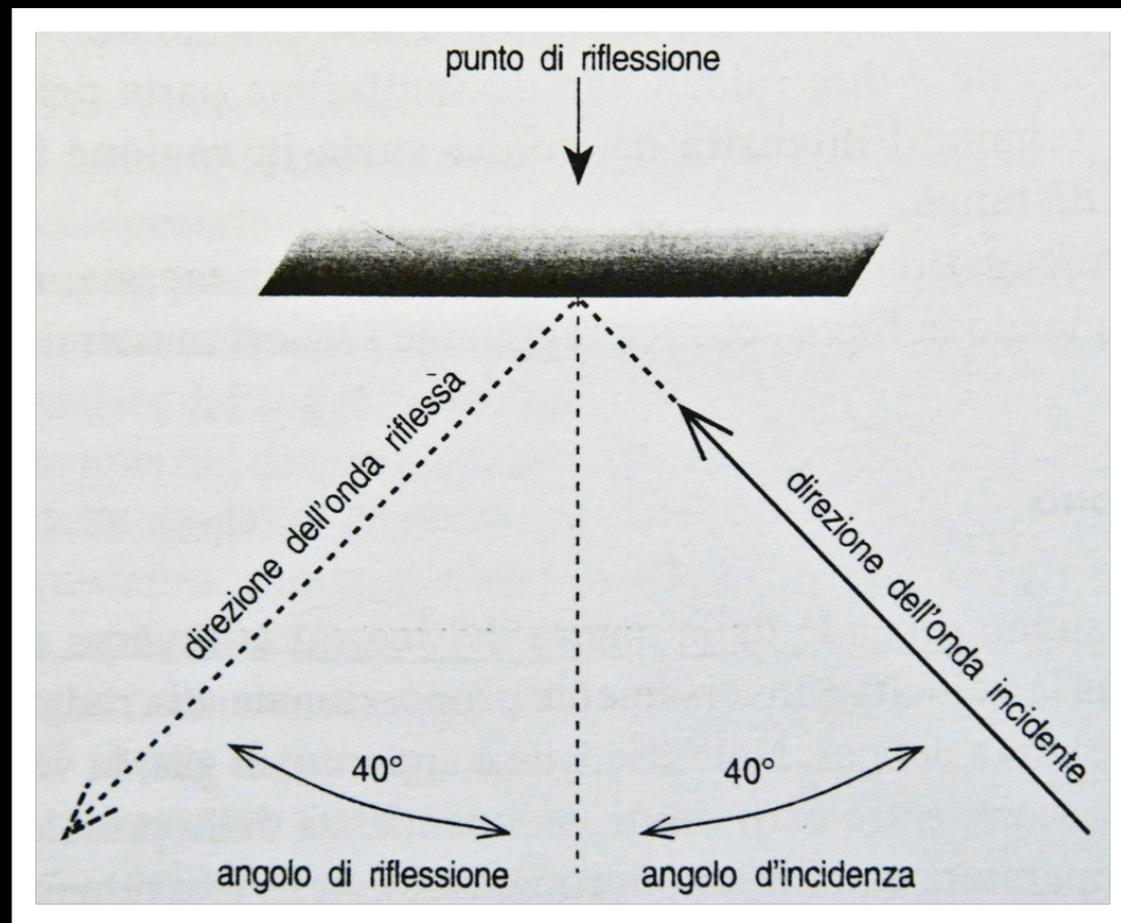
REGOLA DELLA RIFLESSIONE

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

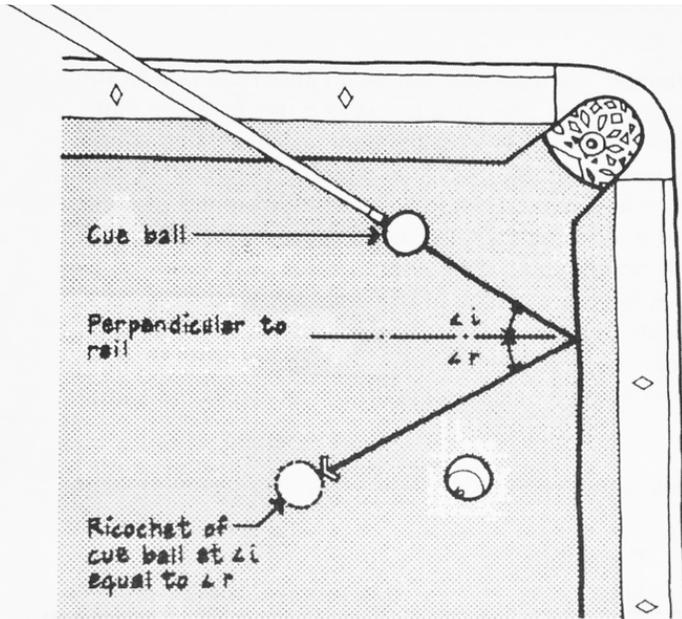
l'angolo d'incidenza è uguale a quello di riflessione.

Dalle caratteristiche della superficie riflettente dipende l'intensità e la qualità della riflessione.

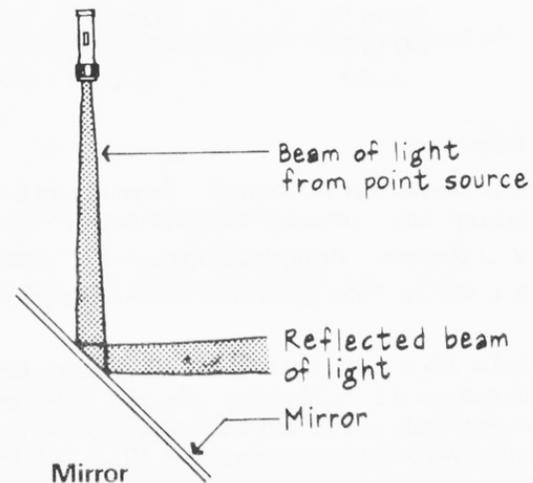
In ogni caso, la parte di energia che non viene riflessa è assorbita oppure rifratta.

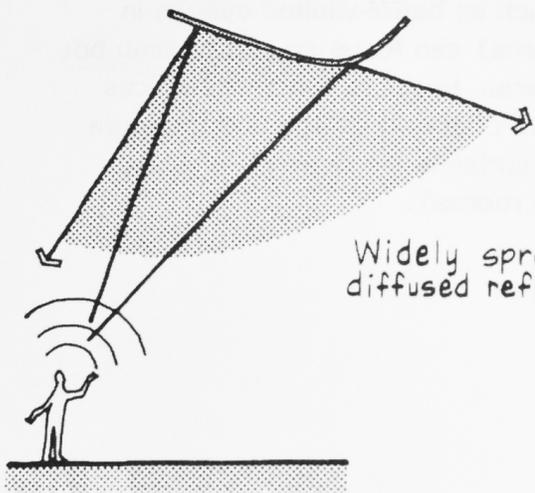


La riflessione
speculare è quella
che calcoliamo
giocando a biliardo
oppure guardando
ad uno specchio.

