



Università degli studi di Bologna
Facoltà di Ingegneria

**49498 - Acustica Applicata e
Illuminotecnica L (A-K)**

Dispensa n. 6

ASSORBIMENTO E TRASMISSIONE DEL SUONO

Docente: Paolo Guidorzi

Rev. 9 gennaio 2008



Università degli studi di Bologna

49498 - ACUSTICA APPLICATA E
ILLUMINOTECNICA L (A-K)
Ing. Paolo Guidorzi

Indice

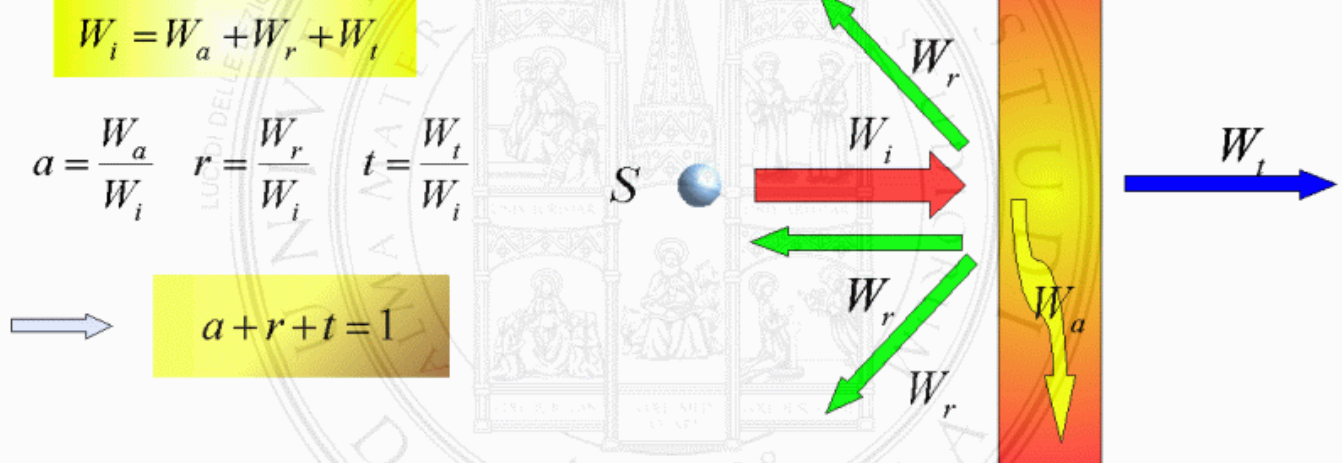
ASSORBIMENTO E TRASMISSIONE DEL SUONO

Pag. 2

- 1 - Introduzione
- 2 - Il coefficiente di assorbimento acustico apparente
- 3 - Materiali fonoassorbenti
- 4 - Materiali fonoassorbenti porosi
- 5 - Il risonatore di Helmholtz
- 6 - I pannelli forati
- 7 - I pannelli vibranti
- 8 - Misura del coeff. di assorbimento con vari metodi
- 9 - Misura nel tubo a onde stazionarie
- 10 - Misura in camera riverberante
- 11 - Misura con metodo a riflessione
- 12 - Il potere fonoisolante
- 13 - La legge di massa
- 14 - Deviazioni dalla legge di massa
- 15 - La frequenza di risonanza
- 16 - La frequenza critica
- 17 - Risonanza di una cavità
- 18 - Pareti doppie
- 19 - Misura in laboratorio del potere fonoisolante
- 20 - Misura in opera del potere fonoisolante
- 21 - Pareti composte - Elementi in parallelo
- 22 - Livello di rumore da calpestio

INTRODUZIONE

Studiamo ora cosa accade quando un'onda sonora quando incide su un materiale. Una parte dell'energia dell'onda incidente è riflessa, una parte è assorbita e una parte è trasmessa.



Si sono così definiti i coefficienti di assorbimento, riflessione e trasmissione. Le stesse definizioni potevano essere date in termini di intensità acustica incidente, riflessa e trasmessa

COEFFICIENTE DI ASSORBIMENTO ACUSTICO APPARENTE

Si definisce il **coefficiente di assorbimento acustico apparente**:

$$\alpha = a + t = 1 - r$$

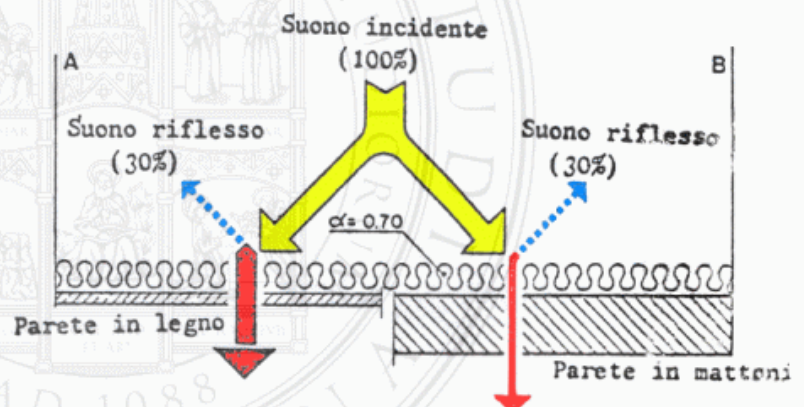
“Alfa” fisicamente include sia il contributo di energia assorbita dal materiale che il contributo di energia trasmessa, ovvero comprende tutto ciò che non è riflesso (1-r), da cui “apparente”.

Alcuni esempi:

$r = 0$; $\alpha = 1$;
 materiale perfettamente assorbente
 Es: finestra aperta (assorbitore ideale).

Materiali con alto α : materiali porosi,
 lana di roccia, lana di vetro, poliuretano
 espanso

$r = 1$; $\alpha = 0$;
 materiale perfettamente riflettente
 Es: parete liscia di materiale duro.



AI FINI DELLA VALUTAZIONE DELL'ASSORBIMENTO ACUSTICO NON INTERESSA SAPERE SE L'ENERGIA E' STATA TRATTENUTA DALLA PARETE O TRASMESSA, MA SOLTANTO QUANTA ENERGIA NON VIENE RIFLESSA!

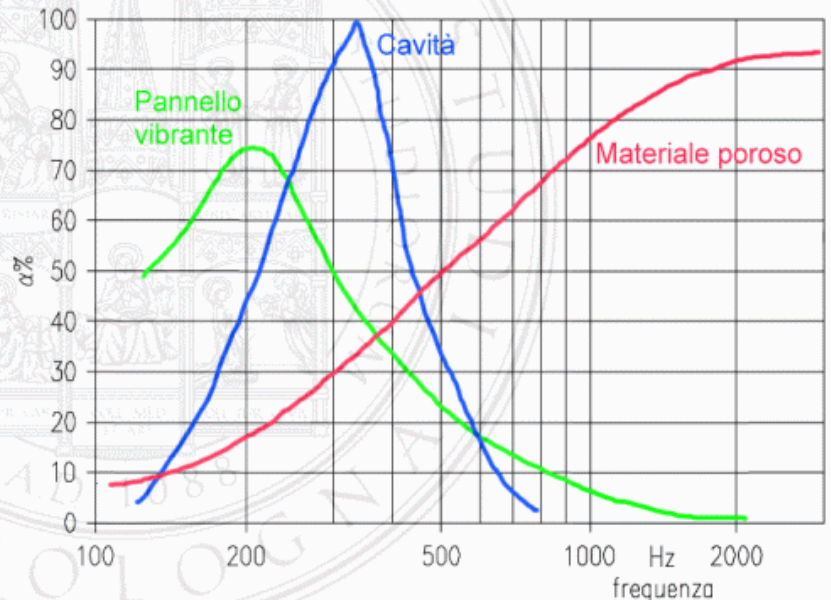
MATERIALI FONOASSORBENTI

I materiali assorbenti sono utilizzati nei trattamenti acustici degli ambienti chiusi, per ridurre il tempo di riverberazione ed eliminare riflessioni indesiderate, all'interno di pareti divisorie come smorzatori e per ridurre le risonanze.

Si possono dividere in alcune categorie:

- materiali porosi
- risonatori di Helmholtz o cavità
- pannelli vibranti

Essendo diversi i principi fisici alla base di ognuno di questi tipi di materiali fonoassorbenti, si ha un'efficienza maggiore in diversi ambiti di frequenze per ogni diversa tipologia.



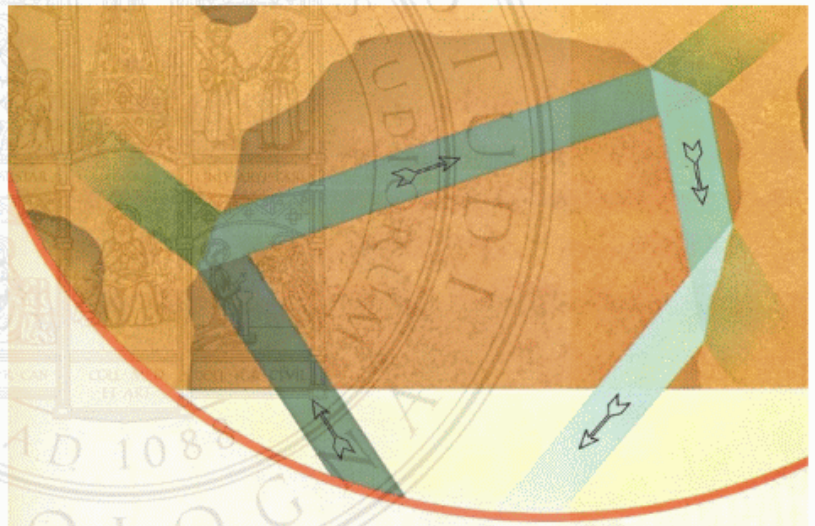
MATERIALI FONOASSORBENTI POROSI

Il meccanismo di assorbimento del suono dei materiali porosi consiste nella trasformazione di energia sonora in calore. Esso dipende da:

- dissipazione viscosa nelle cavità d'aria
- attrito tra le fibre in vibrazione

Le particelle di aria vibrano nei pori e canali di collegamento, perdendo energia per effetto dell'attrito contro le superfici esterne delle fibre.

In generale pori paralleli alla direzione di flusso implicano minore assorbimento



I parametri che influiscono sull'assorbimento acustico di un materiale fibroso sono i seguenti:

- Diametro delle fibre $Es: d = 2 - 5 \mu m$ (lana minerale)
- Orientamento delle fibre
- Densità del materiale $Es: \rho = 30 \sim 100 \text{ kg} / \text{m}^3$ (lana minerale)
- Spessore del pannello
- Porosità $h = \frac{V_{pori}}{V_{tot}}$ $h = 90 \sim 95\%$ (lana minerale)

La porosità è uno scalare ed è definita come il rapporto tra il volume dei vuoti (pori) e il volume totale del materiale in esame.

In particolare, ha un ruolo essenziale la resistenza al flusso (ISO 9053 (1991) – UNI EN 29053):

- Resistenza al flusso

$$R = \frac{\Delta p}{Q_v} \quad [R] = \frac{\text{Pa} \cdot \text{s}}{\text{m}^3} = \frac{\text{kg}}{\text{m}^4 \cdot \text{s}}$$

La resistenza al flusso è definita come rapporto tra la differenza di pressione che si genera ai capi di un provino di materiale attraversato da un flusso d'aria e la portata del flusso stesso. Essa esprime la resistenza che un flusso d'aria incontra nel passaggio **attraverso** il materiale. Esiste un legame molto stretto tra questo parametro e l'assorbimento acustico. In generale la resistenza al flusso aumenta direttamente con densità e spessore del materiale e inversamente con il diametro delle fibre.

$$[Pa] = \frac{N}{\text{m}^2} = \frac{\text{kg} \cdot \frac{\text{m}}{\text{s}^2}}{\text{m}^2} = \frac{\text{kg}}{\text{m} \cdot \text{s}^2} \quad [R] = \frac{\frac{\text{kg}}{\text{m} \cdot \text{s}^2} \cdot \text{s}}{\text{m}^3} = \frac{\text{kg}}{\text{m}^4 \cdot \text{s}}$$

Si definiscono anche:

- Resistenza al flusso specifica

$$R_s = R \cdot A = \frac{\Delta p}{u}$$

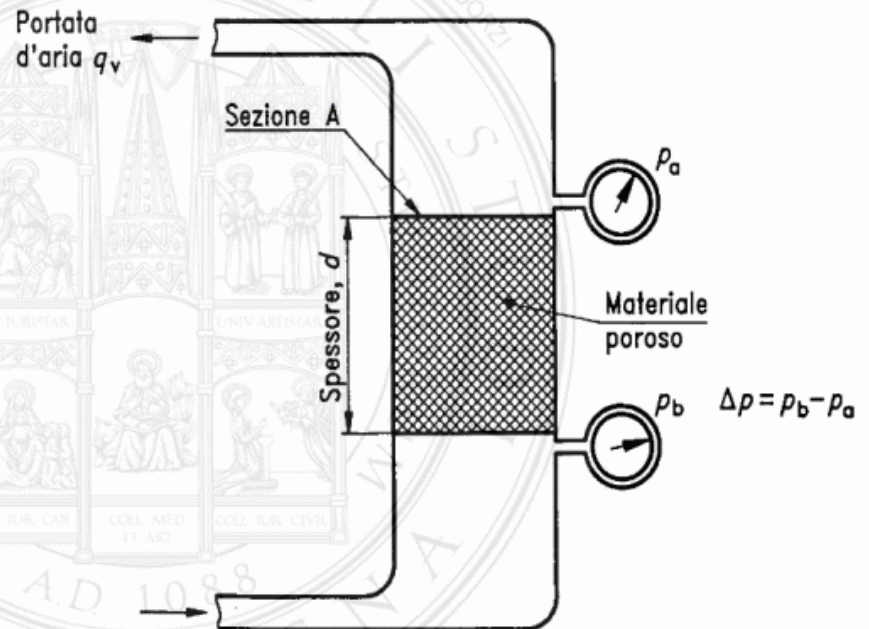
$$[R_s] = \frac{Pa \cdot s}{m} = \frac{kg}{m^2 \cdot s} = rayl$$

- Resistività al flusso

$$r = \frac{R_s}{d} = \frac{\Delta p}{u \cdot d} = \sigma$$

$$[r] = \frac{Pa \cdot s}{m^2} = \frac{kg}{m^3 \cdot s} = \frac{rayl}{m}$$

$$u = \frac{Q_v}{A} \quad [u] = \frac{m}{s} \quad (\text{velocità lineare del flusso})$$



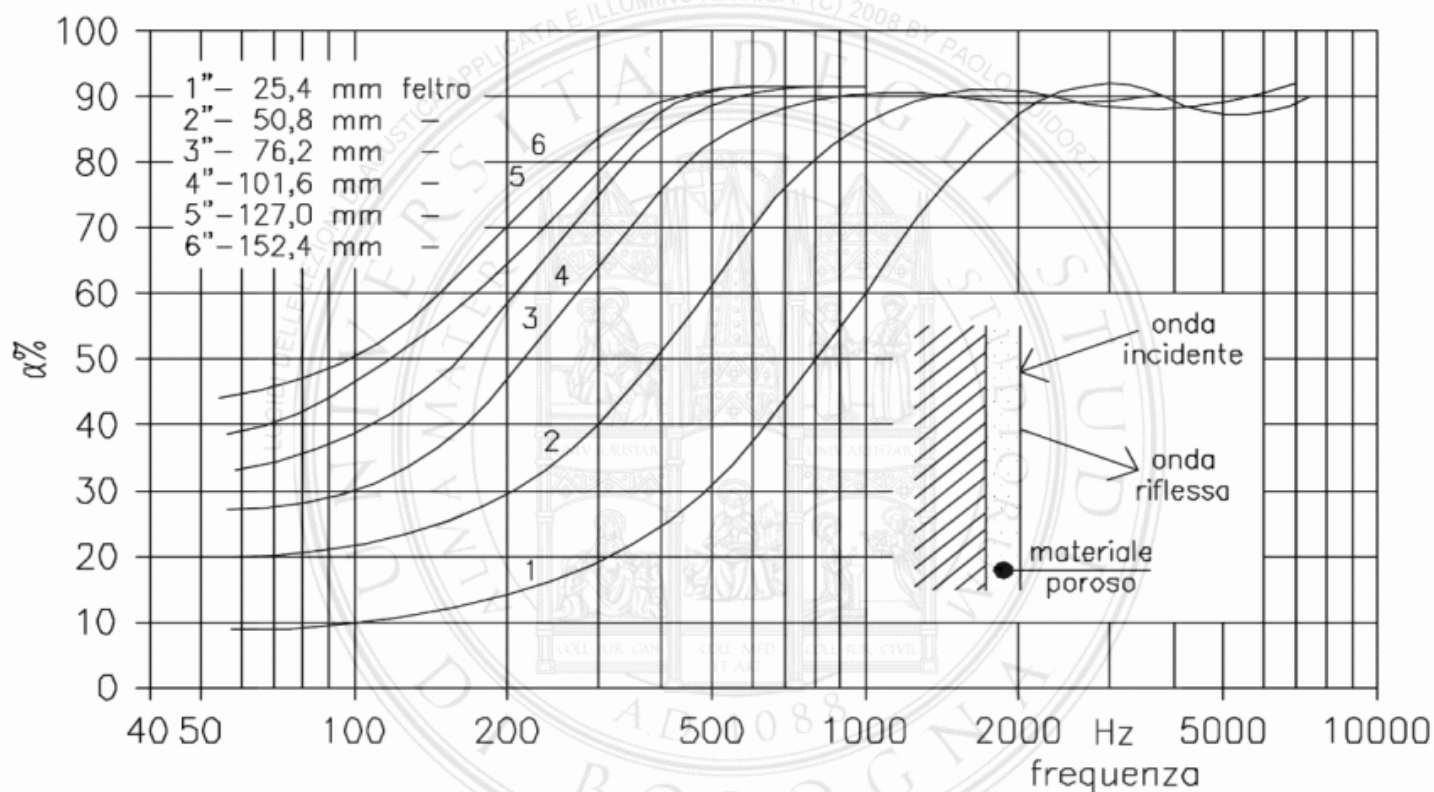
A partire dalla resistività al flusso e da altri parametri fisici caratteristici del materiale sono stati elaborati modelli matematici per la previsione del coefficiente di assorbimento (per incidenza normale) di un materiale fibroso (il più famoso è quello elaborato da Delany & Bazley).

- Il coefficiente di assorbimento di un materiale poroso varia con la **frequenza** e con l'**angolo di incidenza** del suono.

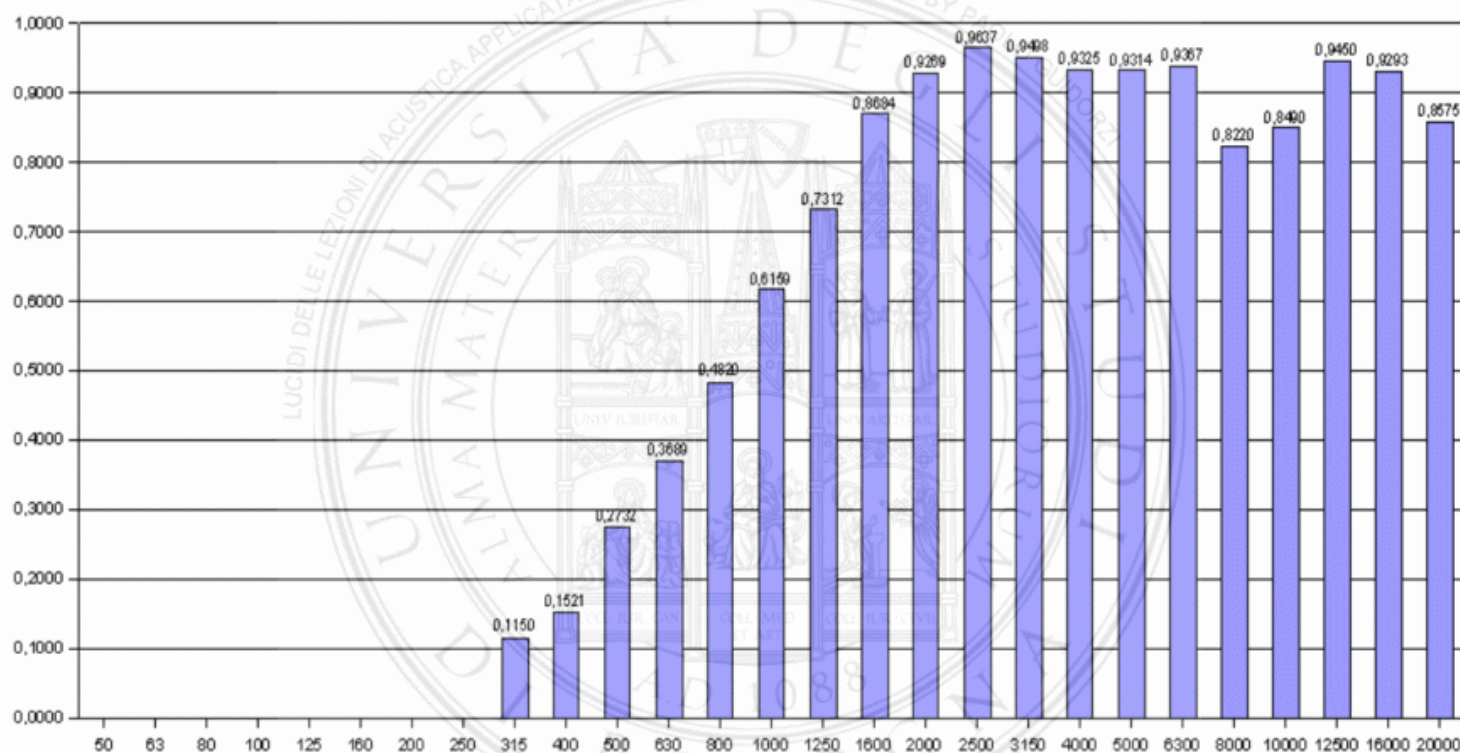
- Esistono numerosi metodi di misura del coefficiente di assorbimento, basati su diversi principi fisici e diverse metodologie.

- Tutti i metodi prevedono la sollecitazione del materiale in prova con un'onda sonora e la misura della sua reazione (ovvero della quantità suono riflesso). A seconda che il campo applicato sia diffuso (suono proveniente indistintamente da ogni direzione sul materiale) o a incidenza normale (onda piana che incide normalmente alla superficie) si misura il **coefficiente di assorbimento per incidenza random (o statistico)** oppure il **coefficiente di assorbimento per incidenza normale**.

Esiste una formula approssimata che permette di calcolare il coefficiente di assorbimento per incidenza random a partire da quello a incidenza normale. Questa formula si applica solo per una certa categoria di materiali, detti "localmente reagenti", cioè per i quali l'effetto di una sollecitazione puntuale non influenza le parti di materiale non sollecitate. I materiali porosi sono con buona approssimazione localmente reagenti.



Andamento del coefficiente di assorbimento α in funzione della frequenza e dello spessore del materiale



Esempio di andamento del coefficiente di assorbimento α di un materiale poroso (bande di 1/3 d'ottava)

Descrizione	Frequenza (Hz)				
	250	500	1000	2000	4000
Pannello in lana di legno mineralizzata, spessore 25 mm applicato a contatto con la parete	0.10	0.30	0.70	0.50	0.50
Pannello in lana di legno mineralizzata, spessore 35 mm applicato a contatto con la parete	0.15	0.25	0.50	0.90	0.65
Pannello in lana di legno mineralizzata, spessore 50 mm applicato a contatto con la parete	0.25	0.65	0.60	0.55	0.90
Pannello rigido in gesso rivestito, spessore 13 mm, con il 18% della superficie perforata, montato a 200 mm dal soffitto	0.75	0.78	0.64	0.60	0.58
Pannello rigido in gesso rivestito, spessore 13 mm, con il 18% della superficie perforata, montato a 58 mm dal soffitto	0.40	0.63	0.82	0.64	0.43
Linoleum	0.10	0.10	0.09	0.10	0.12
Moquette	0.05	0.10	0.20	0.40	0.81
Poliuretano espanso, 30 kg/m ³ spessore 13 mm	0.11	0.40	0.90	0.90	0.82
Poliuretano espanso, 30 kg/m ³ spessore 60 mm	0.30	0.62	0.90	0.99	0.98
Sedia di metallo	0.015	0.030	0.035	0.025	0.035
Sedia imbottita	0.23	0.37	0.27	0.25	0.25
Sughero	0.04	0.08	0.12	0.03	0.10
Tappeto pesante	0.20	0.25	0.30	0.30	0.30
Tappeto sottile	0.10	0.15	0.20	0.20	0.20

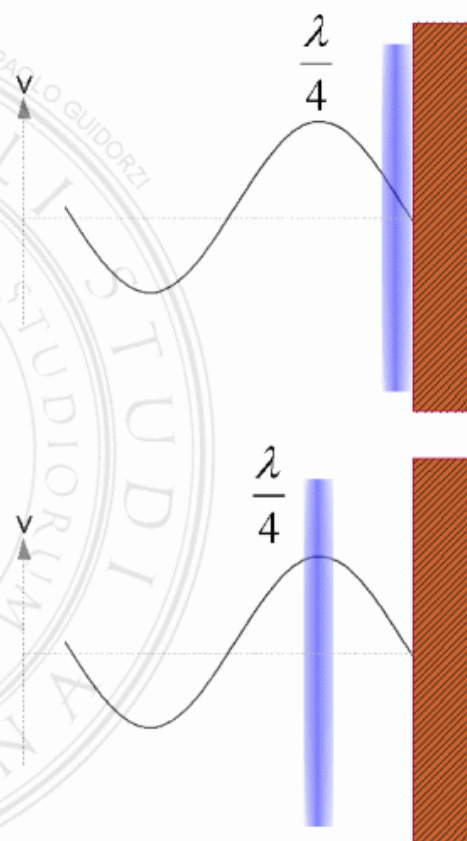
Valori del coefficiente di assorbimento α per alcuni materiali

