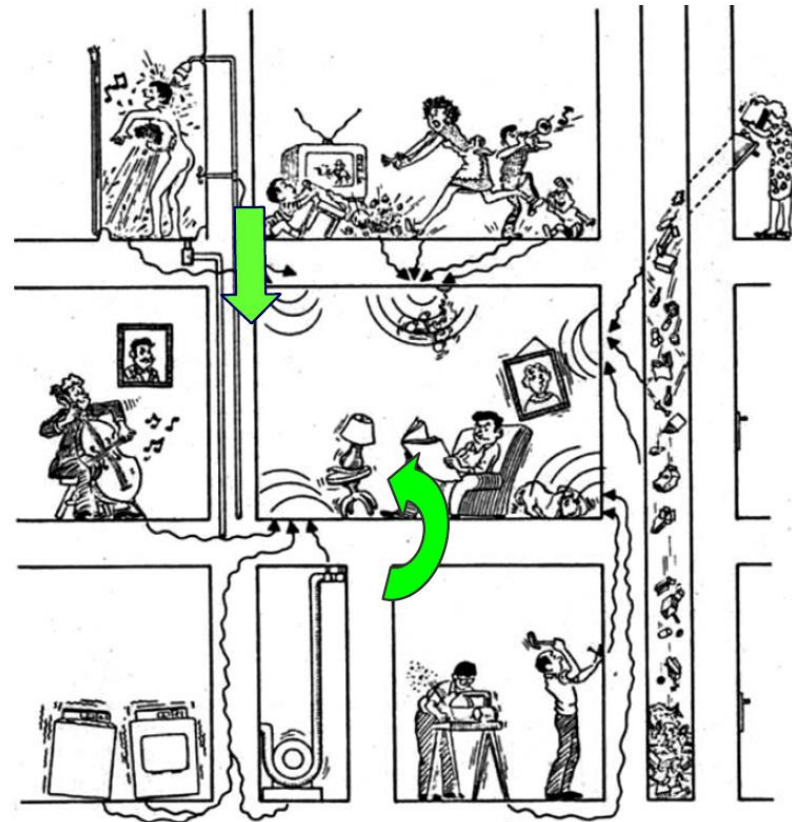


DESIGN DEL PRODOTTO INDUSTRIALE

FISICA TECNICA PER IL DESIGN

AA 2019-20

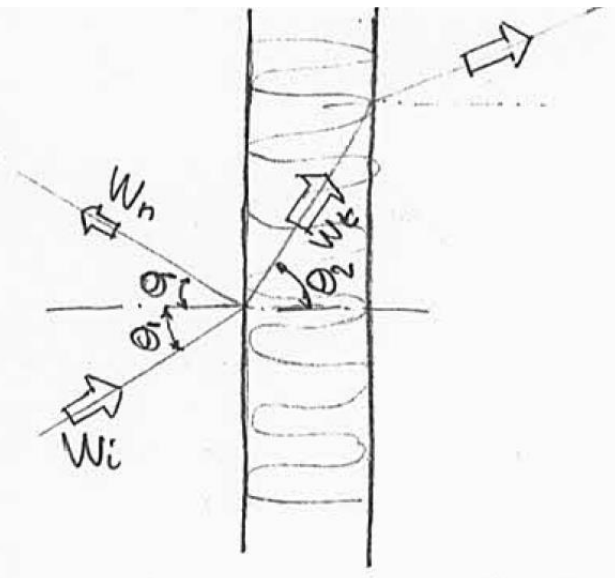
FONOASSORBIMENTO A.03



Michele Bottarelli - Dipartimento di Architettura di Ferrara
michele.bottarelli@unife.it

Riflessione (r) W_r
 Trasmissione (t) W_t
 Assorbimento = W_a

$$W_i = W_r + W_t + W_a$$



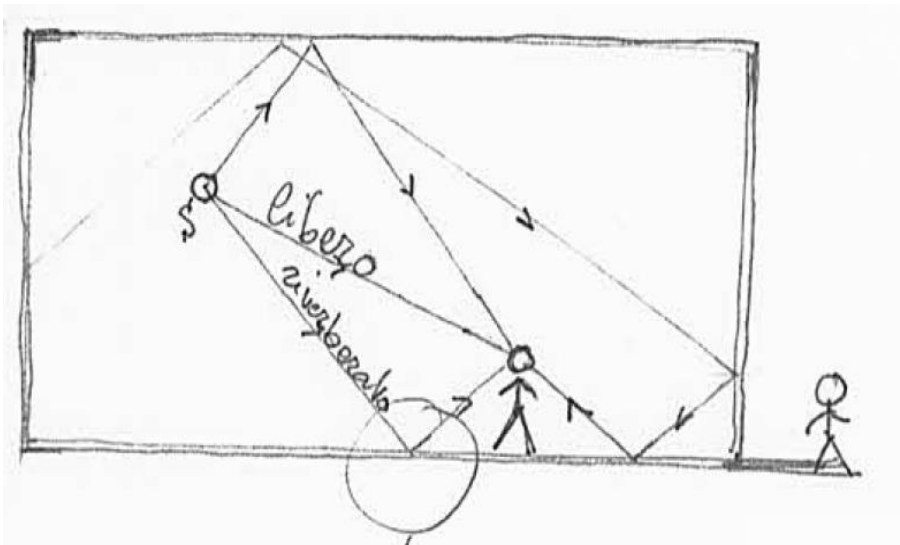
è chiamata apparente perché non considera W_t (lato sorgente)

α = coeff. di assorbimento ^{acustico} $T = \frac{W_a}{W_i}$
 r = coeff. di riflessione ^{acustico} $T = \frac{W_r}{W_i}$
 t = coeff. di trasmissione ^{acustico} $T = \frac{W_t}{W_i}$

α = coeff. di assorbimento acustico apparente = $1 - r = \frac{W_i - W_r}{W_i}$
 FONO ASSORBIMENTO (lato sorgente)

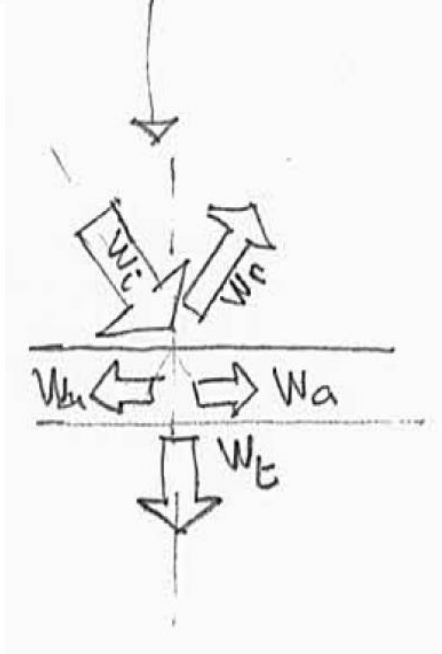
R = potere fonoisolante = $10 \lg \frac{1}{t} = 10 \lg \frac{W_i}{W_t} = 20 \lg(m') + 20 \lg(f) - 42,5$
 FONDISOLAMENTO (lato ricevente)
massa per unità di superficie [kg/m²]
frequenza