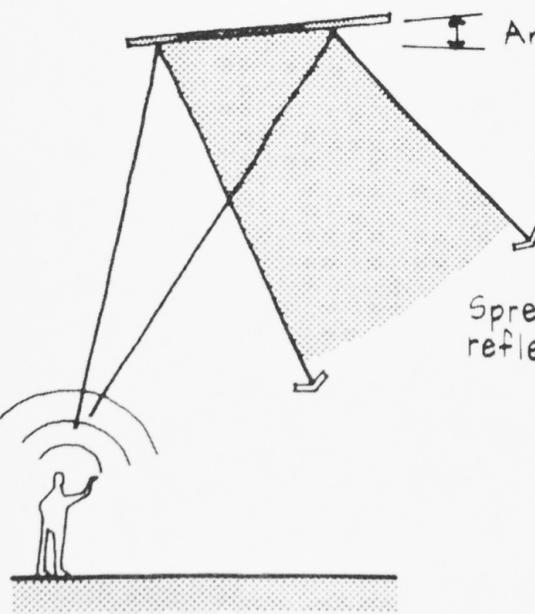


Billiard Table



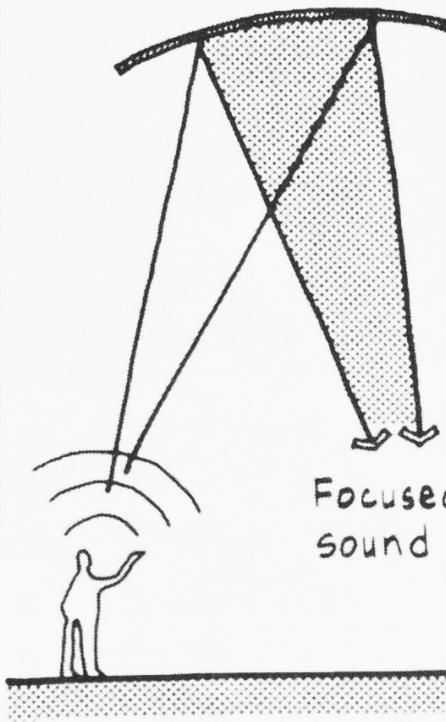


Widely spread or diffused reflected sound



Spread reflected sound

Angle of tilt



Focused reflected sound

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.

RIFLESSIONE E ASSORBIMENTO

La riflessione è completa solo se la superficie è perfettamente riflettente, cioè “rigida” e “impermeabile” al passaggio di aria. In realtà l’energia acustica posseduta dall’onda riflessa è sempre inferiore a quella posseduta dall’onda incidente. Questo perché parte dell’energia viene comunque assorbita dall’ostacolo.

L’assorbimento è tanto maggiore quanto sono più rilevanti i meccanismi causa di assorbimento di energia acustica che possono essere:

- vibrazione della parete od ostacolo incontrato
- penetrazione dell’onda nell’aria contenuta nei pori del materiale
- eventuale attraversamento del materiale stesso

Il risultato è comunque una dissipazione dell’energia acustica in calore.

Essendo le quantità di energia in gioco molto piccole non possibile avere un riscontro sensibile della suddetta trasformazione.

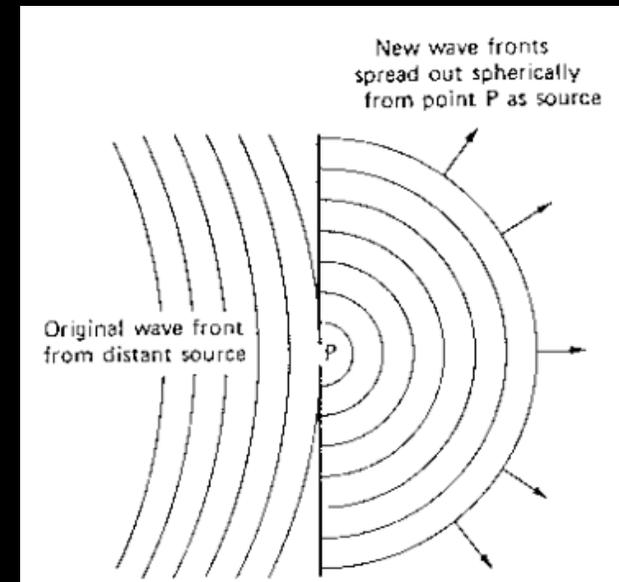
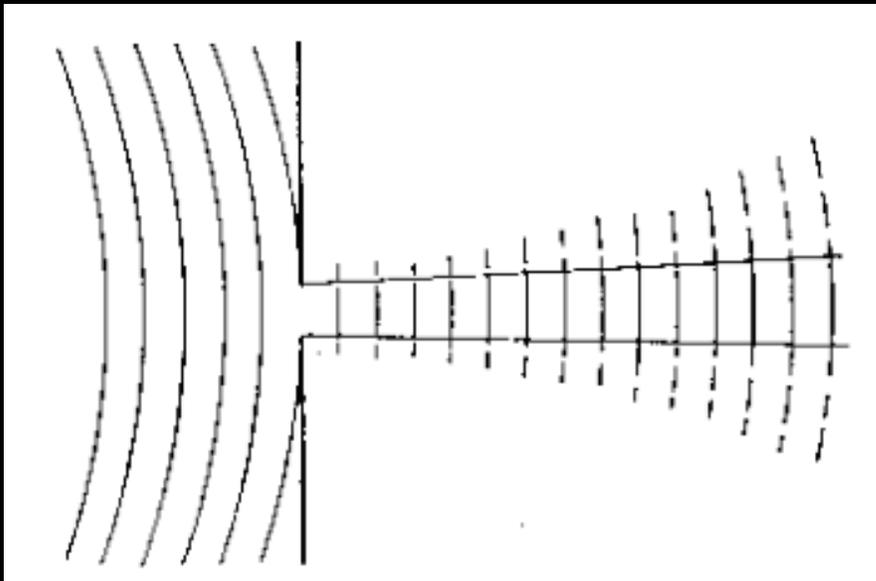
3. INTERFERENZA

- Il fenomeno dell'interferenza avviene quando due suoni sinusoidali di uguale frequenza si propagano simultaneamente nello stesso mezzo, per cui lo spostamento in un dato punto e in un certo istante è pari alla somma vettoriale degli spostamenti prodotti dalle onde componenti in quel punto e in quell'istante.
- Si ha **interferenza costruttiva** quando le onde sono in fase, gli spostamenti hanno la stessa direzione e si ottiene un'onda di ampiezza maggiore di quella di ciascuna onda. Si ha **interferenza distruttiva** quando le onde sono in **controfase**, gli spostamenti hanno verso opposto e l'onda risultante ha ampiezza minore di quelle delle componenti.

4. DIFFRAZIONE

- Il fenomeno della diffrazione si verifica quando le onde oltrepassano il bordo di un ostacolo oppure quando le dimensioni di una superficie sono confrontabili con la lunghezza d'onda del suono incidente.
- Si possono avere tipi diversi di diffrazione a seconda della frequenza del suono incidente.
- Consideriamo una fenditura in una parete: se il fronte d'onda incidente è composto da alte frequenze, il raggio sonoro che si forma all'uscita sarà direzionale; se invece il fronte è di onde a bassa frequenza, la fenditura diventa una nuova sorgente di onde sferiche.