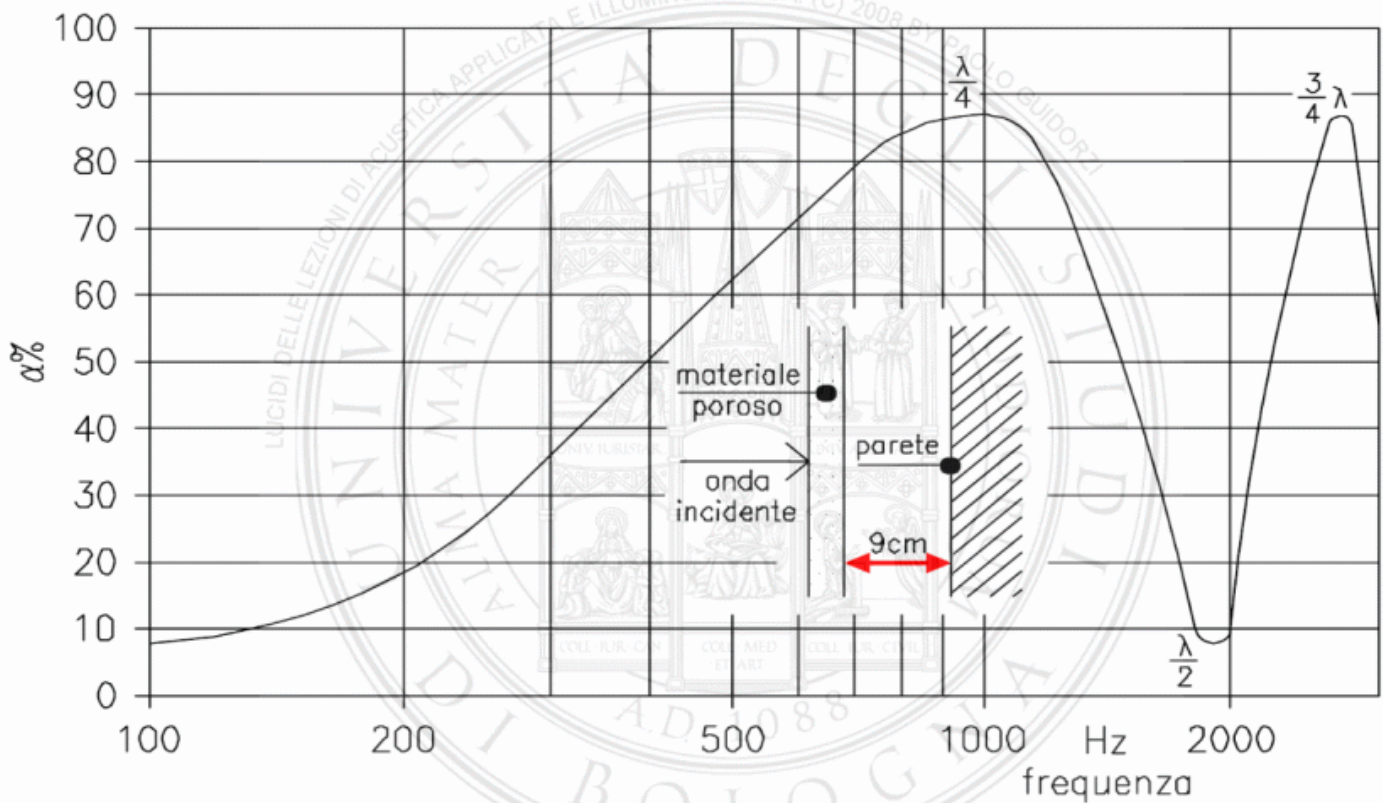
Quando un'onda sonora è riflessa da una parete rigida (idealmente con coefficiente di assorbimento nullo), a contatto con la parete la velocità delle particelle d'aria è nulla, mentre a distanza di $\frac{1}{4}$ di lunghezza d'onda si ha un massimo di velocità.

Dato che il meccanismo dell'assorbimento nei materiali porosi consiste nella dissipazione dell'energia vibrazionale delle particelle d'aria per attrito con le superfici delle cavità, è chiaro che maggiore sarà la velocità di vibrazione maggiore sarà l'assorbimento e viceversa.

Un pannello di materiale assorbente può essere appoggiato alla parete o posto a una certa distanza da essa: a contatto con la parete (velocità nulla) l'assorbimento sarà minimo, mentre a distanza di $\frac{1}{4}$ di lunghezza d'onda (o dei suoi multipli dispari) si ha la massima efficienza di assorbimento.

Questo ragionamento spiega perchè l'assorbimento dei materiali porosi aumenta con lo spessore del pannello e perchè è possibile avere alto assorbimento a una determinata frequenza ponendo un pannello sottile alla distanza di $\frac{1}{4}$ di lunghezza d'onda da una parete rigida.





Effetto della distanza dalla parete del pannello di materiale poroso sul coefficiente di assorbimento α

Area equivalente di assorbimento acustico

$$A_S = \alpha \cdot S$$

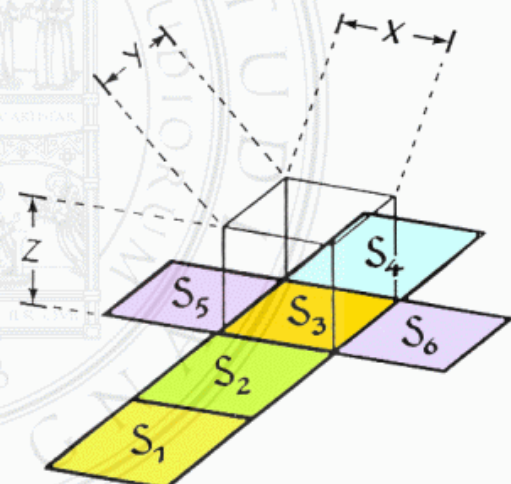
α : coefficiente di assorbimento acustico
 S : superficie frontale della parete

Nel caso la superficie sia costituita da zone di area S_i con **differente coefficiente di assorbimento** acustico α l'area equivalente di assorbimento acustico si definisce:

$$A_S = \sum_i \alpha_i \cdot S_i$$

Unità di misura: **m² di finestra aperta**

$$A = \alpha_1 S_1 + \alpha_2 S_2 + \dots + \alpha_n S_n$$



Si definisce:

Coefficiente di assorbimento medio

$$\bar{\alpha} = \frac{A_S}{S_T} = \frac{\sum_i \alpha_i \cdot S_i}{S_T}$$

dove A_S è l'area equivalente di assorbimento acustico e S_T la superficie totale. E' utilizzato nel caso di un locale caratterizzato da diverse superfici.

Si definisce:

Indice di fonoassorbimento del locale

$$R_{IL} = \frac{\bar{\alpha} \cdot S_T}{1 - \bar{\alpha}}$$

L'utilizzo di questi indici sarà chiaro quando si tratterà l'acustica degli ambienti chiusi.

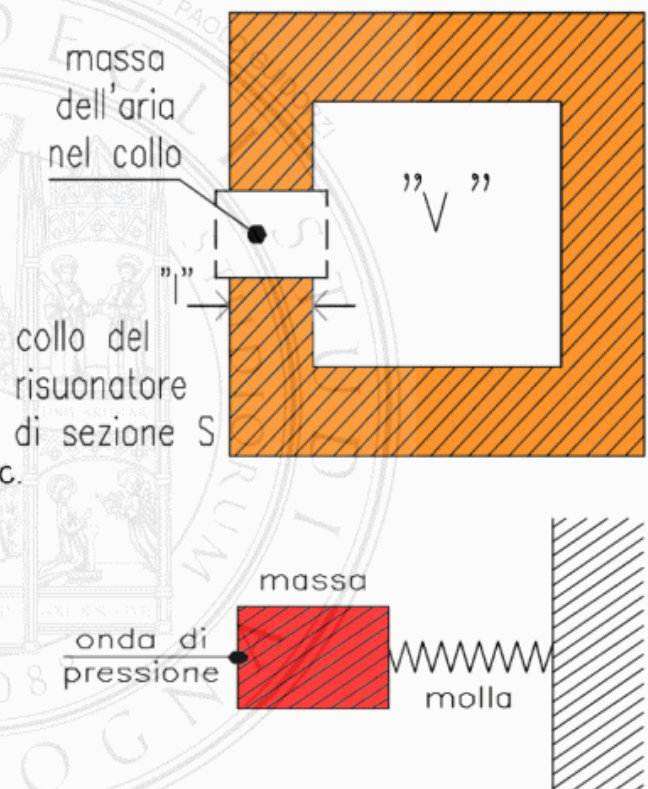
RISUONATORE DI HELMHOLTZ

Il risonatore di Helmholtz è costituito da una cavità di volume V in comunicazione con l'esterno tramite un'apertura, detta collo, di lunghezza l e sezione S .

L'onda sonora incidente mette in vibrazione l'aria contenuta nel collo, che si comporta in modo simile a un sistema massa-molla (vedi figura), nel quale la massa corrisponde all'aria nel collo del risonatore e la molla è l'aria contenuta all'interno della cavità.

La dissipazione di energia che porta all'assorbimento del suono avviene per l'attrito viscoso dell'aria nel collo.

Si ha in particolare un picco di assorbimento in corrispondenza della frequenza di risonanza del sistema massa-molla.



La frequenza di risonanza del risonatore si può calcolare con la seguente formula:

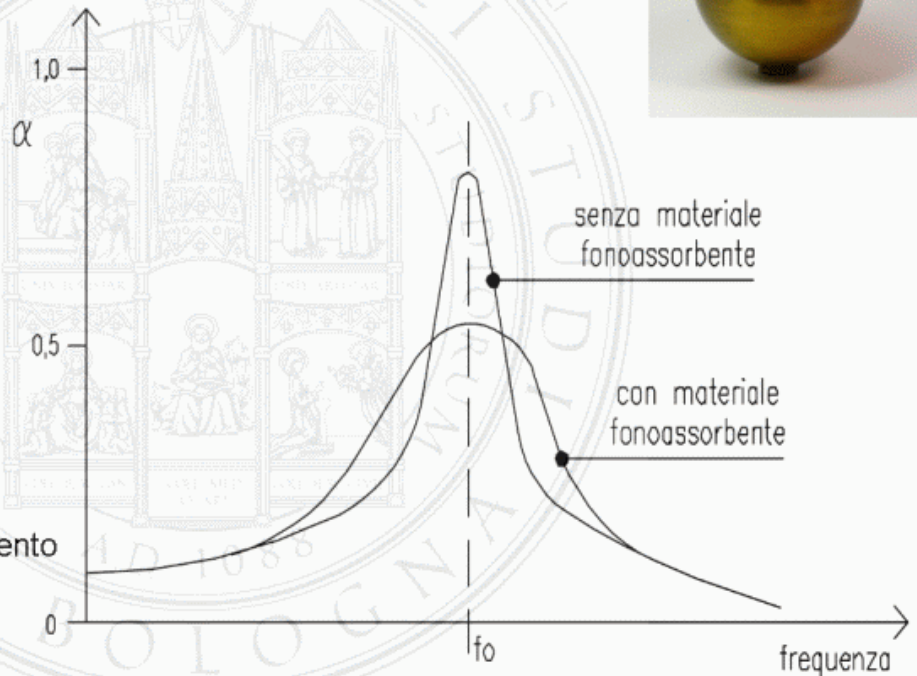
$$f_{res} = \frac{c}{2\pi} \sqrt{\frac{\pi \cdot r^2}{V(l+1,6r)}}$$

c velocità del suono [m/s]

V volume della cavità [m³]

r, l raggio e lung. del collo [m]

Se la cavità è riempita con materiale fonoassorbente, la curva di assorbimento ha un picco meno marcato



PANNELLI FORATI

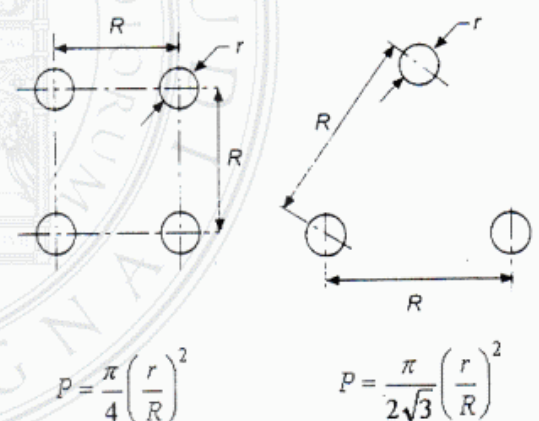
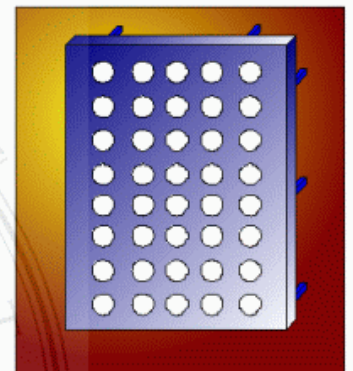
Un pannello forato può essere considerato come un insieme di risonatori di Helmholtz affiancati; il collo sono i rispettivi fori mentre la cavità è costituita dallo spazio tra il pannello e la parete. I pannelli forati però hanno uno spettro di assorbimento diverso da un singolo risonatore poiché si ha anche l'interazione tra i singoli risonatori e come conseguenza l'assorbimento avviene a frequenze diverse.