I materiali fonoassorbenti hanno bassa rigidità, bassa densità, elevata porosità
 I materiali fonoisolanti hanno alta rigidità, elevata densità, bassa porosità
 I primi li uso per attenuare il livello sonoro dal lato della sorgente, i secondi per schermare il ricevente. Se li combino ho un effetto doppio (Barriere acustiche).



libero cammino medio tra
due successive riflessioni

$$\frac{4V}{S}$$



$$W_i = W_r + W_a + W_t$$

↑ assorbiva
↓ incidente ↓ riflessa ↓ trasmessa

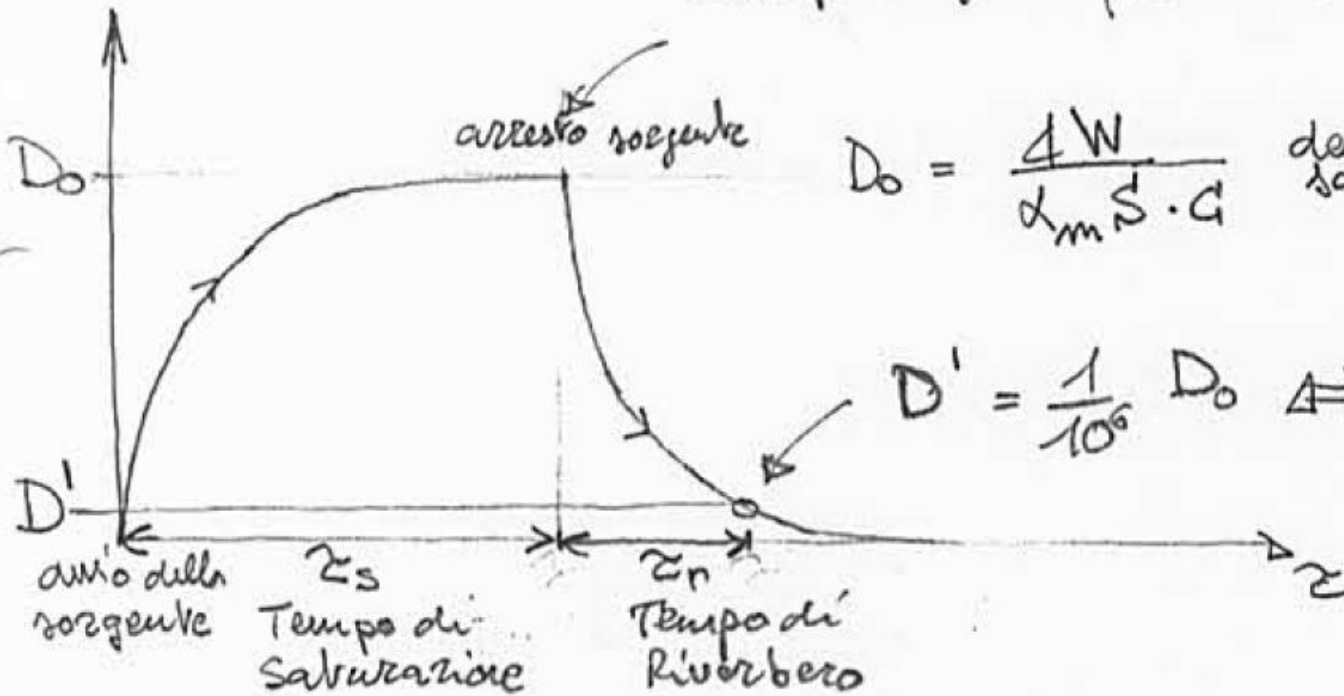
D = densità sonora

$$= \frac{E}{V} = \frac{I \cdot S \cdot dZ}{V} = \frac{p^2}{\rho c} \cdot \frac{S \cdot dZ}{S \cdot L}$$

per un'onda piana

$$= \frac{p^2}{\rho c^2} \quad (\text{val. comunque in tutti i casi})$$

Campo diffuso (senza direzioni privilegiate)



arresto sorgente

$$D_0 = \frac{4W}{\alpha_m S \cdot G}$$

densità di saturazione

$$D' = \frac{1}{10^6} D_0 \Leftrightarrow$$

calo di 60 dB

$$E = D \cdot V = I \cdot \Delta z \cdot S \Rightarrow \Delta z = \frac{DV}{IS}$$

in condizioni di saturazione
 $D = D_0$

$$= \frac{4W}{\alpha_m \cdot S \cdot C} \cdot \left(\frac{\alpha_m S}{W} \right) \frac{V}{S}$$

$$= \frac{4V}{S \cdot C}$$

Se interrompo la sorgente, detta r_m il coefficiente di riflessione media, ad ogni intervallo Δz , la densità sonora diventa:

$$D_{\Delta z} = D_0 \cdot r_m$$

$$D_{2\Delta z} = D_{\Delta z} \cdot r_m = (D_0 \cdot r_m) \cdot r_m$$

$$\vdots$$

$$D_{m\Delta z} = D_0 \cdot r_m^m$$

posto $z = m \cdot \Delta z \Rightarrow D_z = D_0 \cdot r_m^{\frac{z}{\Delta z}} = D_0 \cdot r_m^{z \cdot \frac{S \cdot C}{4V}}$

○ Wero:

$$\frac{D_z}{D_0} = \frac{I_z}{I_0} = r_m^{z \cdot \frac{S \cdot C}{4V}}$$

Si definisce τ_c = tempo caratteristico di riverbero, quel tempo per cui $\frac{D\tau_c}{D_0} = 10^{-6}$

$$\Rightarrow 10^{-6} = \Gamma_m \cdot \tau_c \frac{S_c}{4V}$$

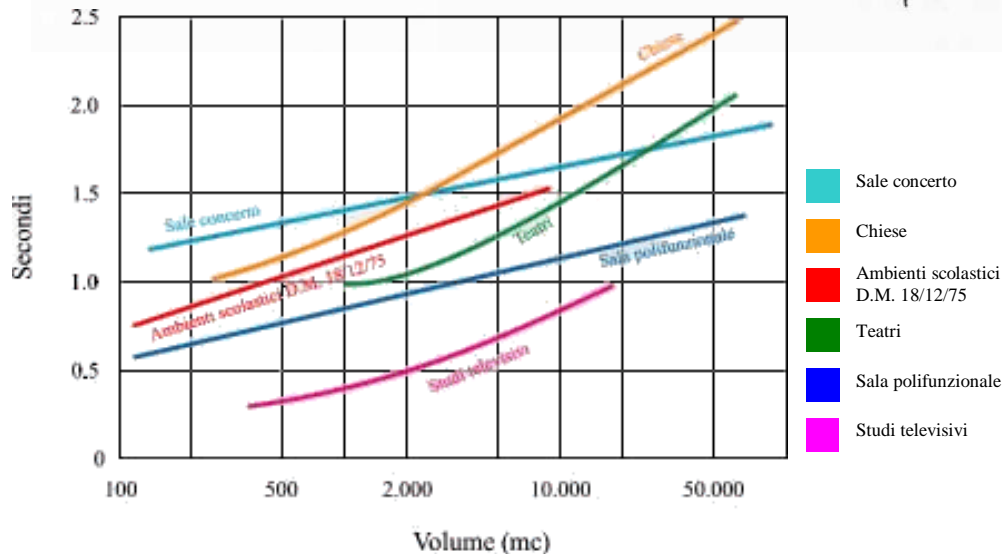
Ricordando che $\Gamma_m = 1 - \alpha_m$ e passando al logaritmo naturale:

$$\ln 10^{-6} = \ln (1 - \alpha_m) \tau_c \frac{S_c}{4V}$$

$$-13,82 = \tau_c \cdot \frac{S_c}{4V} \cdot \ln (1 - \alpha_m)$$

$$\Rightarrow \tau_c = - \frac{13,82 \cdot 4}{344} \cdot \frac{V}{S \cdot \ln(1 - \alpha_m)}$$

$$\Rightarrow \tau_c = - 0,16 \cdot \frac{V}{S \cdot \ln(1 - \alpha_m)}$$



$$\tau_r = -0,16 \cdot \frac{V}{\sum_i S_i \cdot \ln(1-d_i)}$$

Sviluppando in serie il logaritmo:

$$\ln(1-d_i) \stackrel{\downarrow}{=} -\left(d - \frac{d^2}{2} + \frac{d^3}{3} + \dots\right) \stackrel{\approx}{=} -d$$

quando d è piccolo

Formula di Eyring

Sviluppando in serie di Conway

$$\Rightarrow \tau_r = 0,16 \cdot \frac{V}{\sum_i d_i S_i}$$

Formula di Sabine

Si può porre $d_m = \text{coeff. di assorbimento acustico apparente medio}$

$$\downarrow \frac{\sum_i d_i S_i}{\sum_i S_i} \quad (\text{media pesata})$$

diviene affidabile se il volume ha dimensioni abbastanza simili e quando

$$d_m < 0,2 \div 0,3$$

$\Rightarrow R = \text{costante d'ambiente}$

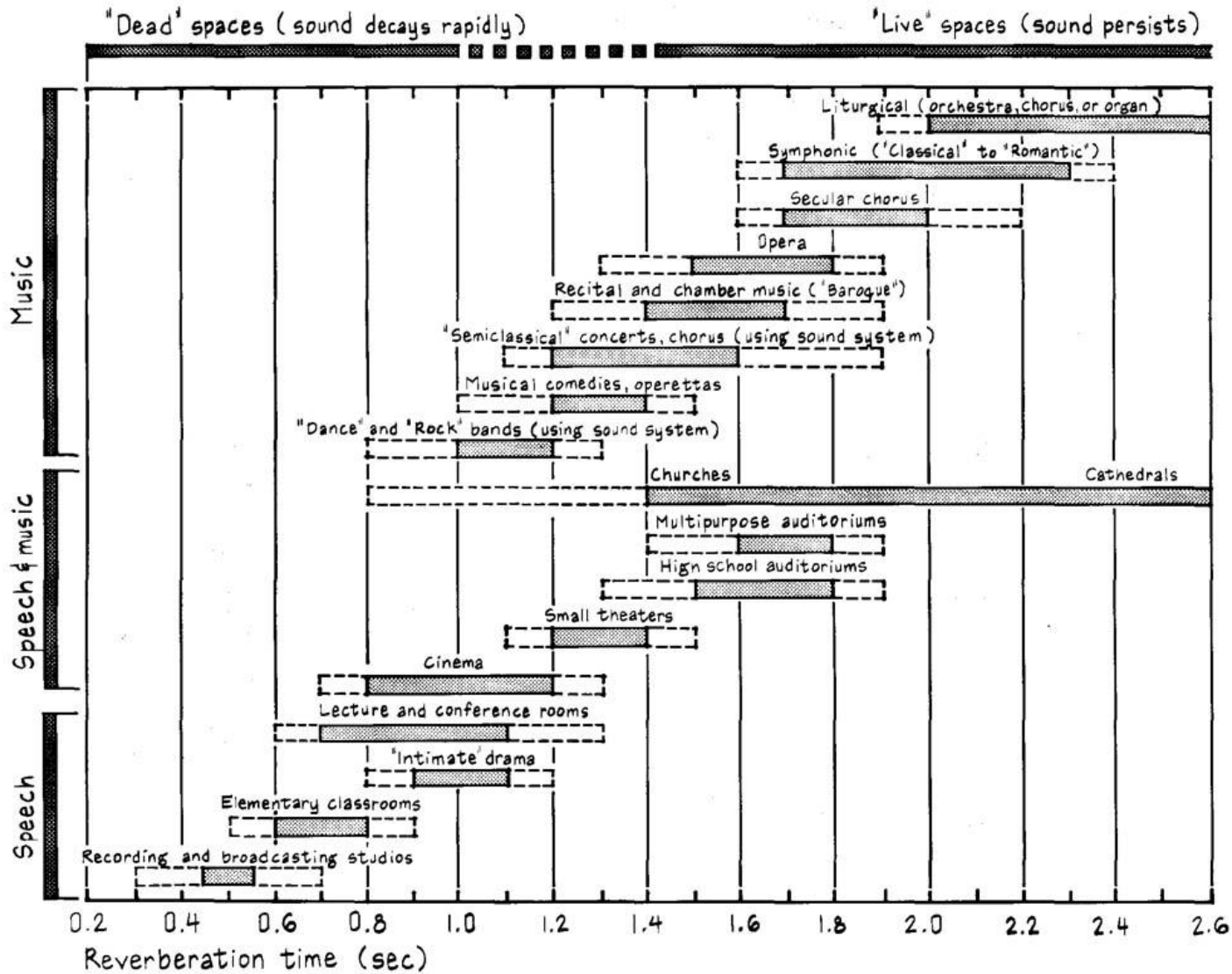
$$= \frac{d_m \cdot S}{1 - d_m}$$

Wallace Clement Sabine
(1868 - 1919)