**Alte
frequenze**

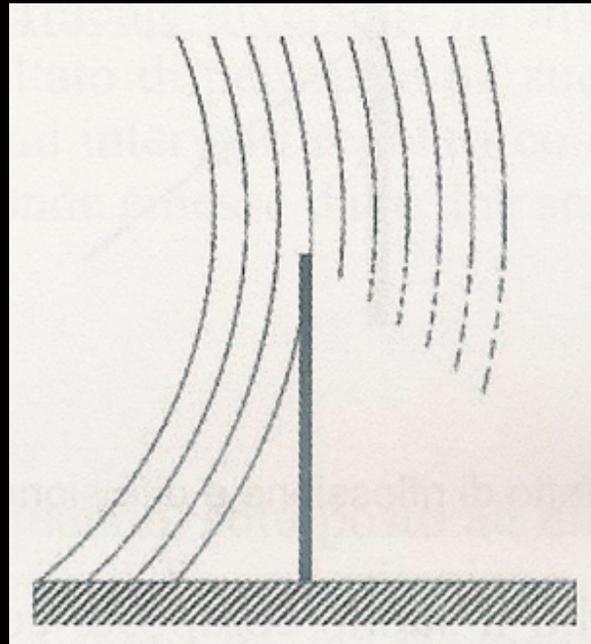


**Basse
frequenze**

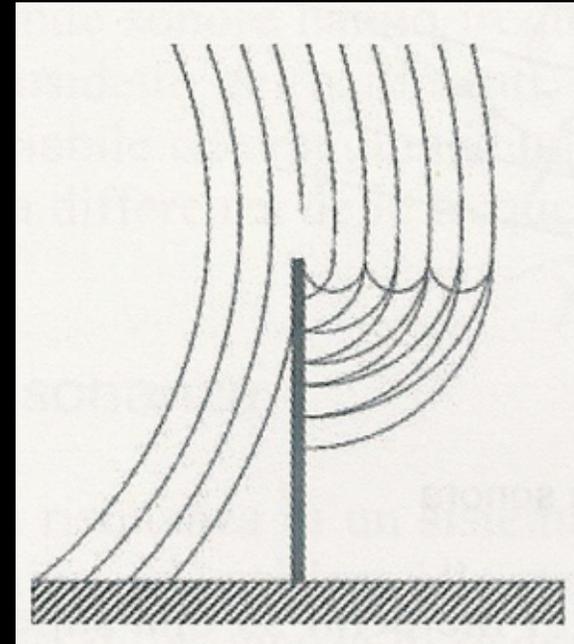
DIFFRAZIONE DI BORDO

- Quando lungo il cammino di un'onda sonora si frappone una barriera il suono, se è ad alte frequenze, creerà una zona d'ombra acustica, mentre nel caso di basse frequenze il bordo diventerà a sua volta fonte sonora.

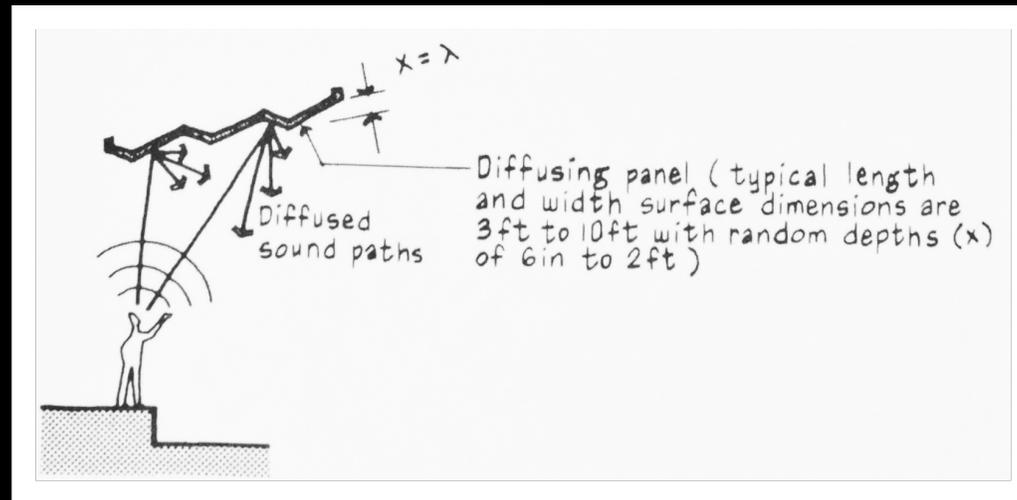
**Alte
frequenze**



**Basse
frequenze**



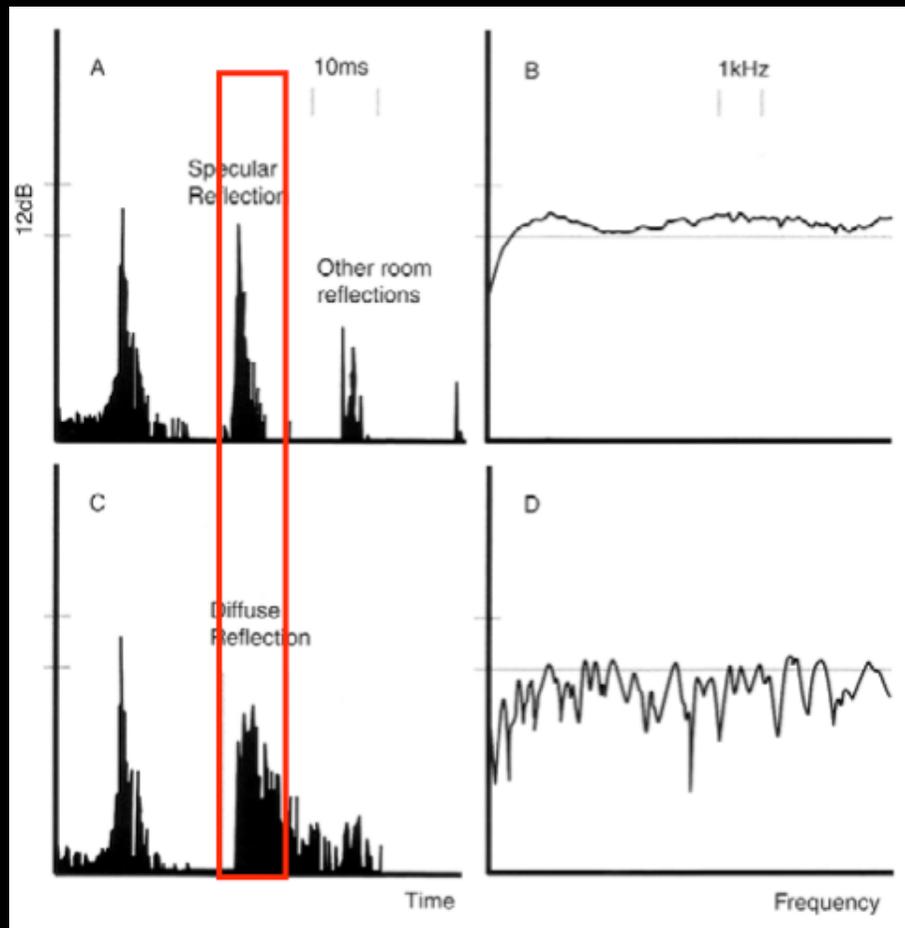
DIFFUSIONE ACUSTICA



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

Avviene quando la superficie solida ha delle profondità di spessore comparabile alle lunghezze d’onda dell’onda incidente.

In questo caso non si ha riflessione speculare ma il suono viene sparpagliato in tutte le direzioni.