$$f_{res} = \frac{c}{2\pi} \sqrt{\frac{P}{d \cdot t}}$$

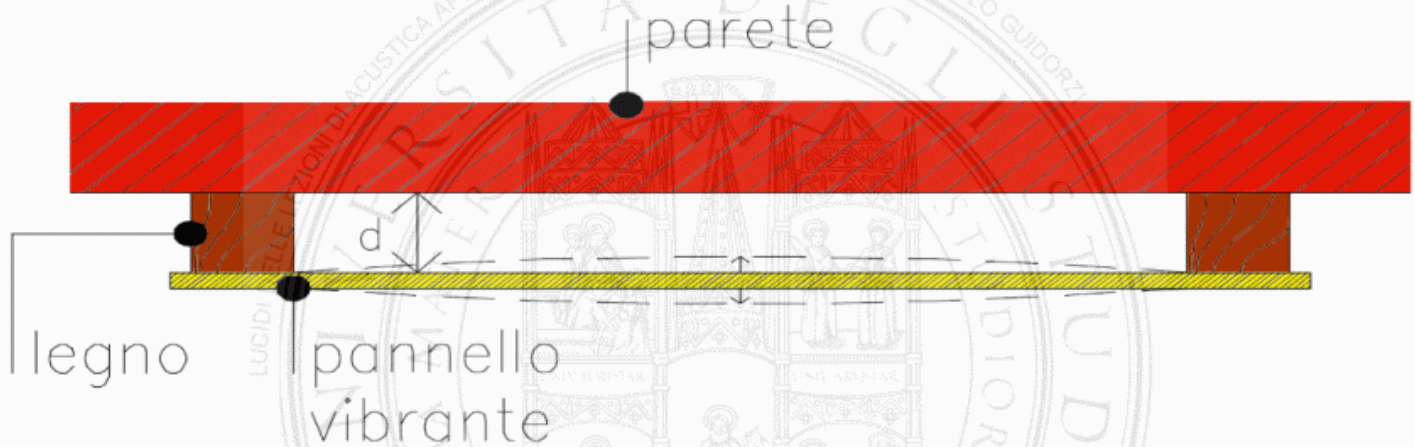
P percentuale di foratura

d distanza dalla parete [m]

t spessore del pannello [m]



PANNELLI VIBRANTI



I pannelli vibranti sono costituiti da pannelli di materiale elastico (legno, fibre di legno, membrane) e non poroso. Sono installate a una distanza d dalla parete e formano con questa un'intercapedine d'aria. L'assorbimento avviene grazie alla dissipazione dovuta alle vibrazioni flessionali del pannello.

Anche in questo caso il sistema può essere schematizzato come un sistema massa-molla. La massa è rappresentata dal pannello e la molla dall'aria contenuta nell'intercapedine.

La frequenza fondamentale di risonanza dipende dalla massa per unità di superficie del pannello, dalla sua rigidità e dalla distanza dalla parete. Aumentando la massa del pannello e la dimensione dell'intercapedine si riduce la frequenza di risonanza.

$$f_{res} = \frac{60}{\sqrt{\sigma \cdot d}}$$

σ massa superficiale del pannello [kg/m^2]

d distanza pannello-parete [m]

Esempio di calcolo:

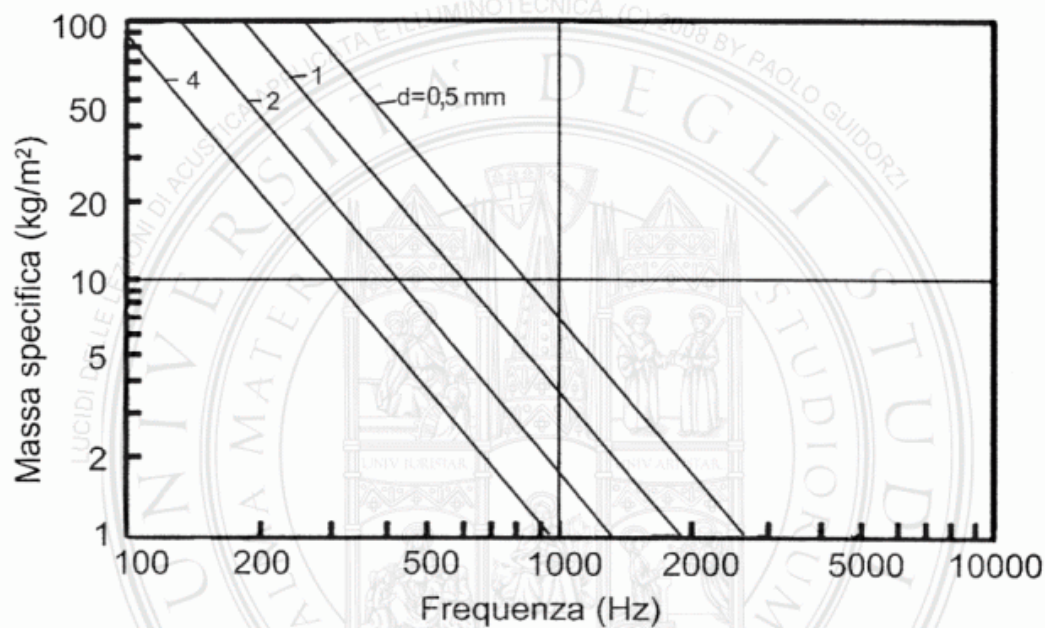
- Legno compensato di spessore 5 mm con densità 600 kg/m^3
- Distanza parete-pannello 10 cm

$$\sigma = 600 \cdot 0,005 = 3 \text{ kg/m}^2$$

$$f_{res} = \frac{60}{\sqrt{3 \cdot 0,1}} \approx 109 \text{ Hz}$$

In realtà è difficile prevedere esattamente la frequenza di risonanza visto che è difficoltoso conoscere il grado di smorzamento meccanico del pannello e altri parametri secondari. Quindi di solito si utilizzano risultati sperimentali, utilizzando la formula solo per avere un'idea dell'ordine di grandezza.

In ogni caso i pannelli vibranti (tra i quali vanno incluse le superfici vetrate di grandi dimensioni) hanno una buona efficienza in bassa frequenza.



Si può osservare in questa figura come la frequenza di risonanza di un certo pannello diminuisce con l'aumentare della sua densità e all'aumentare della distanza parete-pannello (cioè con il volume dell'intercapedine).

Anche in questo caso, riempiendo l'intercapedine con materiale assorbente poroso è possibile allargare lo spettro di assorbimento, diminuendo però l'efficienza massima del sistema.

MISURA DEL COEFFICIENTE DI ASSORBIMENTO CON DIVERSI METODI

Misura nel tubo a onde stazionarie

α a incidenza normale

Misura in camera riverberante

α a incidenza random

Misura con metodo a riflessione

α a incidenza normale

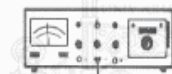
Ogni metodo di misura è basato su una diversa metodologia. Non è dato per scontato che i risultati della misura del coefficiente di assorbimento di uno stesso materiale con metodi diversi siano uguali, anzi spesso ciò non accade.

Si distinguono comunque metodi che permettono di misurare il coefficiente di assorbimento a incidenza random da quelli che permettono la misura a incidenza normale o ad angoli di incidenza arbitrari.

MISURA NEL TUBO A ONDE STAZIONARIE
Misura di α a incidenza normale
Metodo "classico", ISO 10534-1:

- Generazione di onde piane all'interno di un condotto, ad un'estremità del quale è posto un provino del materiale
- Misura delle ampiezze e posizioni dei nodi e dei ventri delle onde stazionarie che vi si formano
- Calcolo dell'impedenza superficiale del materiale e da questa i coefficienti di riflessione e assorbimento

Generatore di segnali



Analizzatore



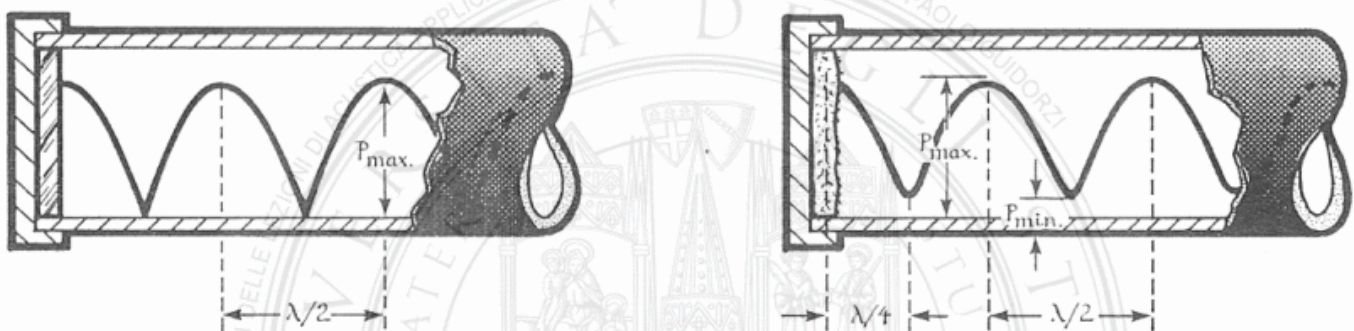
Tubo rigido



Microfono

Sorgente di onde sinusoidali

Image Courtesy of Brüel & Kjær



$$SWR = \frac{p_{\max}}{p_{\min}} \quad \alpha = 1 - \left(\frac{SWR - 1}{SWR + 1} \right)^2$$

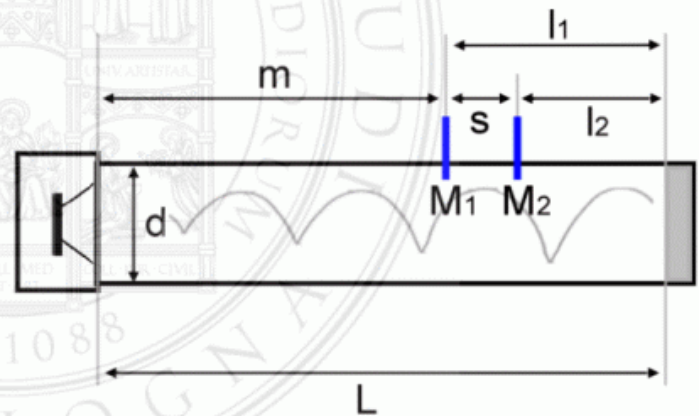
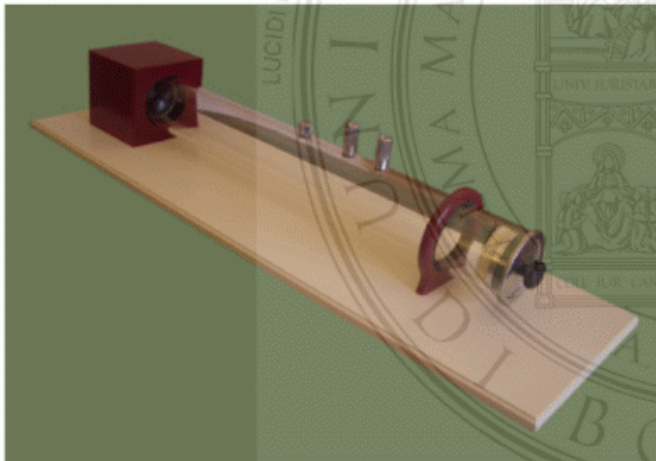
 In genere α_n è inferiore rispetto al valore di α misurato in camera riverberante

Image Courtesy of Brüel & Kjær

Metodo "moderno" ISO 10534-2:

- Calcolo del coefficiente di riflessione complesso (e da questo il coefficiente di assorbimento) a partire dalla misura della funzione di trasferimento tra 2 microfoni posti a una distanza nota sul fianco del tubo

Questa metodologia permette tempistiche rapide essendo basata su una misura in larga banda dei segnali ai microfoni e sulla loro trasformazione in tempo reale nel dominio delle frequenze, senza parti meccaniche in movimento.