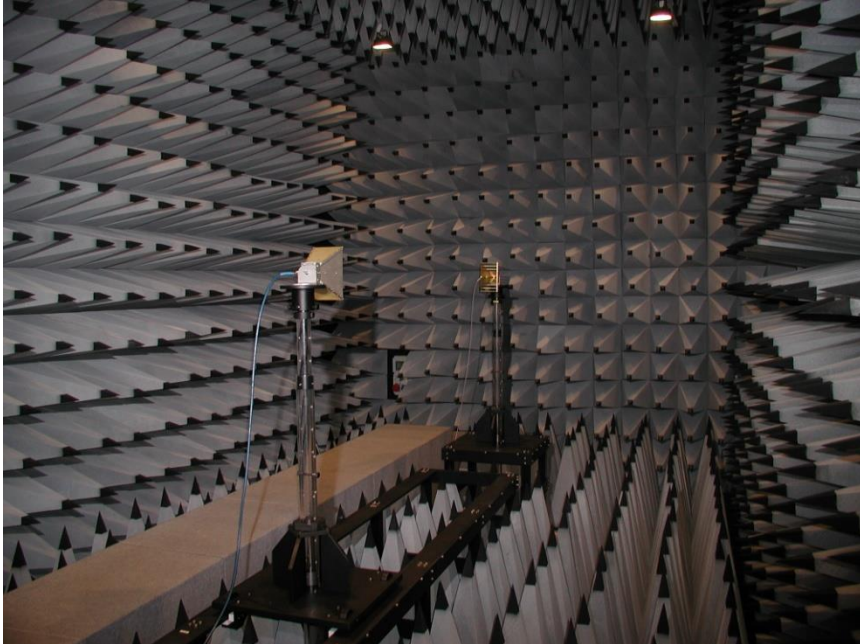
	Sabine	Millington	Eyring
Absorption coefficients	$\bar{\alpha} < 0.2$	$\bar{\alpha} \geq 0.2$ and $\alpha_{i,f}$ do not $\rightarrow 1$	$\bar{\alpha} \geq 0.2$
Equivalent area of the boundaries A_f^{Bound}	$\sum_i^{bound} (S_i \cdot \alpha_{i,f})$	$\sum_i^{bound} \left(S_i \cdot \ln\left(\frac{1}{1 - \alpha_{i,f}}\right) \right)$	$-S \cdot \ln \left\{ 1 - \sum_i^{bound} \frac{S_i \cdot \alpha_{i,f}}{S} \right\}$
<p>where</p> <p>S_i area of surface i [m²]</p> <p>$\alpha_{i,f}$ Sabine absorption coefficient of surface i at frequency f</p>			

<http://www.esru.strath.ac.uk/Courseware/Acoustic/aco.htm>



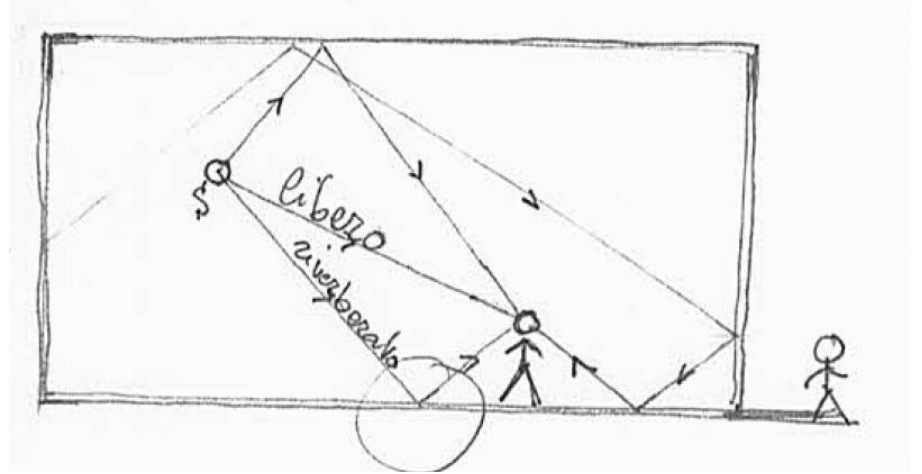
$$\begin{aligned} \text{Caso senza materiale in prova} &: \tau^0 = 0,16 \cdot \frac{V}{\sum \alpha_i S_i} \Rightarrow \sum \alpha_i S_i = 0,16 \cdot \frac{V}{\tau^0} \\ \text{Caso con materiale in prova} &: \tau^1 = 0,16 \cdot \frac{V}{\sum \alpha_i S_i + \alpha S} \Rightarrow \sum \alpha_i S_i + \alpha S = 0,16 \cdot \frac{V}{\tau^1} \\ \Rightarrow \alpha &= 0,16 \cdot \frac{V}{S} \cdot \left(\frac{1}{\tau^1} - \frac{1}{\tau^0} \right) \end{aligned}$$

$$\alpha S = 0,16 V \left(\frac{1}{\tau^1} - \frac{1}{\tau^0} \right)$$



R = costante d'ambiente

$$= \frac{d_{nm} \cdot S}{1 - d_{nm}}$$



Si dimostra* che:

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

costante d'ambiente

$$\frac{d_{nm} \cdot S}{1 - d_{nm}}$$

incide sul campo
diffuso (suono riverberato)

$2^m = \begin{matrix} \rightarrow 2 \\ \rightarrow 4 \\ \rightarrow 8 \end{matrix}$ Direzione