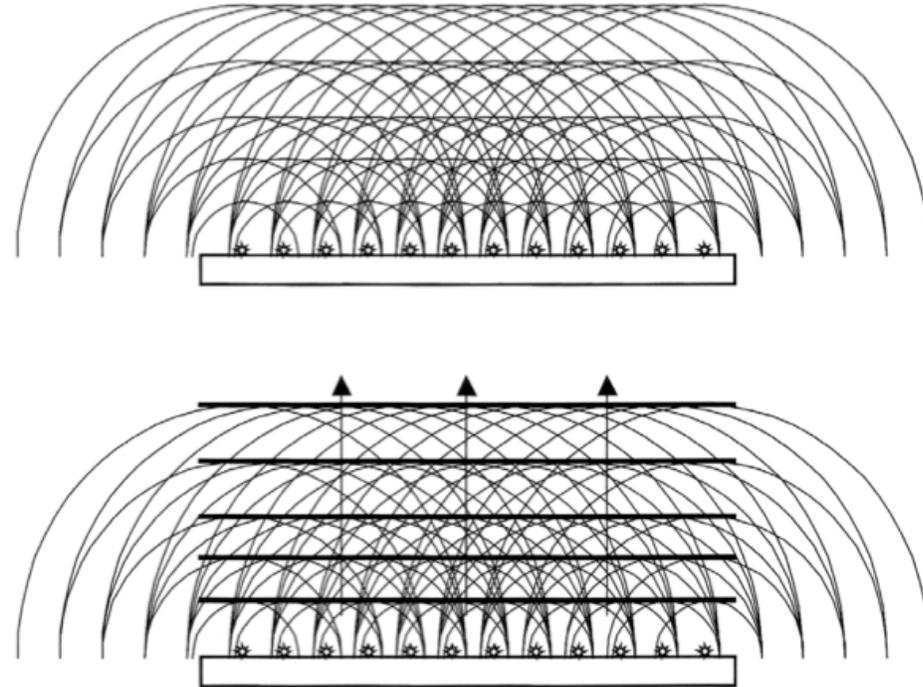
Interazione tra suono diretto e riflesso (“colorazione”): risposta all’impulso e risposta in frequenza del suono riflesso da una superficie piana (sopra) e da un diffusore (sotto).

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

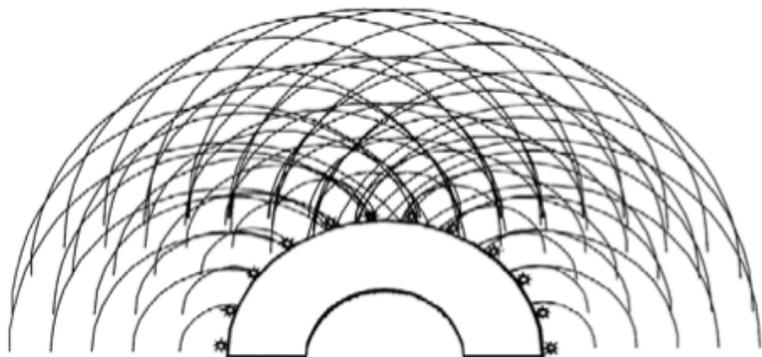
PRINCIPIO DI HUYGENS

Ogni elemento $d\Sigma$ di un fronte d'onda Σ 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 $d\Sigma$.

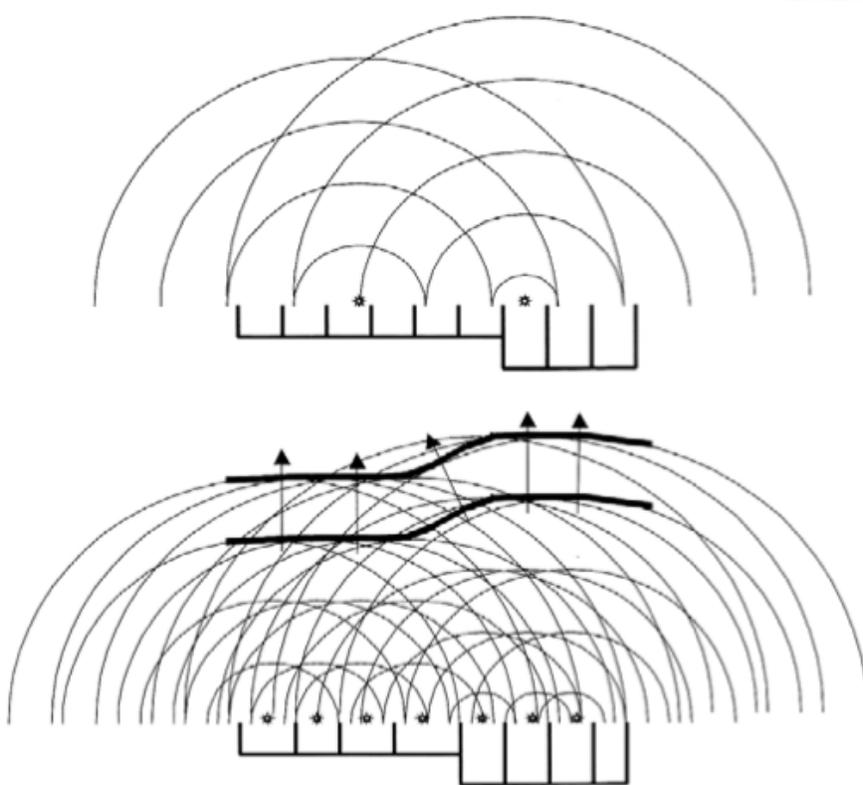
La perturbazione prodotta in un punto dello spazio si può sempre ottenere come sovrapposizione di tutte le onde sferiche secondarie che raggiungono quel punto.



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.

LEZIONE 1.6

DIFFUSORI ACUSTICI

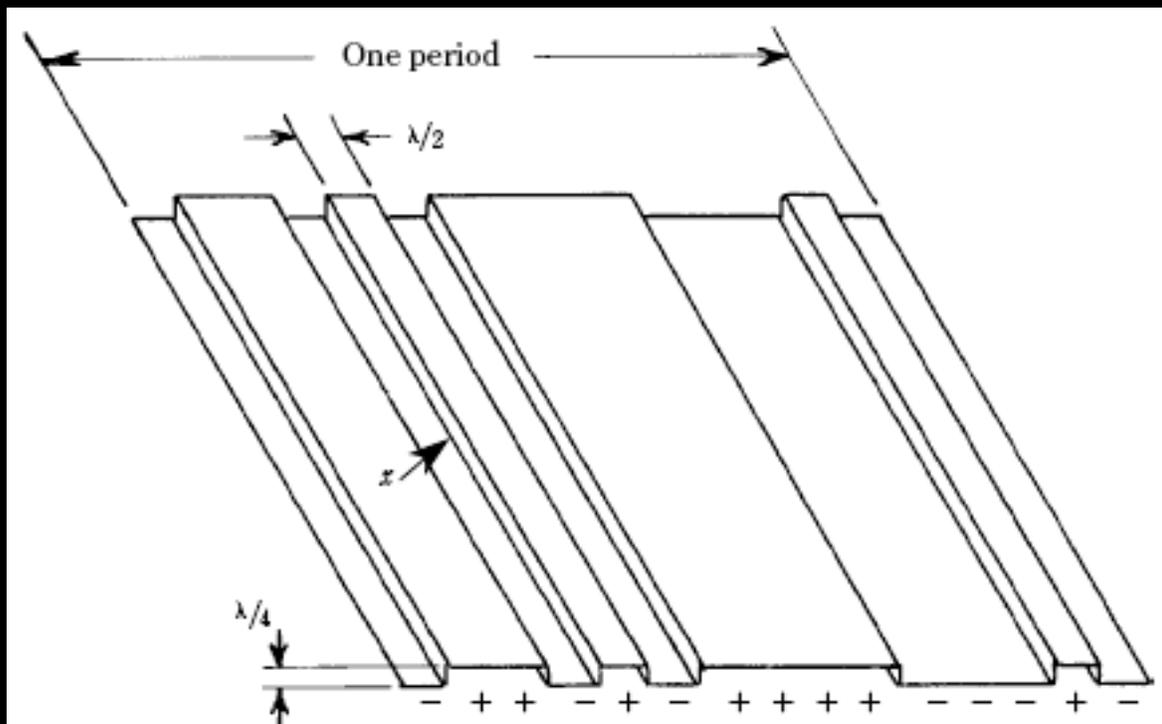
In partnership with



DIFFUSIONE ACUSTICA

- Superfici convesse (**policilindri**), triangolari etc
- Diffusione di Schroeder: **QRD**, **Skyline** etc
- Diffusione a **linee curve** elaborate con simulazioni al 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