MISURA IN CAMERA RIVERBERANTE
Misura di α a incidenza random
Misura secondo normativa UNI-ISO 354

ANTICIPAZIONE: Tempo di riverberazione

All'interno di un ambiente chiuso allo spegnimento di una sorgente stazionaria si crea una "coda sonora". Il tempo impiegato dal livello di pressione sonora per decadere di 60 dB viene detto **tempo di riverberazione**. Esistono varie formule che permettono di calcolare tale tempo in funzione del volume dell'ambiente e del suo assorbimento. La più semplice è la formula di Sabine:

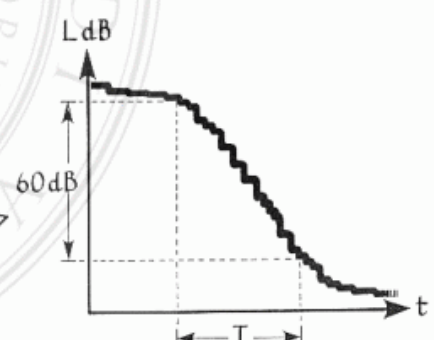
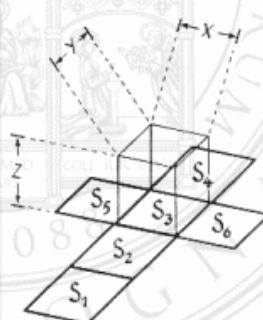
$$T_{60} = 0,163 \frac{V}{A}$$

$$V = X \cdot Y \cdot Z$$

$$A = \alpha_1 S_1 + \alpha_2 S_2 + \dots + \alpha_6 S_6$$

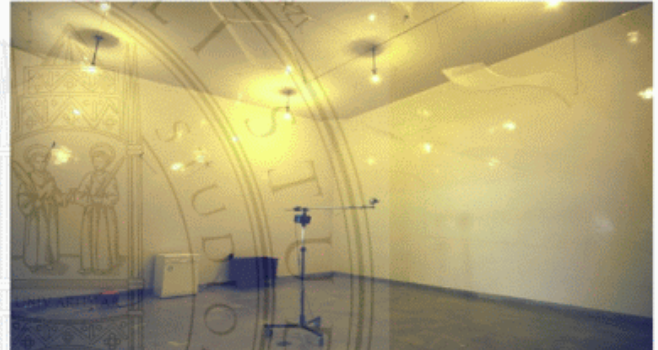
Sabine

$$T = \frac{0,163 \cdot V}{A}$$



La misura si svolge all'interno di una camera detta "riverberante", con determinate caratteristiche, specificate nella normativa UNI-ISO 354. Si effettuano due misurazioni di tempo di riverberazione, una con la camera vuota e una con la camera all'interno della quale è stato inserito il campione.

- α_0 : coefficiente di assorbimento della camera vuota
- α_x : coefficiente di assorbimento medio del campione
- V : volume della camera di prova
- S_0 : superficie totale della camera
- S_x : superficie del campione in prova
- T_x : tempo di riverberazione con il materiale
- T_0 : tempo di riverberazione senza il materiale



Camera riverberante dell'istituto Galileo Ferraris, Torino

$$T_0 = 0,163 \frac{V}{\alpha_0 S}$$



$$\alpha_x = 0,163 \frac{V}{S_x} \left(\frac{1}{T_x} - \frac{1}{T_0} \right) + \alpha_0$$

$$T_x = 0,163 \frac{V}{\alpha_0 S - \alpha_0 S_x + \alpha_x S_x}$$

Questo metodo, pur essendo il più semplice e "antico" presenta molteplici problemi di ripetibilità e attendibilità. Ad esempio in caso di campo sonoro non perfettamente diffuso si possono avere valori di alfa maggiori di 1 (fisicamente assurdo).

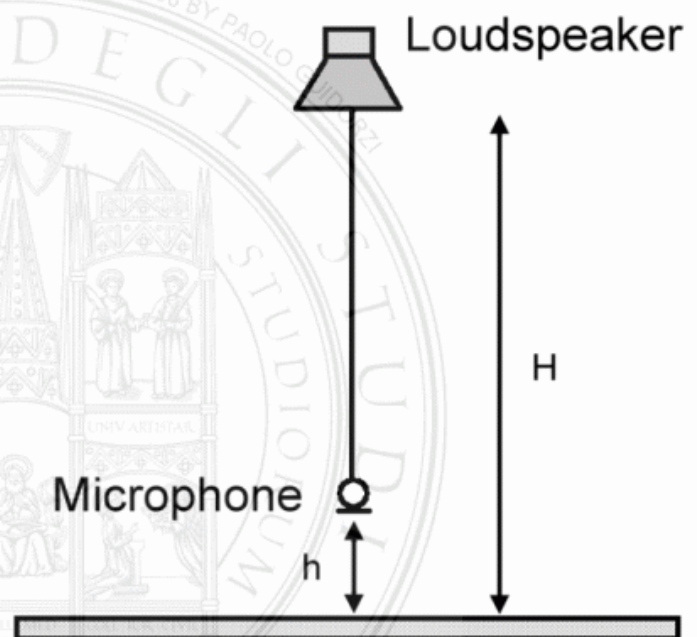
MISURA CON METODO A RIFLESSIONE

Misura di α a incidenza normale

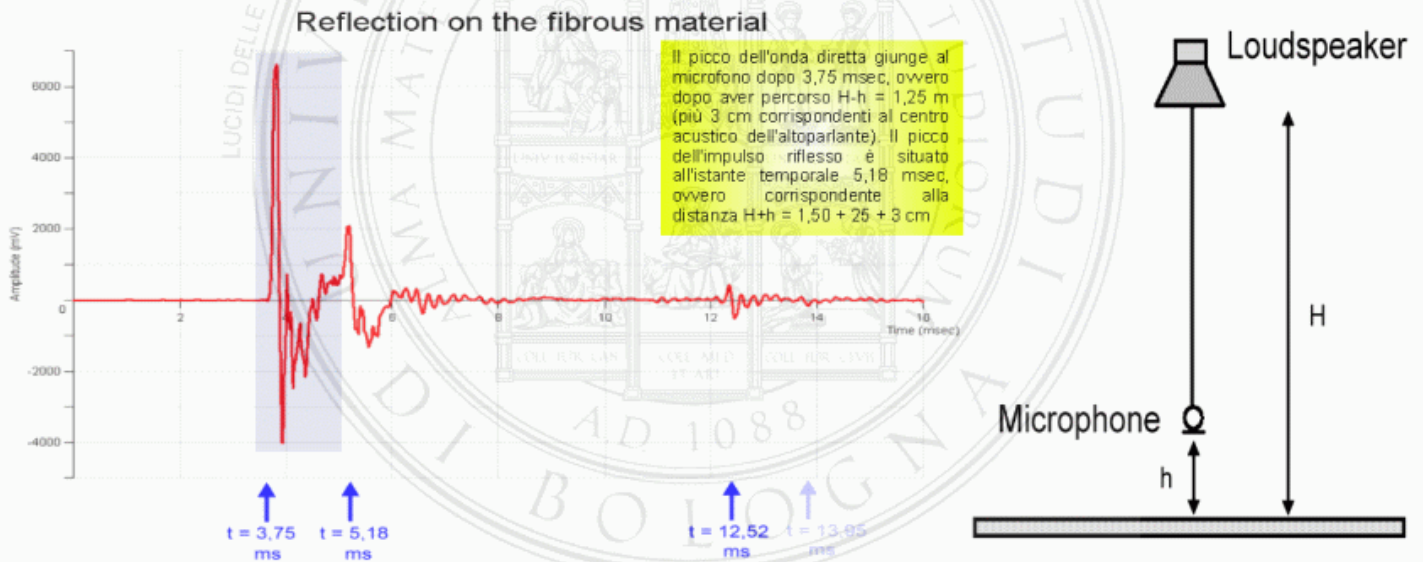
Misura secondo normativa ISO 13472-1

- permette di misurare il coefficiente di assorbimento di un materiale in situ
- una sorgente (altoparlante e relativa cassa acustica) viene sospesa sopra al materiale da testare
- un microfono è tra la sorgente e la superficie

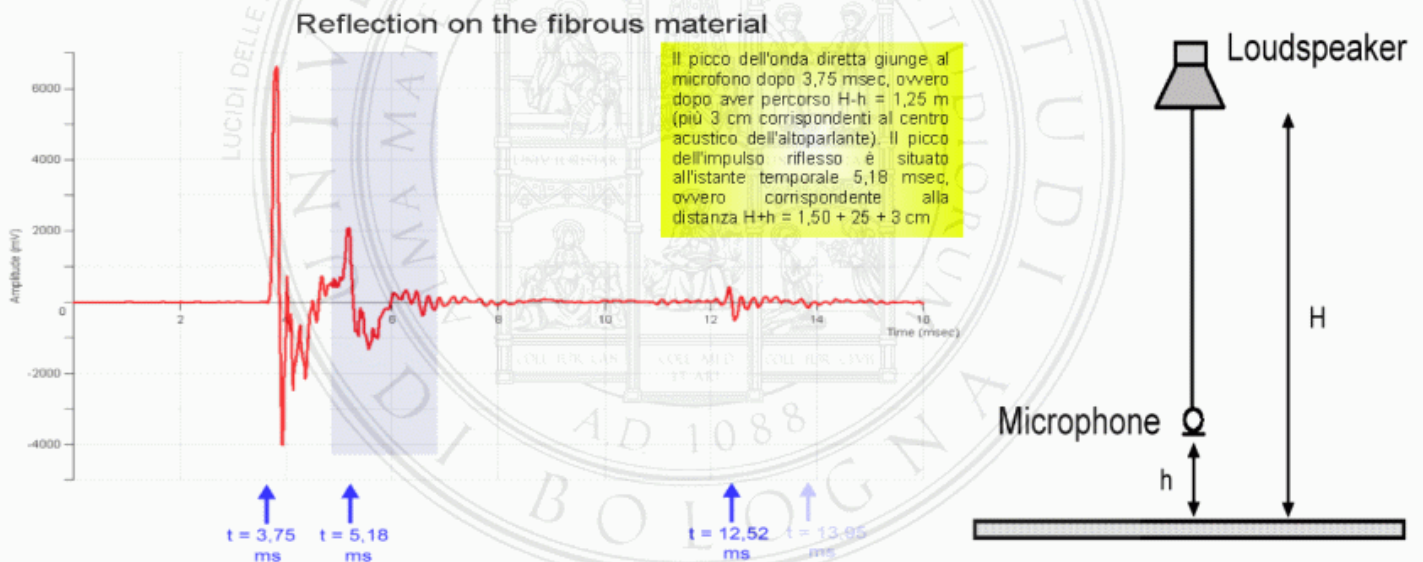
Il metodo consiste nella misura e analisi della risposta impulsiva composta del sistema. La misura della risposta impulsiva *anticamente* veniva effettuata utilizzando sorgenti impulsive quali pistole a salve, scoppio di palloni o scintille. Oggi invece esistono metodi elettronici digitali che con l'utilizzo di un semplice altoparlante permettono di effettuare la misura di risposta impulsiva in modo accurato e ripetibile.



La risposta impulsiva misurata presenta un primo picco, corrispondente all'arrivo del suono che parte dalla sorgente e giunge al microfono, dopo aver percorso uno spazio $H-h$. Questo primo picco contiene solamente informazioni spettrali relative al sistema di misura altoparlante-microfono-elettronica di supporto.



L'onda sonora, quindi percorre un'ulteriore cammino h , viene riflessa dal materiale in prova e percorre nuovamente lo spazio h per tornare a essere captata dal microfono. Si avrà quindi un secondo picco, separato dal primo da un intervallo di tempo corrispondente alla distanza $2h/c$. Il secondo picco (sovrapposto alla coda del primo) è stato *filtrato* dal materiale in prova e quindi dall'analisi e rapporto del contenuto spettrale delle due risposte impulsive, opportunamente finestrate, si ricavano le informazioni sull'assorbimento del materiale in funzione della frequenza.



Il coefficiente di assorbimento è calcolato utilizzando la formula: $\alpha(f) = 1 - \frac{1}{K_r^2} \frac{|P_r(f)|^2}{|P_i(f)|^2}$

dove P_r e P_i sono i valori assoluti delle ampiezze della pressione complessa delle onde riflessa e diretta (calcolate a partire dalle trasformate di Fourier dell'onda riflessa e diretta rispettivamente);

K_r è un fattore di correzione della divergenza sferica: $K_r = \frac{H-h}{H+h}$



POTERE FONOISOLANTE

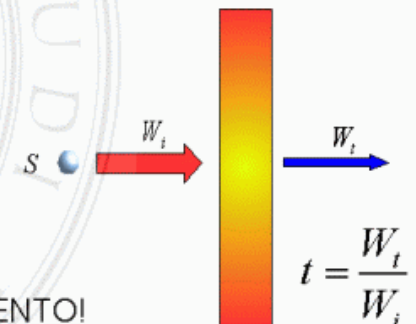
$\alpha \rightarrow 1$ Materiale fonoassorbente

$t \rightarrow 0$ Materiale fonoisolante

$$\alpha = a + t = 1 - r$$

In acustica edilizia, oltre al cosiddetto coefficiente di assorbimento acustico apparente α , che rappresenta la parte di energia non riflessa, è in uso il **potere fonoisolante R**, che indica la capacità di isolamento di un ambiente ricevente da un ambiente sorgente.

$$R = 10 \log \left(\frac{1}{t} \right) = 10 \log \left(\frac{W_i}{W_t} \right) \quad (\text{dB})$$



Attenzione a non confondere FONOASSORBIMENTO e FONOISOLAMENTO!