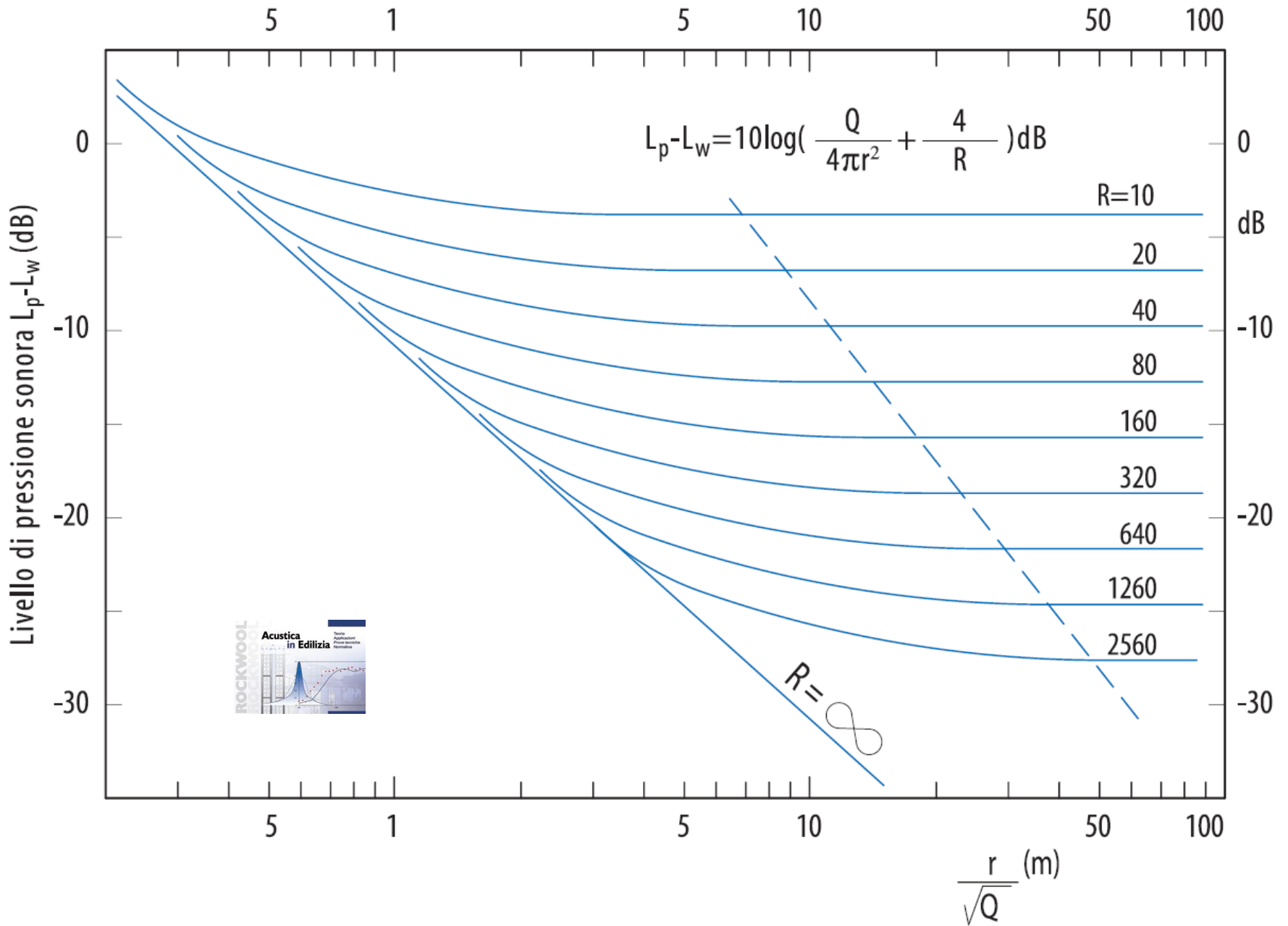
intensità percipita

I

$$\frac{W}{4\pi r^2}$$

intensità sferica
di campo aperto

incide sul campo
libero (suono diretto)



La condizione per cui le due componenti hanno la medesima intensità è

$$\frac{A}{R} = \frac{Q}{4\pi r_c^2} \Leftrightarrow r_c = \sqrt{\frac{Q \cdot R}{16 \pi}}$$

= raggio critico

Quando nell'ambiente mi trovo a $d \ll r_c$:

- + il suono è detto secco (campo libero)
- + il livello sonoro diminuisce ad ogni raddoppio della distanza di 6 dB
- + il suono riverberato arriva dopo con intensità inferiore (eco)

Quando nell'ambiente mi trovo a $d \gg r_c$:

- + il livello sonoro varia poco con la distanza
- + il suono riverberato è più forte di quello diretto (cola sonora)

Se in un ambiente modifico la superficie, modifico la sua costante d'ambiente R.

$$L_p^1 = L_w + 10 \lg \left(\frac{A}{R_1} + \frac{Q}{4\pi R_1^2} \right)$$

$$L_p^2 = L_w + 10 \lg \left(\frac{A}{R_2} + \frac{Q}{4\pi R_2^2} \right)$$

$$L_p^1 - L_p^2 = 10 \lg \left(\frac{\frac{A}{R_1} + \frac{Q}{4\pi R_1^2}}{\frac{A}{R_2} + \frac{Q}{4\pi R_2^2}} \right)$$

dove

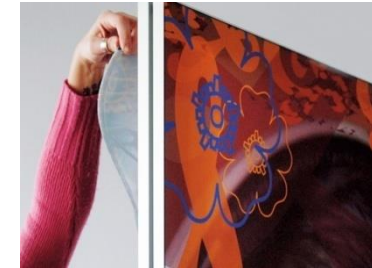
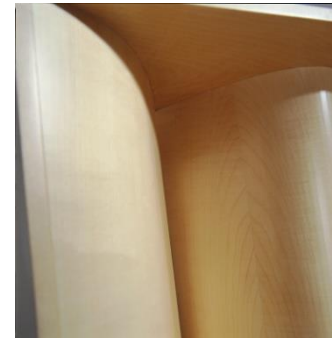
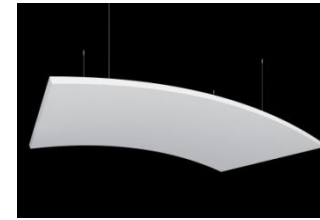
$$R_J = \frac{\alpha_m^J S}{1 - \alpha_m^J}$$

et

$$\alpha_m^J = \frac{\sum_{i=1}^N \alpha_i^J S_i}{\sum_{i=1}^N S_i}$$

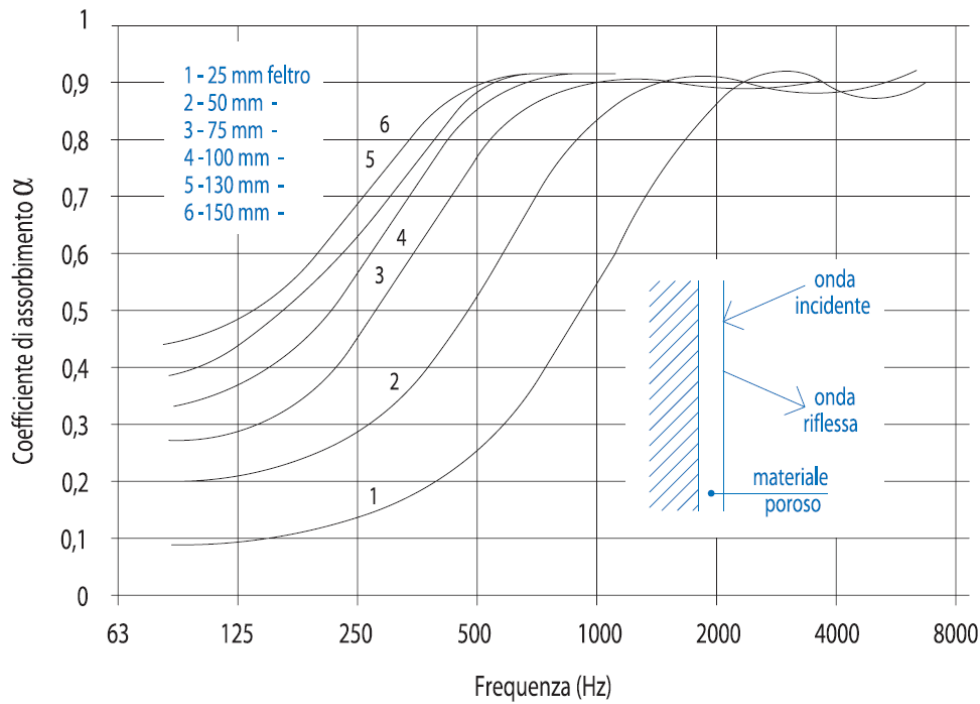
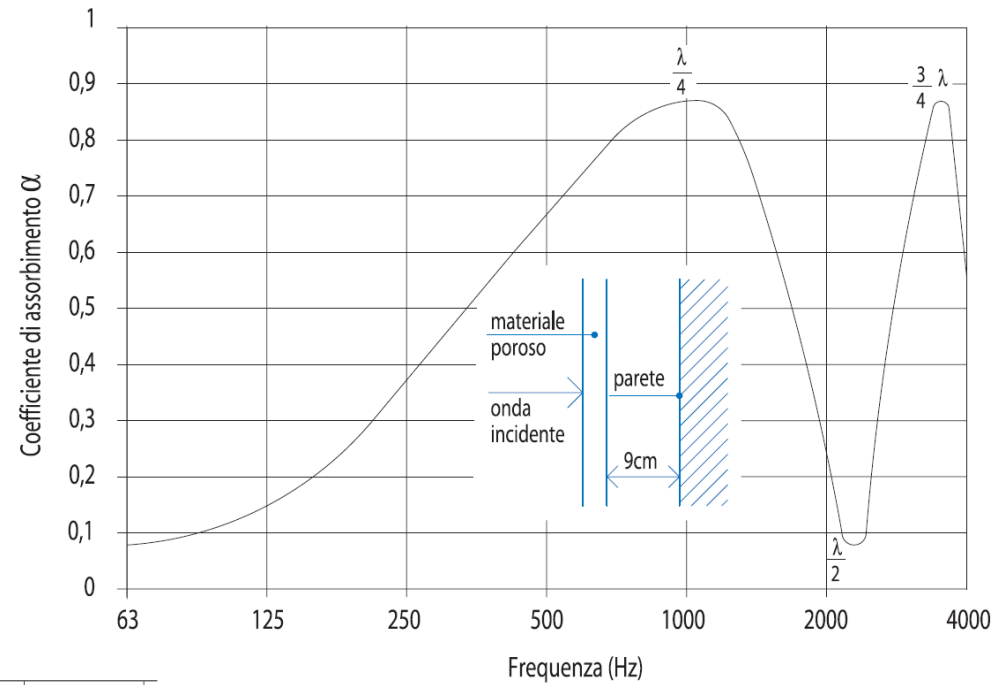
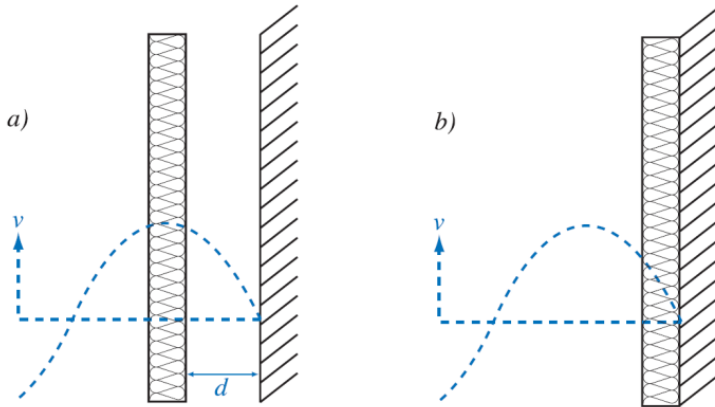
Se nel passare dalla condizione "1" alla "2", aumento mediamente gli α_i^J , aumenta $\alpha_m^J \Rightarrow$ aumenta $R_J \Rightarrow$ diminuisce L_p^J