DIFFUSIONE DI SCHROEDER: QRD QUADRATIC RESIDUE DIFFUSORS E SKYLINE

- **Dispositivo basato su buche e spessori consequenziali determinati dalla sequenza dei residui quadratici**
- **lo spessore più alto è determinato dalla lunghezza d'onda più lunga che dev'essere diffusa**
- **la larghezza delle buche è circa mezza lunghezza d'onda della più corta lunghezza d'onda che dev'essere diffusa**

QRD QUADRATIC RESIDUE DIFFUSORS

- **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**

$$d = n^2 \bmod p$$

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

Per trovare la lunghezza di ogni singolo blocco si deve sapere la frequenza per la quale il diffusore è progettato:

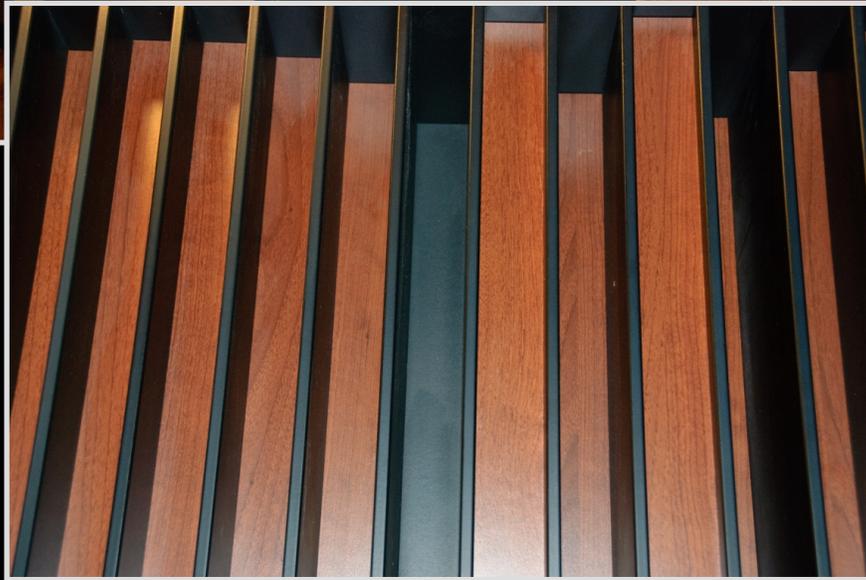
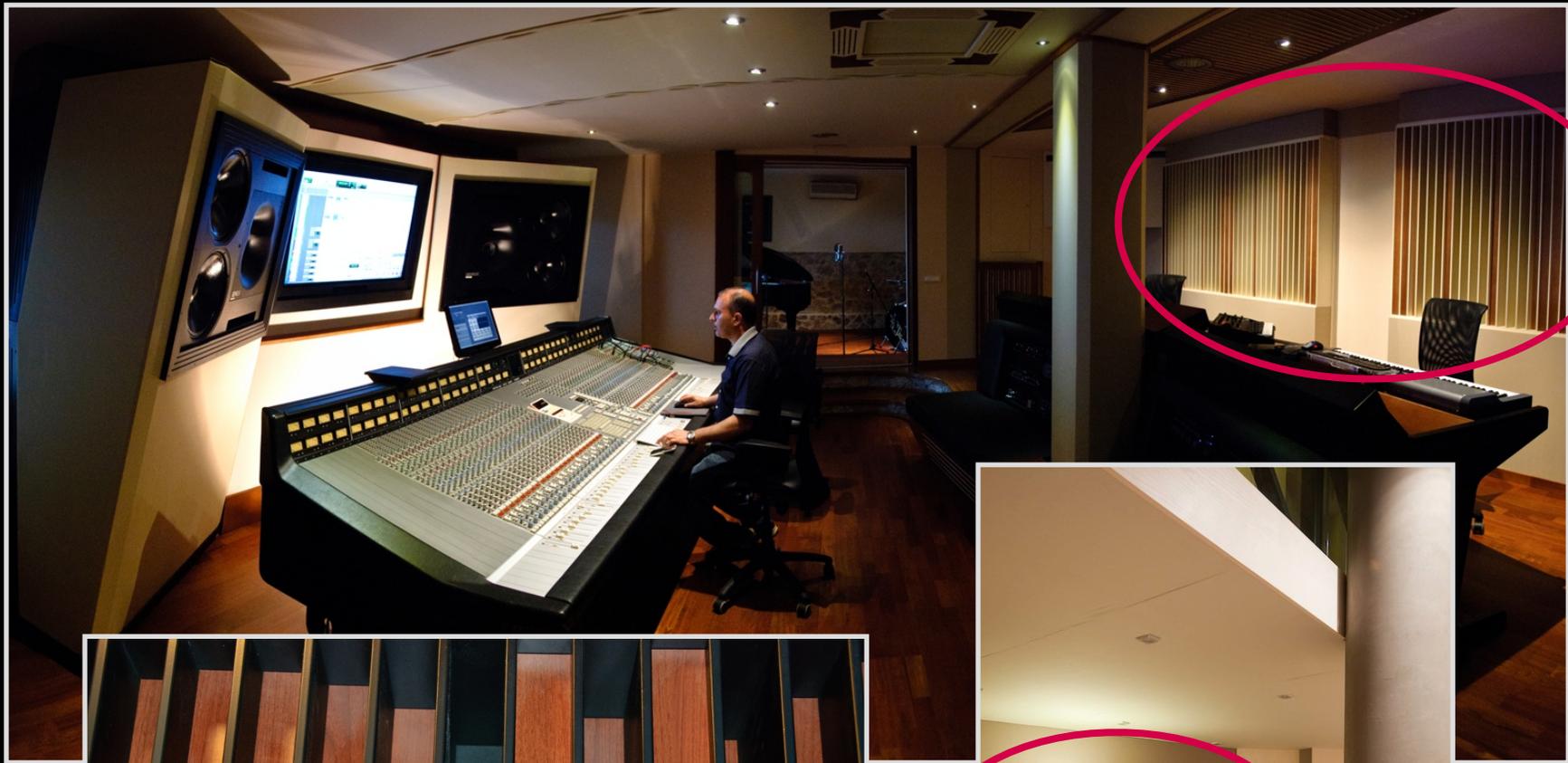
$$d_n = s_n \left(\frac{\lambda}{2p} \right)$$