Materiali con migliore fonoassorbimento: bassa massa, alta porosità (es: pannello di lana di roccia)

Materiali con migliore fonoisolamento: massa elevata, non porosi e rigidi (es. muro di calcestruzzo)

In un edificio il rumore si propaga:

- per via aerea (l'aria è il mezzo di trasmissione) e si attenua nella propagazione per divergenza geometrica e per altre cause secondarie.
- per via strutturale (gli elementi strutturali dell'edificio, ovvero le pareti e i solai, sono il mezzo di trasmissione). Questi elementi vibrando diventano sorgenti e fanno sì che il disturbo si propaghi anche a grandi distanze.

Anche gli impianti (es. tubi del riscaldamento) sono un mezzo di trasmissione del rumore a grandi distanze negli edifici.

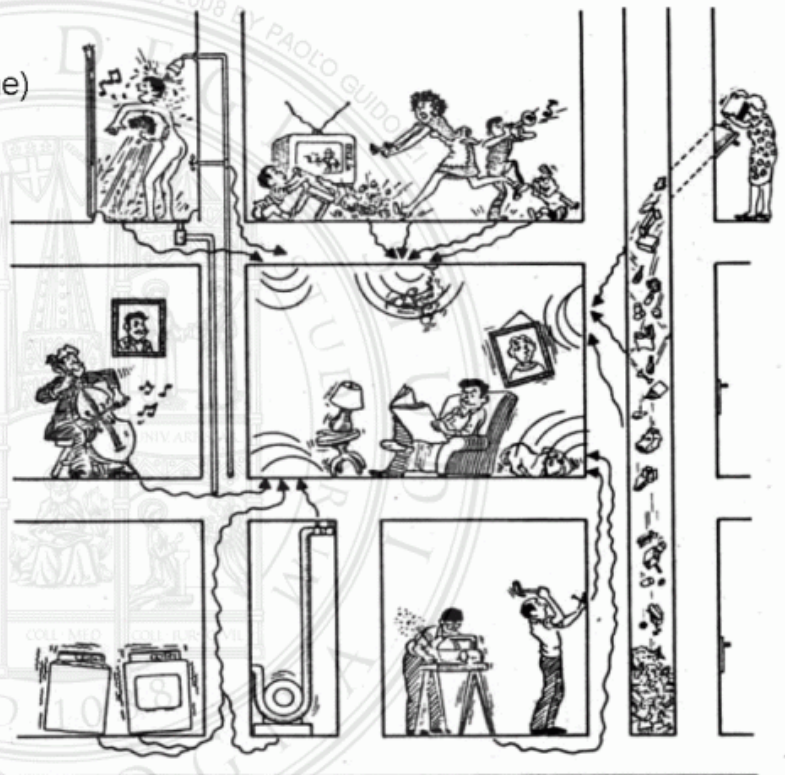


Image Courtesy of Brüel & Kjær

Il **potere fonoisolante** dipende:

- dalla frequenza del suono incidente
- dalle proprietà fisiche del materiale (massa, rigidità, smorzamento)
- dalle proprietà geometriche della parete

Considerando un caso reale, il parametro **potere fonoisolante** R non tiene conto di una serie di problematiche: la parete che separa due ambienti non è l'unica via di passaggio del suono e l'ambiente ricevente ha una sua reazione acustica che modifica il livello sonoro percepito. R quindi, nella definizione fornita, è un indicatore del grado di isolamento tra due ambienti, ma l'isolamento acustico in un caso reale andrà studiato e affrontato tenendo conto anche di altre problematiche.

Considerando che una parete costituita di materiale omogeneo e isotropo, priva di incastri al bordo e priva di reazione alla sollecitazioni, il campo sonoro costituito solo da onde piane, si giunge ad una relazione, nota come **legge di massa**:

$$R = 10 \log \left[\left(\frac{m \cdot f \cdot \pi \cdot \cos \theta}{\rho_0 c} \right)^2 \right] \quad (\text{dB})$$

dove m è la massa superficiale (kg/m^2), f la frequenza (Hz), θ l'angolo di incidenza e $\rho_0 c$ l'impedenza acustica caratteristica dell'aria.

Image Courtesy of Brüel & Kjær



LA LEGGE DI MASSA

Nel caso di incidenza normale ($\theta = 0$) la relazione diventa: $R \cong 20 \log(m \cdot f) - 42,5$ (dB)

Questa legge ci dice che R è proporzionale logaritmicamente alla massa superficiale e alla frequenza, quindi un raddoppio della frequenza o della massa porta un incremento di 6 dB del potere fonoisolante. Quest'ultima relazione vale solo nel caso particolare di onde piane incidenti normalmente sulla parete. Nel caso più realistico di onde provenienti da tutte le direzioni (campo diffuso), la relazione diventa:

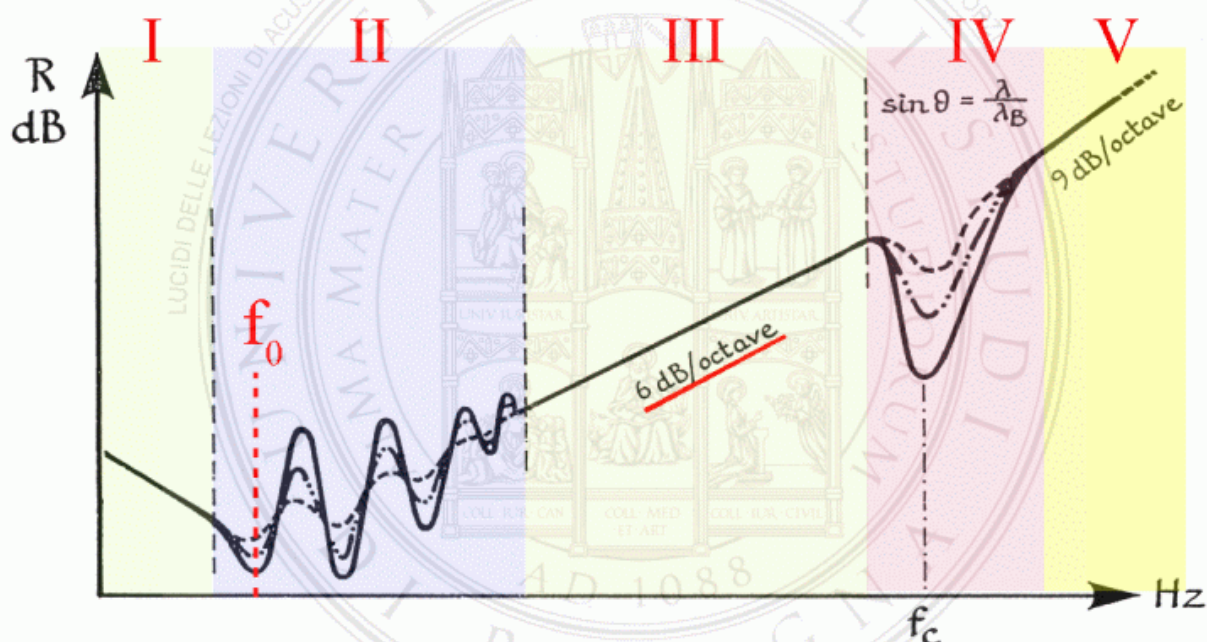
CAMPO SONORO PERFETTAMENTE DIFFUSO (onde provenienti da angoli da 0° a 90°)

$$R_c \cong R - 10 \log(0,23 \cdot R) \quad (\text{dB})$$

CAMPO SONORO MEDIAMENTE DIFFUSO (onde provenienti da angoli da 0° a 78°)

$$R_p = R - 5 \quad (\text{dB})$$

Tuttavia se si effettuano misure sperimentali su una parete (sempre omogenea e isotropa) si trova un grafico di R in funzione della frequenza che rispetta le relazioni citate solo in un ristretto range di frequenze (zona III del grafico in pagina seguente).

DEVIAZIONI DALLA LEGGE DI MASSA

ZONA I – EFFETTO DI RIGIDITA'

Questo effetto si manifesta nel caso di pareti sottili, rigide e di bassa massa. In questa zona il potere fonoisolante cresce al diminuire della frequenza. R cala con una pendenza di circa 6 dB per ottava e incrementa di circa 6 dB raddoppiando la rigidezza.

Nei pavimenti e nelle pareti il fenomeno si verifica per valori di frequenza inferiori a una frequenza f_0 detta frequenza fondamentale, di solito compresa tra 10 e 20 Hz. Quindi solitamente nella pratica questo effetto può essere ignorato.

ZONA II – EFFETTO DI RISONANZA

Considerando una parete piana incastrata ai bordi, eccitando tale parete, essa entra in vibrazione ad una certa frequenza f_0 , detta **frequenza fondamentale naturale**, che dipende dalla massa e dalla rigidità flessionale della struttura. Quando ad una parete giunge un'eccitazione alla frequenza fondamentale naturale, essa vibra con oscillazioni di ampiezza massima, ovvero entra in risonanza. La frequenza fondamentale cresce direttamente con lo spessore (rigidità) e inversamente con la massa superficiale; generalmente è compresa tra 1 e 100 Hz. Alla frequenza di risonanza si ha un sensibile calo del potere fonoisolante e quindi delle prestazioni di isolamento della parete.

La frequenza f_0 corrisponde al primo modo naturale di vibrazione della parete. I modi superiori di vibrazione della parete portano altrettanti "buchi" di isolamento, alle frequenze f_n (si veda la zona II del grafico precedente).

La **frequenza di risonanza** per una lastra piana (dotata di elasticità e inerzia) può essere calcolata usando questa formula:

$$f_{res(n,m)} = 0.45 \cdot h \cdot \sqrt{\frac{E}{\rho} \left[\left(\frac{n}{x}\right)^2 + \left(\frac{m}{y}\right)^2 \right]} \quad [\text{Hz}]$$

h spessore della parete [m]

ρ densità del materiale [kg/m^3]

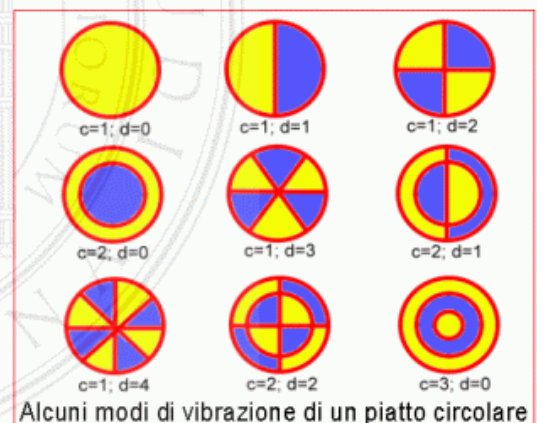
E modulo di Young [$\text{Pa} = \text{N}/\text{m}^2$]

x, y dimensioni della lastra [m]

n, m numeri interi

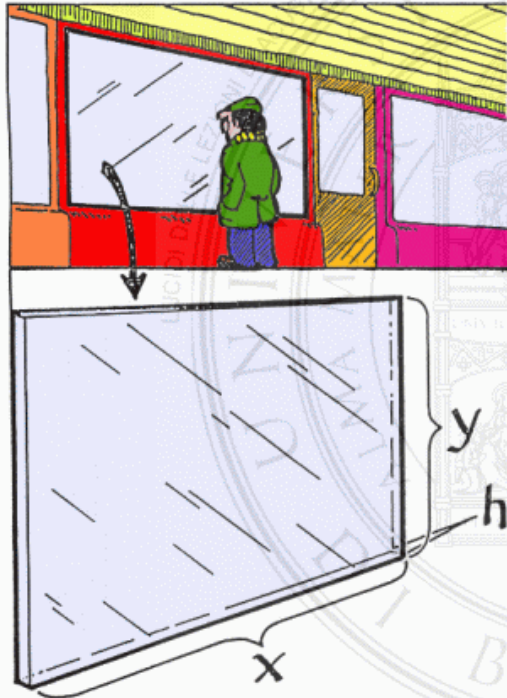
Tra queste frequenze, le più efficaci sono le prime, molto basse: al crescere della frequenza cala l'efficienza di radiazione del pannello. La più bassa di queste frequenze ($n=m=1$) si dice **frequenza naturale**.