MATERIALE	Spessore mm (compreso eventuale intercapedine)	FREQUENZA					
		125	250	500	1000	2000	4000
a) Superfici interne correnti							
Infonaco normale	15	0,03	0,04	0,04	0,03	0,05	0,08
Muratura di mattoni		0,05	0,04	0,02	0,04	0,05	0,05
Calcestruzzo		0,01	0,01	0,02	0,02	0,02	0,03
Lastra di vetro di finestra	2	0,30	0,20	0,15	0,10	0,07	0,04
Lastra di vetro di infisso	4	0,35	0,25	0,20	0,10	0,05	0,05
Lastra di vetro di infisso	6	0,15	0,06	0,04	0,03	0,02	0,02
Lastra di vetro aderente a parete		0,03	0,03	0,02	0,02	0,02	0,02
Marmo o piastrelle vetrificate		0,05	0,05	0,05	0,05	0,05	0,05
Bocchette di ventilazione		0,15	0,20	0,50	0,35	0,30	0,20
b) Rivestimenti di pareti e soffitti							
Soffitto sospeso in gesso liscio		0,25	0,20	0,10	0,07	0,05	0,10
Infonaco acustico (valori medi)	15	0,10	0,15	0,20	0,25	0,30	0,35
Tende leggere appese a pieghe		0,05	0,06	0,10	0,18	0,30	0,40
Tende pesanti appese a pieghe		0,08	0,10	0,15	0,25	0,40	0,50
Pannelli di fibre di vetro o di roccia (media densità)	25	0,10	0,35	0,60	0,70	0,75	0,80
	50	0,20	0,45	0,65	0,75	0,80	0,80
	100	0,45	0,75	0,80	0,85	0,85	0,90
Schiuma di poliuretano espanso a cellule aperte	25	0,15	0,30	0,60	0,75	0,85	0,90
	50	0,25	0,50	0,85	0,95	0,90	0,90
	100	0,50	0,70	0,95	0,95	0,98	0,98
Lastra di legno di 6 mm, su listelli, con intercapedine d'aria di 75 mm e pannello in fibra di vetro di 25 mm	81	0,60	0,30	0,10	0,09	0,09	0,09
Lastra di legno di 12 mm su listelli, con intercapedine d'aria di 60 mm, e pannello in fibra di vetro di 60 mm	72	0,30	0,20	0,15	0,10	0,15	0,10
Masonite di 3 mm, con rivestimento in feltro di 50 mm	53	0,90	0,45	0,25	0,15	0,10	0,10
c) Pavimenti							
Battuto di cemento o marmette		0,05	0,05	0,05	0,05	0,05	0,05
Legno (parquet)	10	0,04	0,05	0,07	0,10	0,10	0,10
Gomma (piastrelle)	6	0,05	0,05	0,10	0,10	0,05	0,05
Moquette a pelo raso su feltro	6	0,05	0,05	0,10	0,20	0,45	0,65
Moquette a pelo medio su gomma piuma	10	0,05	0,10	0,30	0,50	0,65	0,70
Tappeti (valori medi)		0,10	0,13	0,20	0,30	0,25	0,25
Linoleum		0,02	0,02	0,03	0,03	0,04	0,04
d) Sedili e persone (valori in m² di unità di assorbimento per capo)							
Sedia in legno o parzialmente imbottita non occupata		0,03	0,05	0,05	0,10	0,15	0,10
Sedia in legno parzialmente imbottita occupata		0,15	0,25	0,40	0,40	0,45	0,40
Poltroncina imbottita non occupata		0,10	0,20	0,30	0,30	0,30	0,35
Poltroncina imbottita occupata		0,20	0,40	0,45	0,45	0,50	0,45
Persona seduta o in piedi		0,15	0,30	0,40	0,40	0,45	0,40