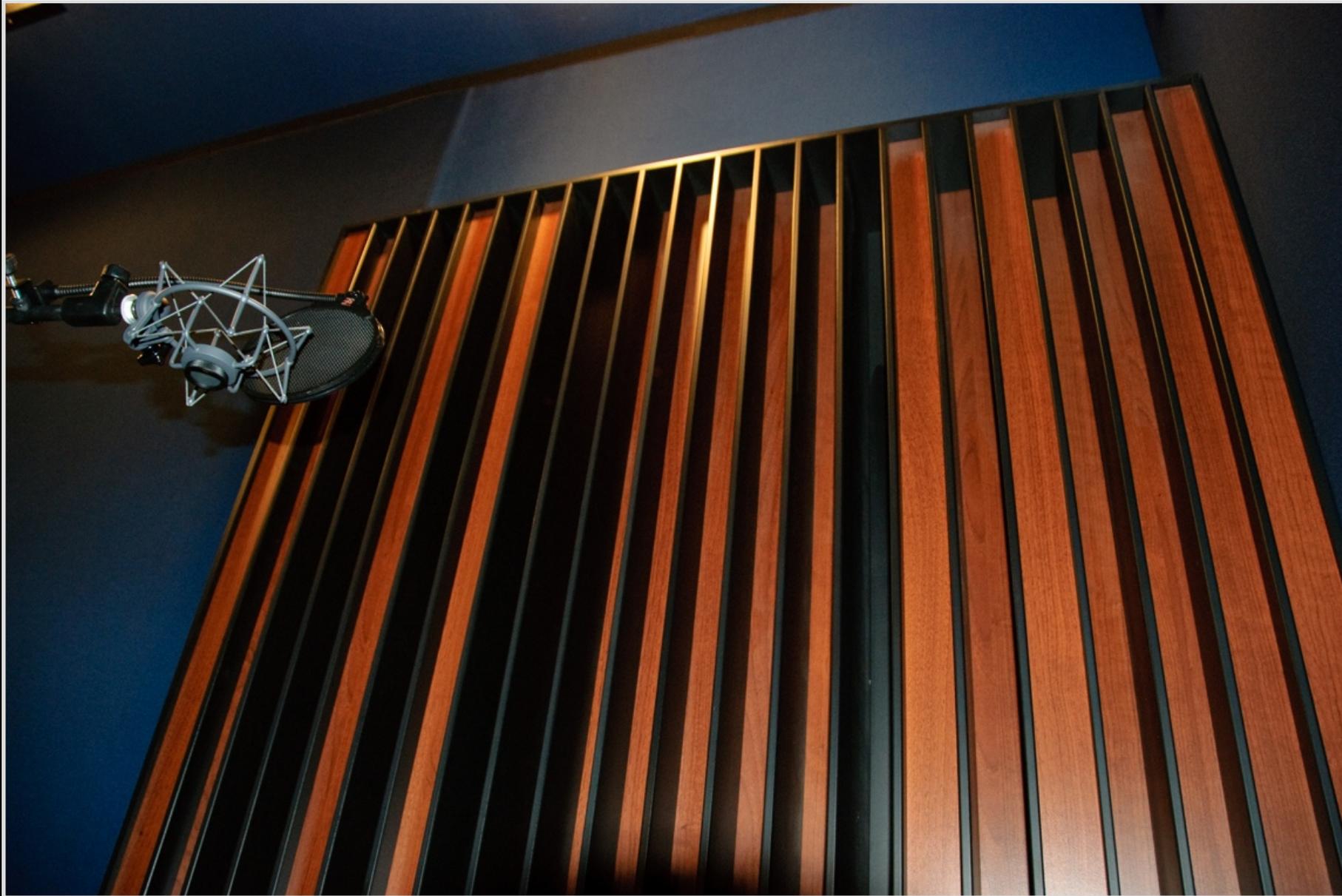
Tabella per ricavare la lunghezza dell'unità d_n a partire dalla frequenza per cui è progettato il diffusore

Frequenza [Hz]	p (numero primo)	Lunghezza unità [cm]
1000	7	2,45
	11	1,56
	13	1,32
	17	1,01
	19	0,90
	23	0,75

La larghezza dei blocchi invece dovrebbe essere costante e piccola se comparata alla frequenza per la quale è progettato il diffusore, o almeno sicuramente non più grande di $\lambda/2$.

Schroeder suggerisce 0.137λ





PRIMITIVE-ROOT DIFFUSERS

Questo tipo di diffusori utilizza una differente sequenza della teoria dei numeri:

$$d = g^n \bmod p$$

p : numero primo

g : è l'ultima primitive-root di p

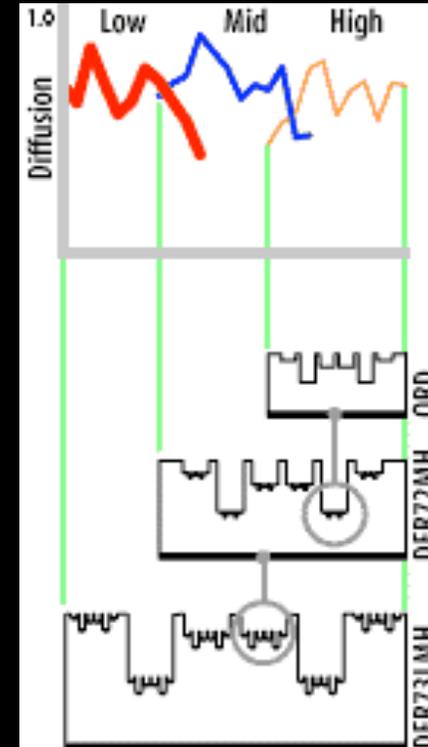
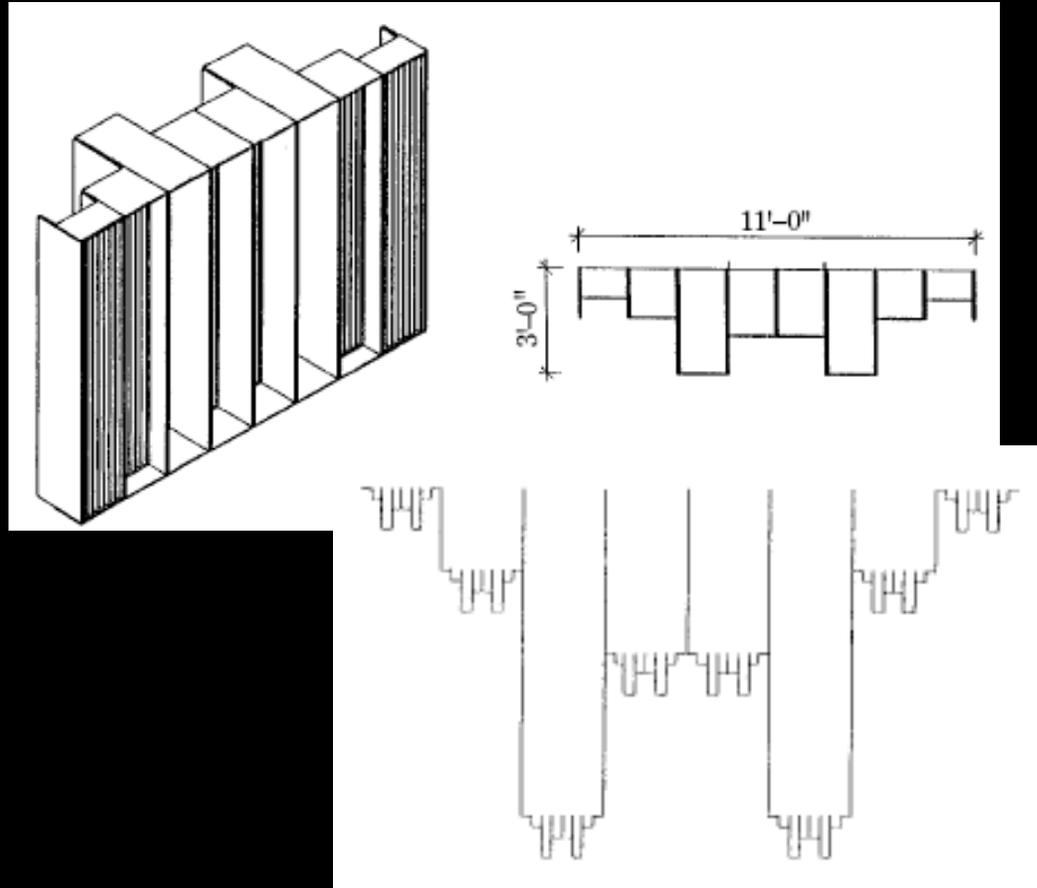
n : numero naturale (intero tra 0 e infinito)