Materiale	Dimensioni (m)	Fr. naturale (Hz)	Fr. critica (Hz)
Piombo	3 x 3 x 0,001	0,13	55135
Vetro	3 x 4 x 0,01	9,7	1270
Calcestruzzo	3x 3 x 0,1	30	206



Alcuni modi di vibrazione di un piatto circolare

$$f_{res} = 0,45h \sqrt{\frac{E}{\rho} \left[\left(\frac{n}{x} \right)^2 + \left(\frac{m}{y} \right)^2 \right]}$$



$$h = 0,01 \text{ m}$$

$$x = 3 \text{ m}$$

$$y = 4 \text{ m}$$

$$n = m = 1$$

$$E = 6,2 \times 10^{10} \text{ N/m}^2$$

$$\rho = 2,3 \times 10^3 \text{ kg/m}^3$$

$$\therefore f_{res} = 9,7 \text{ Hz}$$

Image Courtesy of Brüel & Kjær

ZONA IV – EFFETTO DI COINCIDENZA

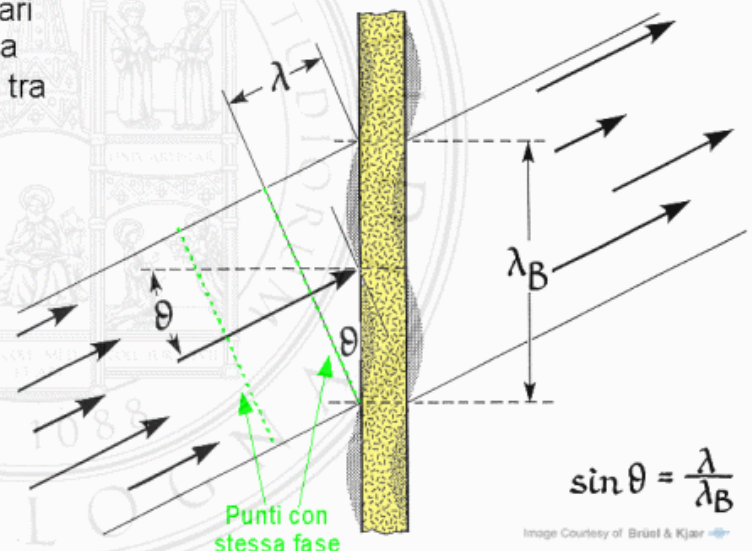
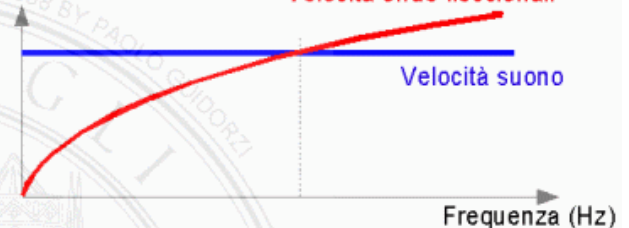
In una parete colpita da un'onda sonora incidente si formano onde flessionali la cui velocità varia con la frequenza. La velocità del suono in aria invece è costante. Esisterà quindi una frequenza alla quale queste due velocità coincidono. Se l'onda incidente giunge con un angolo ϑ sulla parete, questa originerà un'onda flessionale forzata di lunghezza d'onda pari a $\lambda / \text{sen} \vartheta$. Il fenomeno della coincidenza si ha quando, per un certo angolo ϑ si ha l'uguaglianza tra la lunghezza d'onda indotta $\lambda / \text{sen} \vartheta$ e la lunghezza d'onda naturale della parete λ_B .

$$\lambda_B = \frac{\lambda}{\text{sen} \vartheta}$$

La più bassa frequenza per cui ciò accade, detta **frequenza critica** (calcolabile conoscendo alcuni parametri strutturali della parete), si verifica quando l'angolo di incidenza è massimo (90°) ovvero quando la velocità delle onde flessionali è uguale a quella del suono in aria oppure equivalentemente quando $\lambda = \lambda_B$.

Velocità delle onde

Velocità onde flessionali



$$\sin \vartheta = \frac{\lambda}{\lambda_B}$$

Image Courtesy of Brüel & Kjær

La frequenza critica per una lastra omogenea risulta:

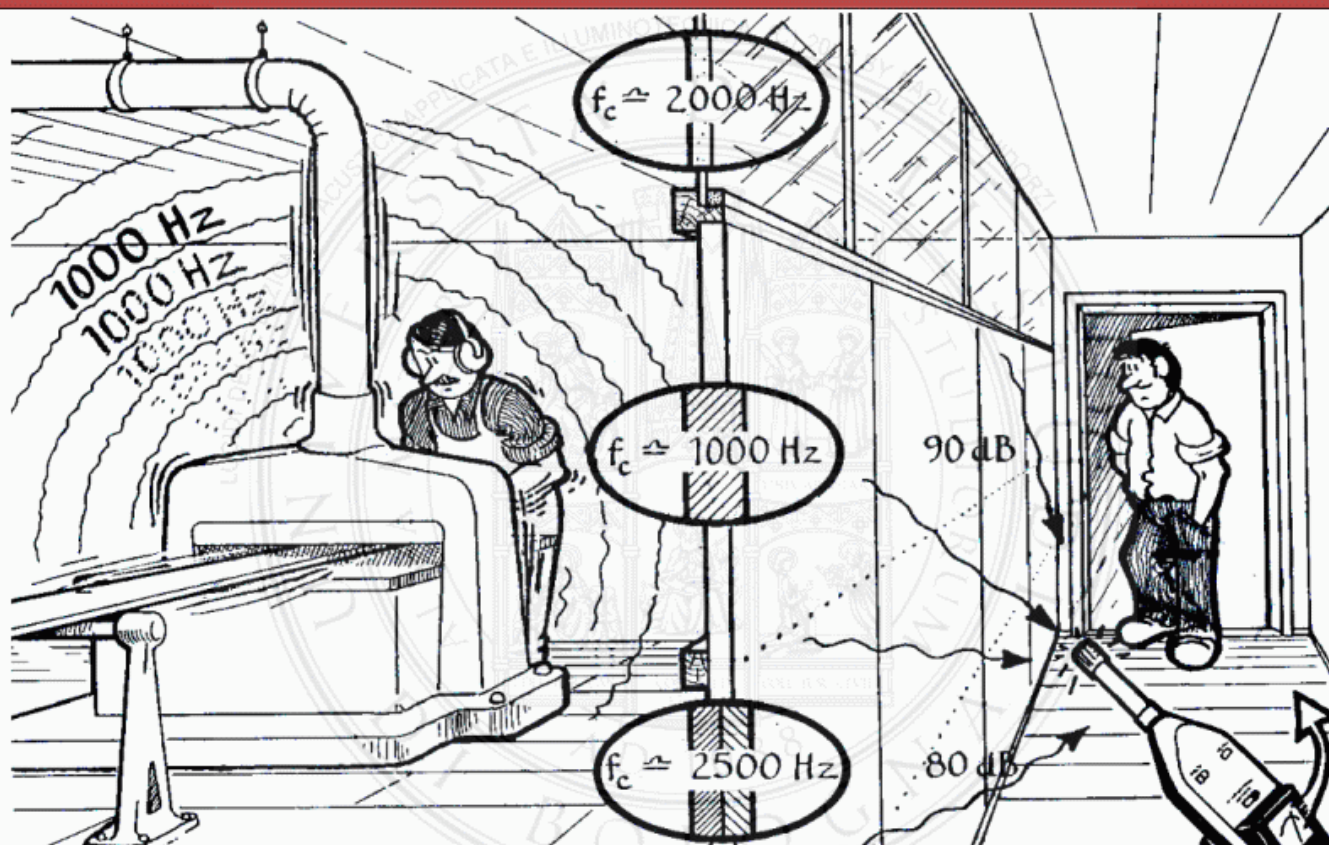
$$f_c = \frac{c^2}{\pi \cdot s} \sqrt{\frac{3\rho(1-\nu^2)}{E}} \quad [\text{Hz}]$$

- c velocità del suono [m/s]
- s spessore della parete [m]
- ρ densità del materiale [kg/m^3]
- E modulo di Young [$\text{Pa}=\text{N/m}^2$]
- ν coefficiente di Poisson [adim]

Fissato il materiale, la frequenza critica aumenta al diminuire dello spessore del pannello.

Materiale	Spessore (mm)	Frequenza critica (Hz)
Vetro	3	4800
Cartongesso	13	3150
Compensato	13	2000
Cemento	50	630
Cemento	150	200

Nella zona ∇ del grafico, al di sopra della zona della coincidenza, R tende ad aumentare con una legge simile alla legge di massa, ma con una pendenza di 9 dB/ottava.



Esempio di influenza del fenomeno della coincidenza

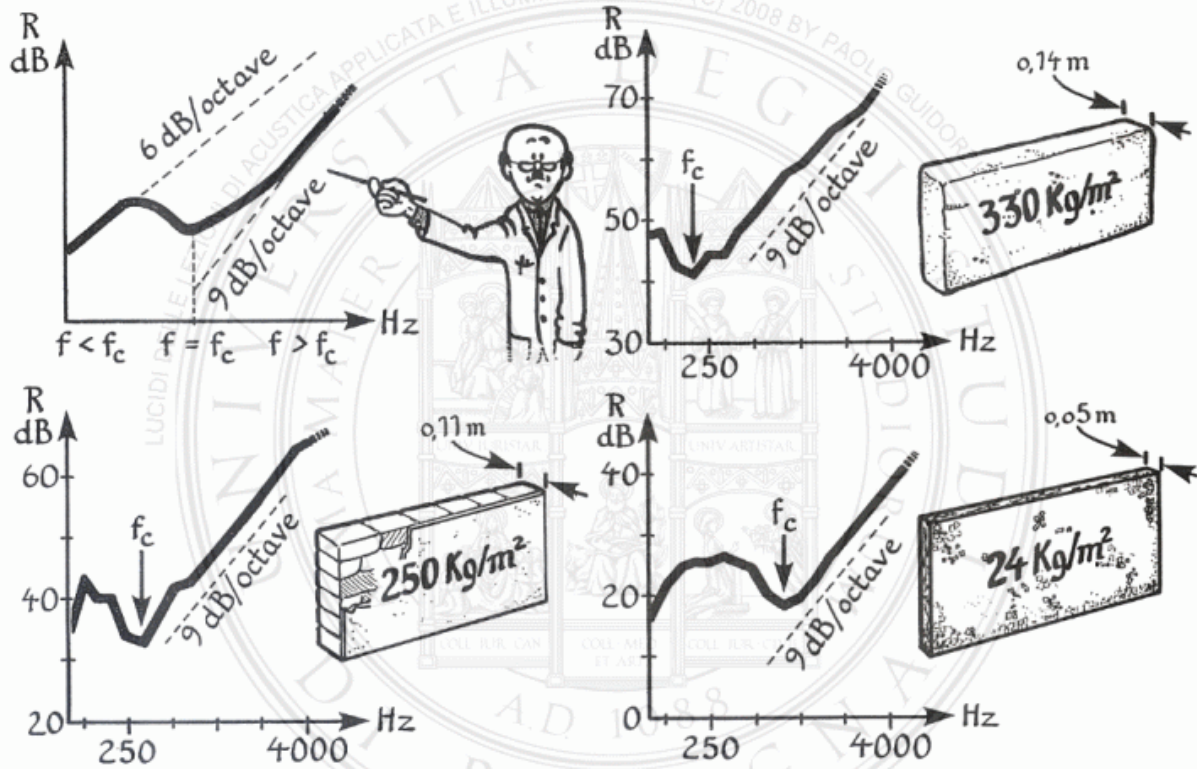
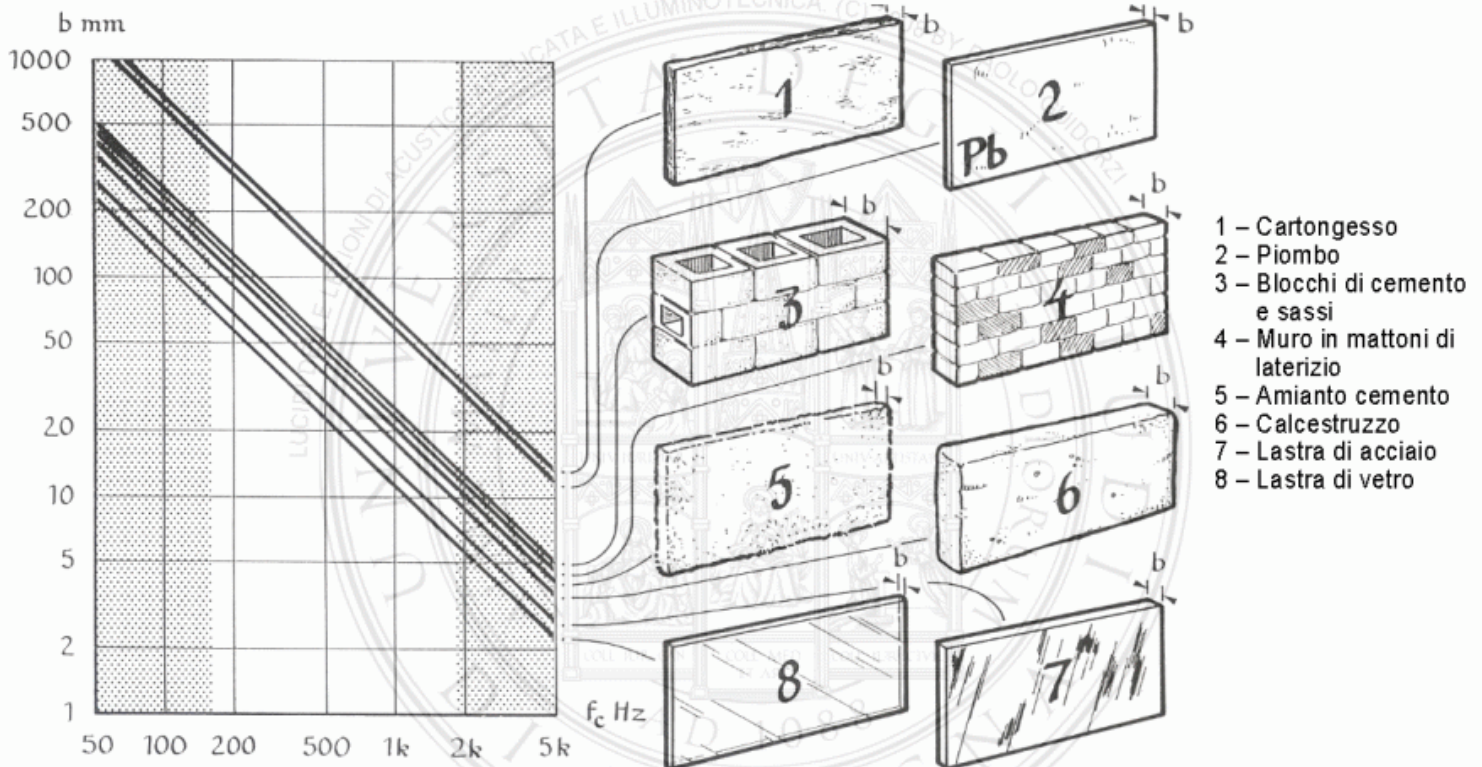