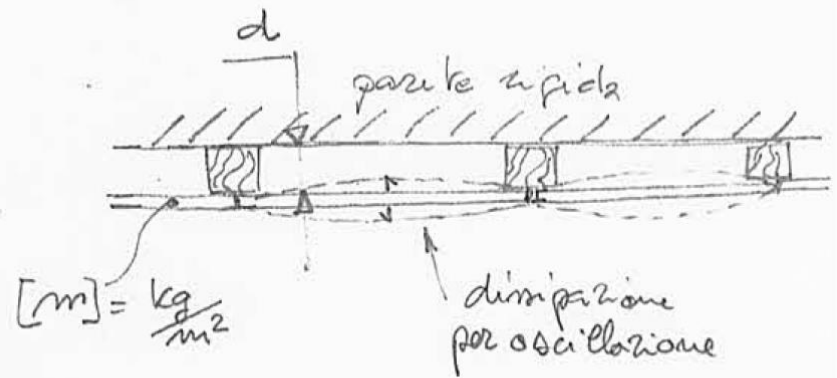


Elemento Costruttivo	125	250	500	1000	2000	4000
Muratura in mattoni grezza (a vista)	0,02	0,02	0,03	0,04	0,05	0,07
Muratura in calcestruzzo grezzo (a vista)	0,01	0,01	0,02	0,02	0,02	0,03
Parete intonacata	0,01	0,01	0,02	0,02	0,03	0,03
Intonaco in cemento rustico	0,02	0,02	0,03	0,03	0,04	0,04
Intonaco di gesso	0,02	0,02	0,03	0,03	0,03	0,03
Lastra di vetro o specchio	0,03	0,02	0,02	0,02	0,02	0,02
Marmo lucidato a parete o a pavimento	0,01	0,01	0,01	0,02	0,02	0,02
Parquet incollato	0,02	0,03	0,04	0,05	0,05	0,10
Parquet su listelli di legno	0,20	0,15	0,10	0,10	0,09	0,07
Pavimento in ceramica	0,01	0,01	0,02	0,02	0,03	0,03
Pavimento in linoleum	0,02	0,02	0,03	0,03	0,04	0,04
Moquette su cemento	0,05	0,08	0,21	0,26	0,27	0,30
Pavimento in gomma	0,04	0,04	0,06	0,08	0,08	0,06
Vetro piano pesante in grandi pannelli	0,18	0,06	0,04	0,03	0,02	0,02
Finestre chiuse	0,10	0,04	0,03	0,02	0,02	0,02
Porta in legno tradizionale	0,12	0,11	0,10	0,09	0,08	0,07
Bocchette di ventilazione e simili	0,15	0,20	0,30	0,35	0,30	0,20
Tendaggi in cotone a parete non drappeggiati 300 g/m ²	0,03	0,05	0,10	0,15	0,25	0,30
Tendaggi in velluto sottile poco drappeggiato	0,08	0,30	0,50	0,50	0,60	0,60
Tendaggi in velluto pesante fortemente drappeggiati	0,50	0,50	0,70	0,90	0,90	0,90
Tappeto pesante	0,10	0,20	0,25	0,30	0,30	0,30
Soffitto sospeso in gesso liscio	0,25	0,20	0,10	0,05	0,05	0,10
Perlinato inchiodato	0,60	0,30	0,10	0,09	0,09	0,09
Materiali fonoassorbenti	125	250	500	1000	2000	4000
Intonaco acustico sp. 12 mm	0,10	0,15	0,20	0,25	0,30	0,35
Pannelli in fibra di vetro (fibre 6 µm, 10 Kg/m ³ , 25 mm)	0,09	0,29	0,55	0,68	0,80	0,72
Pannelli in fibra di vetro (fibre 6 µm, 10 Kg/m ³ , 50 mm)	0,19	0,63	0,84	0,82	0,83	0,84
Pannelli in fibra di vetro (fibre 6 µm, 20 Kg/m ³ , 25 mm)	0,09	0,24	0,49	0,72	0,69	0,79
Pannelli in fibra di legno mineralizzate accostato alla parete	0,15	0,25	0,40	0,51	0,51	0,40
Sughero, 80 Kg/m ³ , pannello 20 mm, incollato alla parete	0,06	0,04	0,06	0,19	0,23	0,24
Sedili e persone in m ² di unità di assorbimento per capo	125	250	500	1000	2000	4000
Sedia in legno o parzialmente imbottita libera	0,03	0,05	0,05	0,10	0,15	0,10
Sedia in legno o parzialmente imbottita occupata	0,15	0,25	0,40	0,40	0,45	0,40
Poltrona imbottita non occupata	0,10	0,20	0,30	0,30	0,30	0,35
Poltrona imbottita occupata	0,20	0,40	0,45	0,45	0,50	0,45
Persona adulta in piedi	0,23	0,32	0,42	0,42	0,46	0,46



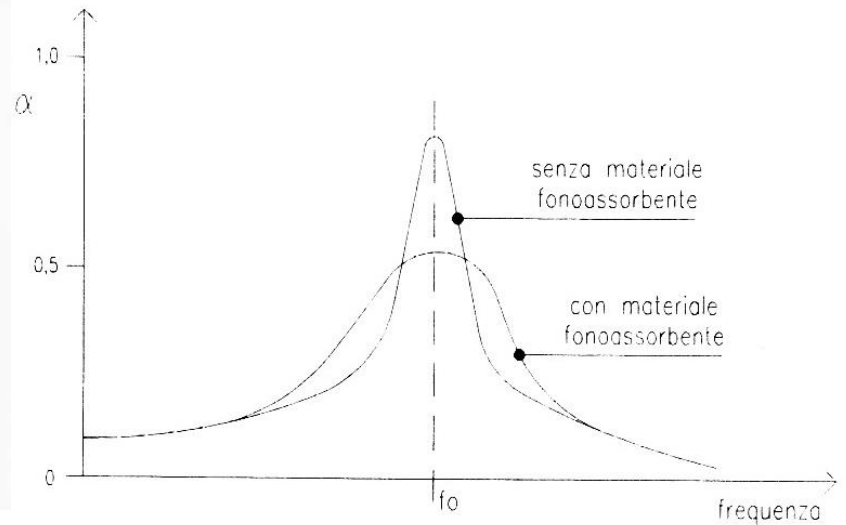
Pannelli vibranti

$f_0 =$ frequenza di risonanza
 \downarrow
 velocità suono
 $\frac{c}{2\pi} \cdot \sqrt{\frac{\sigma_s}{m \cdot d}}$
 \uparrow coeff. di Poisson del pannello
 \uparrow massa superficiale
 \uparrow spessore camera d'aria