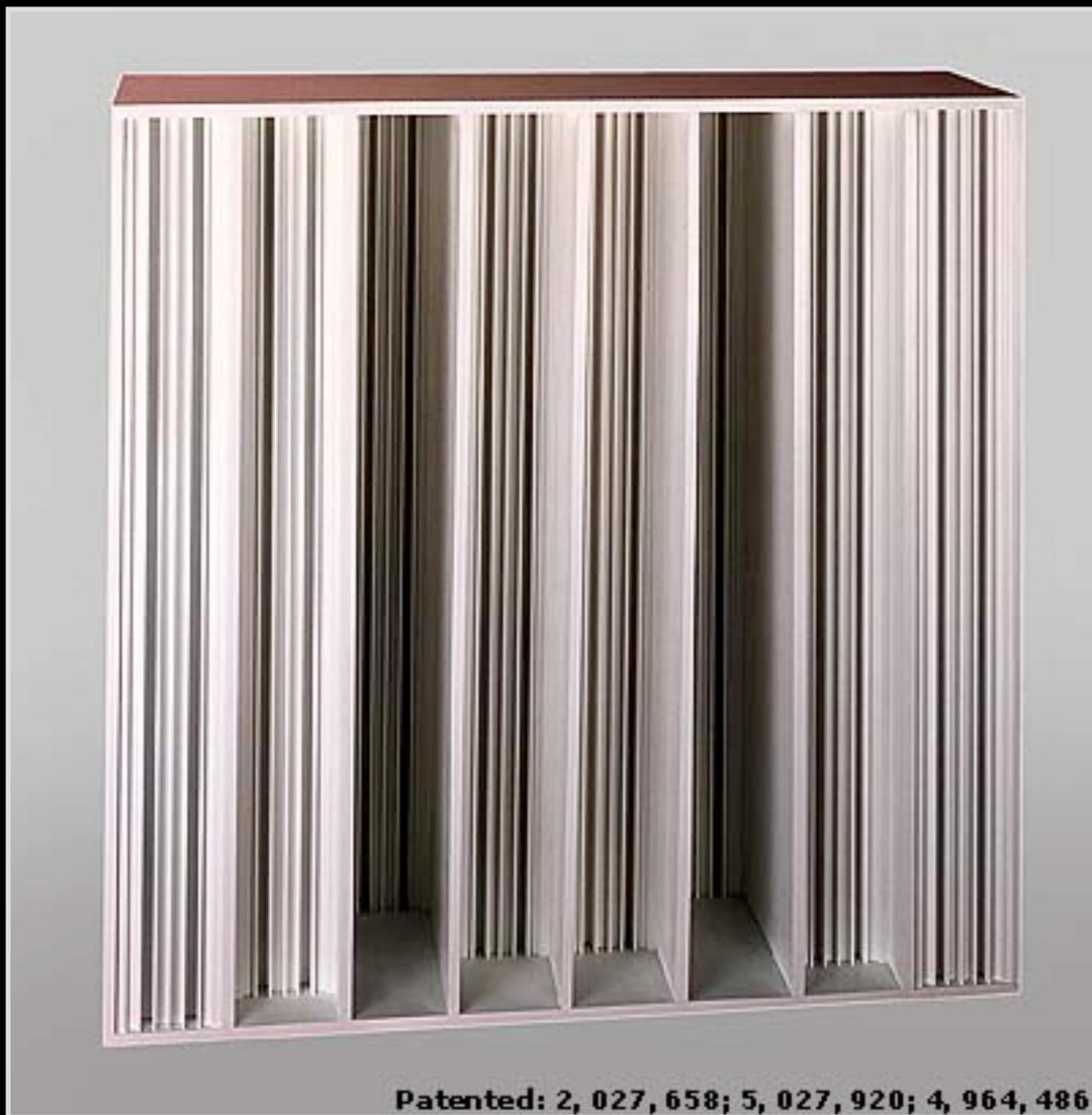
Primitive-root sequences

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

Well depth or proportionality = g^n modulo p
 p = prime number
 g = least primitive root of p

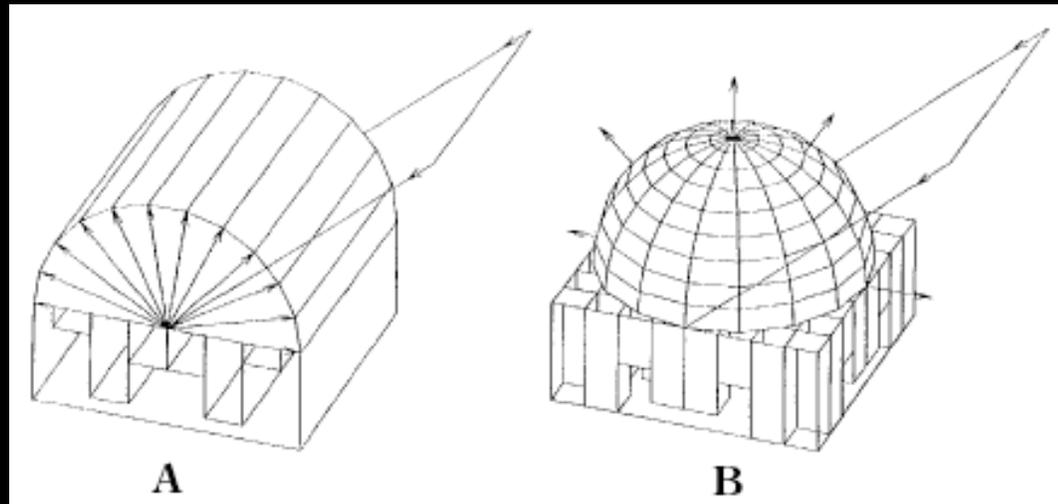
È molto importante capire la frequenza sulla quale agisce il diffusore. Per questo motivo, sulla falsariga della costruzione delle casse a più vie, si costruiscono diffusori a banda larga (Diffractal) che sono tipo dei frattali, ossia in ogni elemento c'è una serie di elementi sempre più piccoli per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



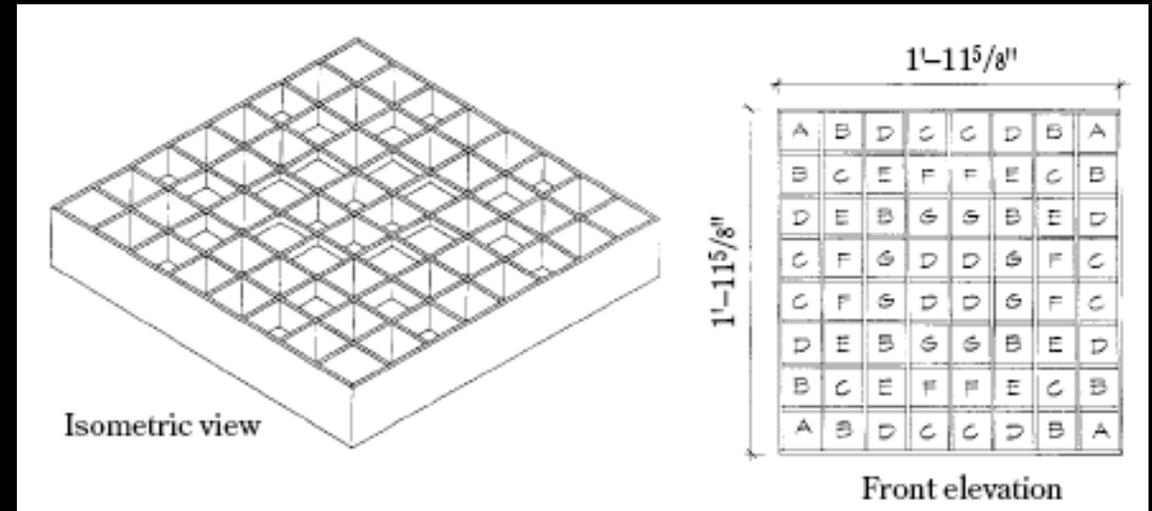


DIFFUSORI IN 2D

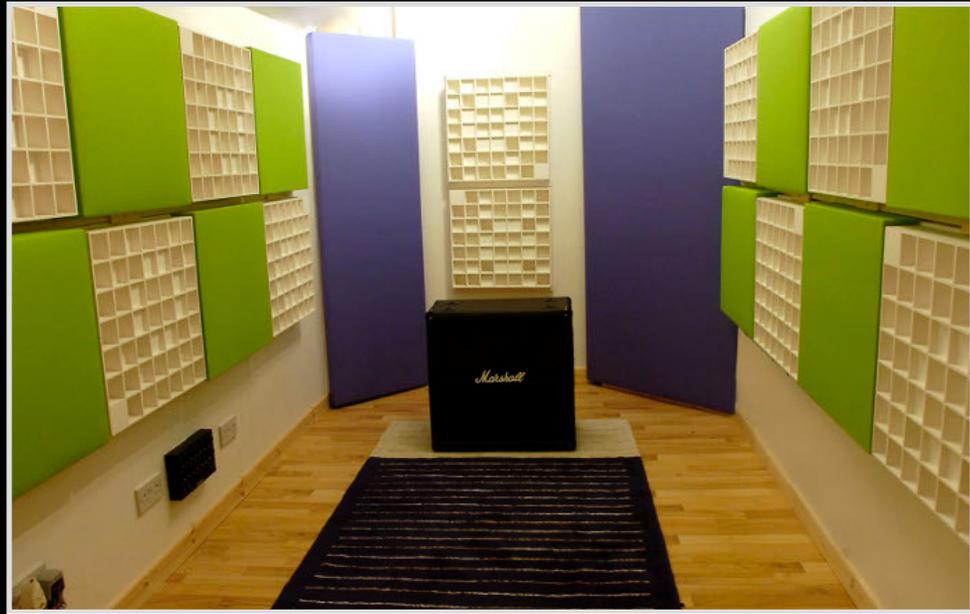
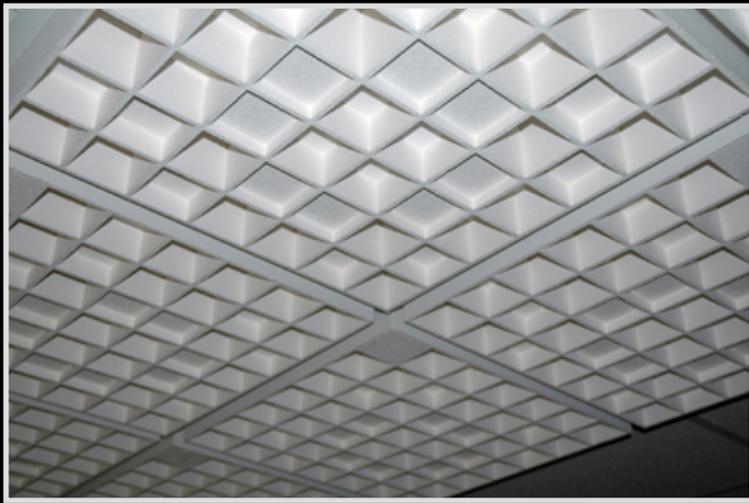
La distribuzione spaziale delle riflessioni provocate da questo tipo di diffusori è a semicerchio ossia in due dimensioni. Per avere una distribuzione sferica bisognerà utilizzare diffusori in tre dimensioni come l'Omniffusor RPG.

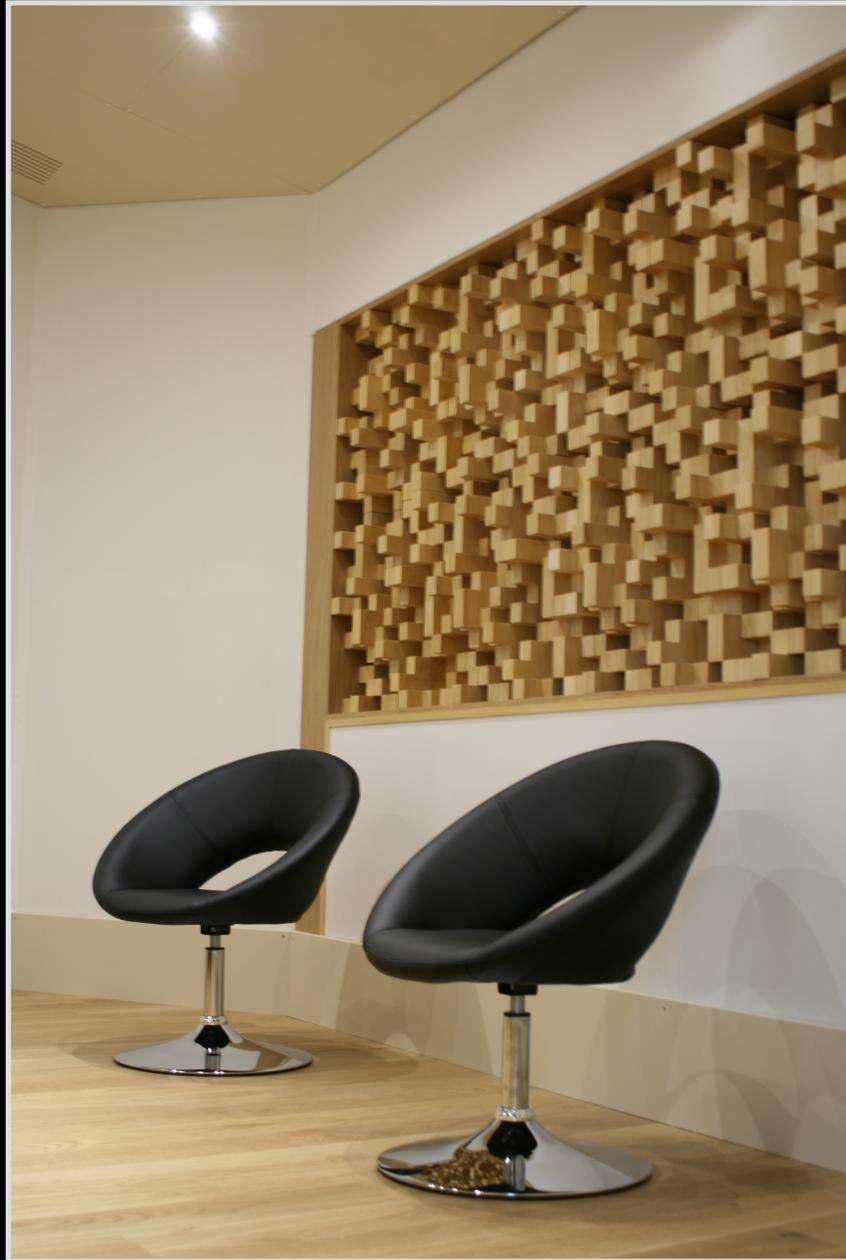


differenza tra QRD/primitive-root
e Omniffusor in 2d



Schema dell'omniffusor







CATALISA WAVE°







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.