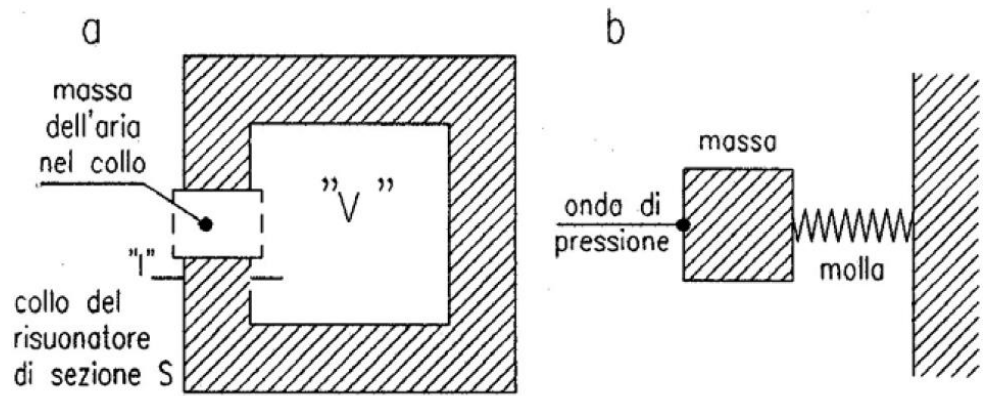
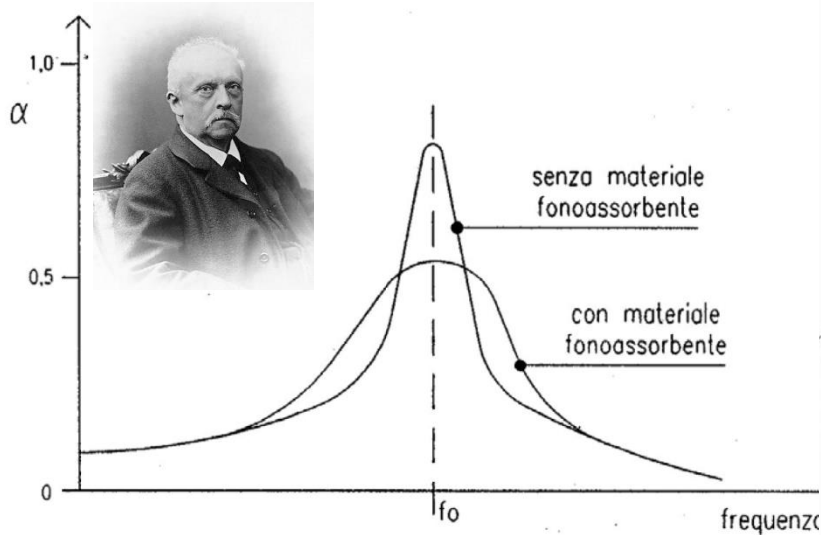
Un'altra formula più semplice è : $f_0 = \frac{60}{\sqrt{m \cdot d}}$

Anche in questo caso si parla di elevata selettività che, per essere diminuita, necessita dell'inserimento di materiale fonoassorbente





Hermann von Helmholtz

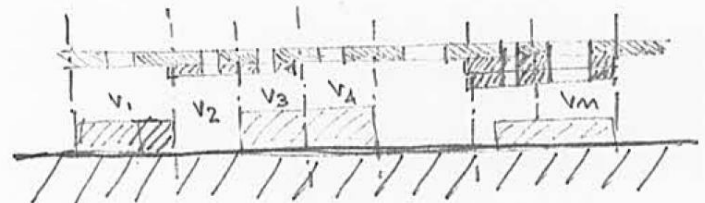


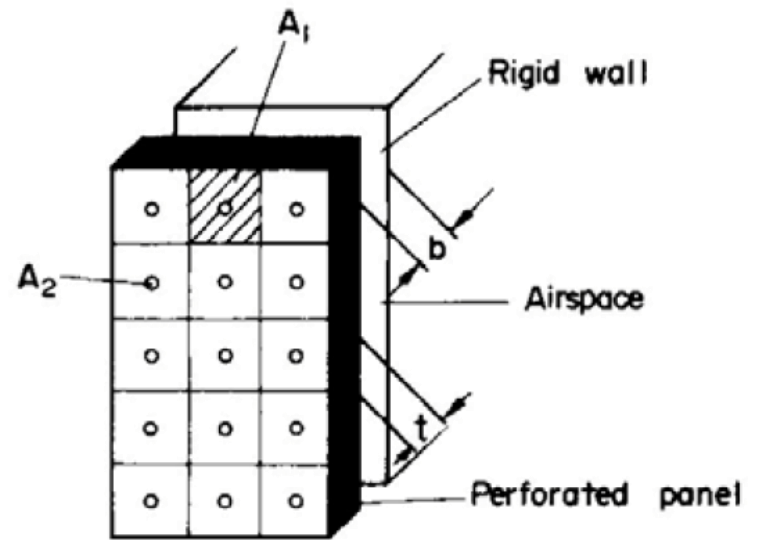
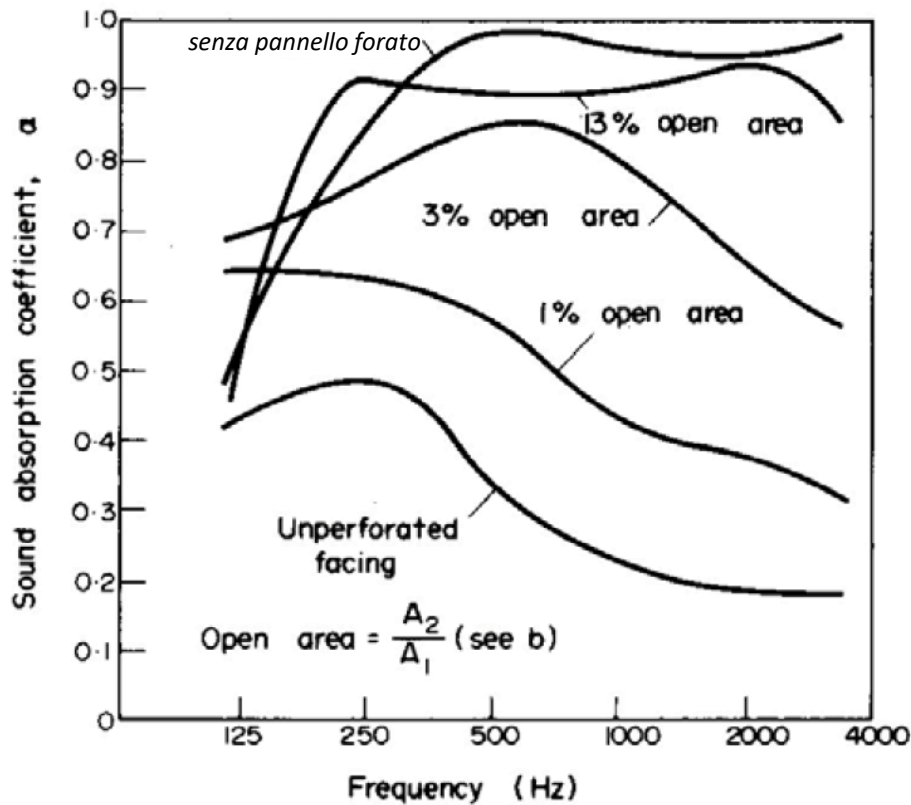
$$f_0 = \text{frequenza di risonanza}$$

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

È un sistema per aumentare l'assorbimento acustico in parete. Funziona in modo molto selettivo, allora si rimanda in parte all'efficienza per aumentare la banda di lavoro, attraverso l'inserimento di materiale fono assorbente all'interno della cavità.

Distribuyendo più fori lungo una parete, ottengo un risonatore multiplo





$$f_0 = \frac{c_0}{2\pi} \sqrt{\frac{A_2}{A_1} \cdot \frac{1}{(t + 2\Delta t) \cdot b}}$$

dove: V è il volume d'aria contenuto nell'intercapedine, t lo spessore del pannello, e $2\Delta t$ è un fattore di correzione pari a $\pi r/2$ per una foratura di raggio r . Il significato degli altri simboli è indicato in figura.