Image Courtesy of Brüel & Kjær

Andamento del potere fonoisolante nell'intorno della frequenza critica per vari materiali



Frequenza critica per vari materiali e spessori

Image Courtesy of Brüel & Kjær

Modulo di Young o modulo di elasticità:
 è un parametro che caratterizza la
 resistenza del solido alla deformazione

$$E = \frac{\sigma}{\varepsilon} \quad [\text{N/m}^2]$$

Sforzo nominale:
 forza applicata / area di appl.

$$\sigma = \frac{F}{A_0} \quad [\text{Pa}=\text{N/m}^2]$$

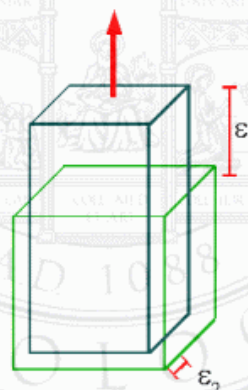
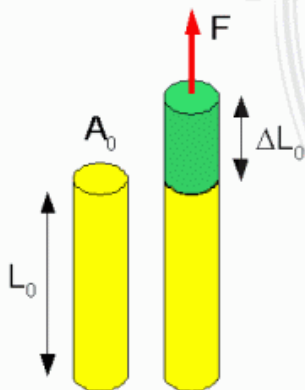
Deformazione nominale
 o allungamento relativo:

$$\varepsilon = \frac{\Delta L_0}{L_0}$$

Coefficiente di Poisson:

misura, in presenza di una sollecitazione monodirezionale longitudinale, il grado in cui il campione di materiale si restringe o si dilata trasversalmente.

$$\nu = -\frac{\varepsilon_{\text{trasy}}}{\varepsilon_{\text{long}}}$$



RISONANZA DI UNA CAVITA'

Considerando un'onda sonora all'interno di una cavità, ed essendo acusticamente riflettenti le due pareti interne, a causa dell'interferenza dell'onda diretta e di quella riflessa si ha la formazione di onde stazionarie, ovvero di onde che non si propagano ma hanno nodi e ventri nelle medesime posizioni. In particolare l'ampiezza di tali onde vale 0 nelle posizioni multiple dispari di $\frac{1}{4}$ di lunghezza d'onda e ha valore massimo nelle posizioni multiple pari di $\frac{1}{4}$ di lunghezza d'onda.

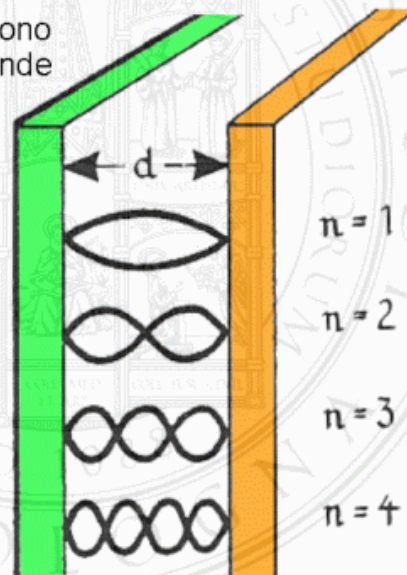
La frequenza delle onde stazionarie che si possono formare tra due superfici parallele riflettenti dipende dalla distanza tra le pareti stesse. La frequenza più bassa (cioè la fondamentale) vale:

$$f_0 = \frac{c}{2d} \quad (\text{Hz})$$

Le frequenze superiori risultano:

$$f_n = \frac{c}{2d} n \quad (\text{Hz}) \quad n=2, 3, 4, \dots$$

$$d = n \frac{\lambda}{2} = n \frac{(\frac{c}{f})}{2} = n \frac{c}{2f} \Rightarrow f = \frac{c}{2d} n$$



Example $d = 0,05 \text{ m}$

$$f = \frac{170n}{d}$$

$$f_1 = 850 \text{ Hz}$$

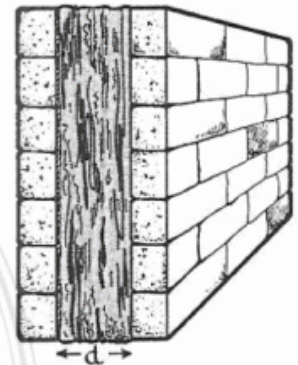
$$f_2 = 1700 \text{ Hz}$$

$$f_3 = 2550 \text{ Hz}$$

$$f_4 = 3400 \text{ Hz}$$

PARETI DOPPIE

Per lo studio dell'isolamento di una parete doppia occorre valutare il sistema completo, assimilabile a un sistema massa-molla-massa. La **frequenza di risonanza** di tale sistema risulta essere:



PARETI FISSATE TRA LORO MEDIANTE MATERIALE ELASTICO:

$$f_0 = 160 \sqrt{s' \left(\frac{1}{m'_1} + \frac{1}{m'_2} \right)} \text{ (Hz)}$$

PARETI SEPARATE DA ARIA O FONOASSORBENTE:

$$f_0 = 160 \sqrt{\frac{0,1}{d} \left(\frac{1}{m'_1} + \frac{1}{m'_2} \right)} \cong 50 \sqrt{\frac{1}{d} \left(\frac{1}{m'_1} + \frac{1}{m'_2} \right)} \text{ (Hz)}$$

Per i materiali porosi comunemente usati per queste applicazioni, vale:

$$s' \cong \frac{0,1}{d} \text{ MN/m}^3$$

s' rigidità dinamica superficiale dello strato elastico (MN/m^3)

m'_1, m'_2 massa superficiale dei materiali delle due pareti [kg/m^2]

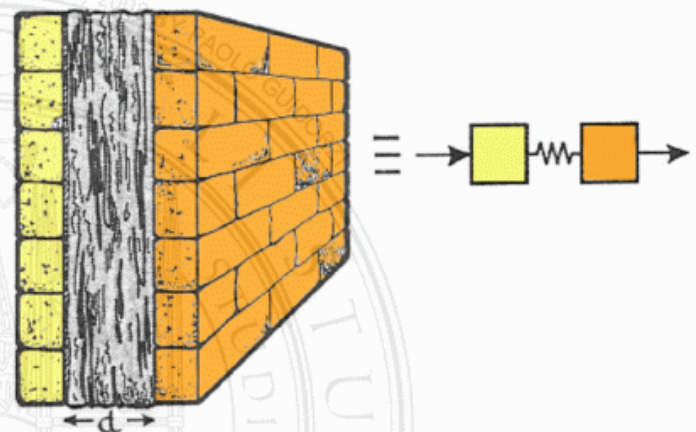
d spessore dell'intercapedine [m]

La "rigidità dinamica" descrive la capacità di deformazione elastica di un materiale soggetto ad una sollecitazione di tipo dinamico.
Cfr. UNI-EN 29052/1

Image Courtesy of Brüel & Kjær

Nel caso generale, la **frequenza di risonanza** di un sistema massa-molla-massa vale:

$$f_0 = \frac{c}{2\pi} \sqrt{\frac{\rho_{\text{cavità}}}{d} \left(\frac{1}{m'_1} + \frac{1}{m'_2} \right)} \text{ (Hz)}$$



Esempio: doppio vetro

$$\rho_{\text{aria}} = 1,21 \text{ [kg/m}^3\text{]}$$

$$\rho_{\text{vetro}} = 2500 \text{ [kg/m}^3\text{]}$$

$$x_1 = 4 \text{ [mm]}$$

$$x_2 = 7 \text{ [mm]}$$

$$d = 10 \text{ [mm]}$$



$$m'_1 = 2500 \cdot 0,004 = 10 \text{ kg/m}^2$$

$$m'_2 = 2500 \cdot 0,007 = 17,5 \text{ kg/m}^2$$

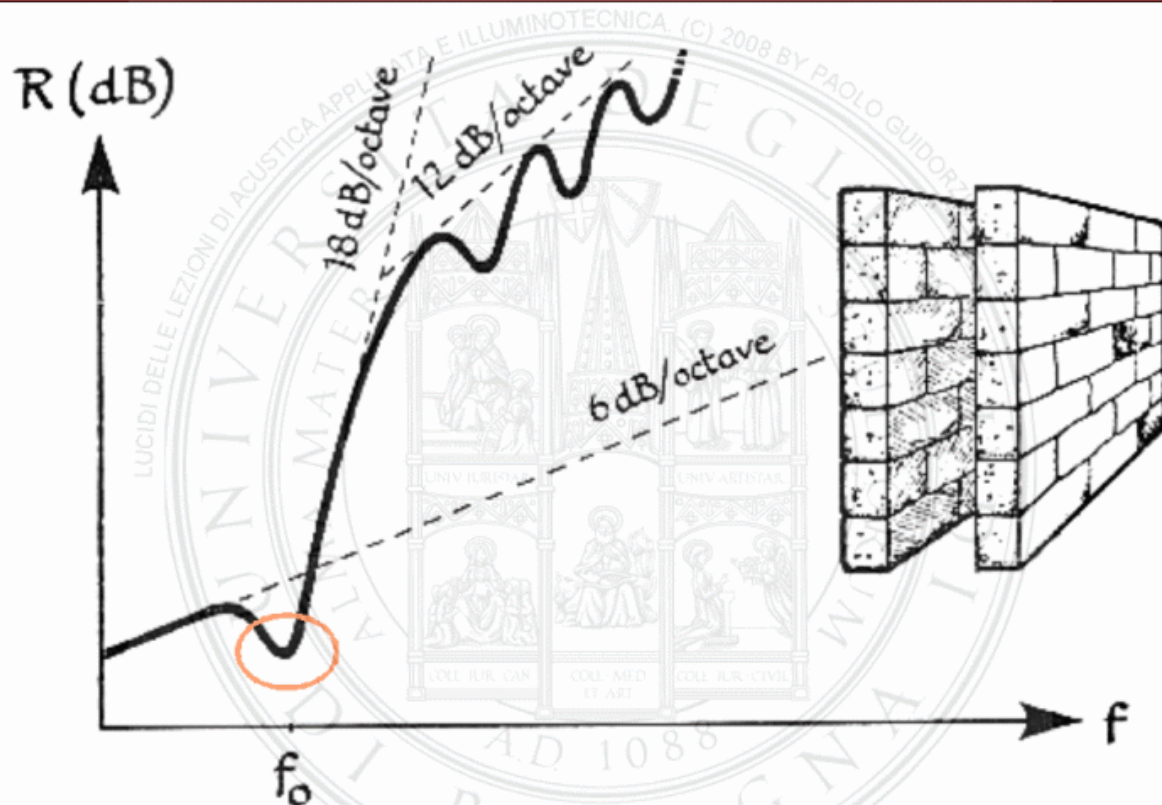
$$f_0 = \frac{340}{6,28} \sqrt{\frac{1,21}{0,01} \left(\frac{1}{10} + \frac{1}{17,5} \right)} \cong 236 \text{ Hz}$$

Image Courtesy of Brüel & Kjær

Examples	M_1 [kg/m ²]	M_2 [kg/m ²]	f_0 [Hz]	d [mm]
	100	25	< 75	32
	7,5	12,5	< 75	136
	100	21	< 75	26

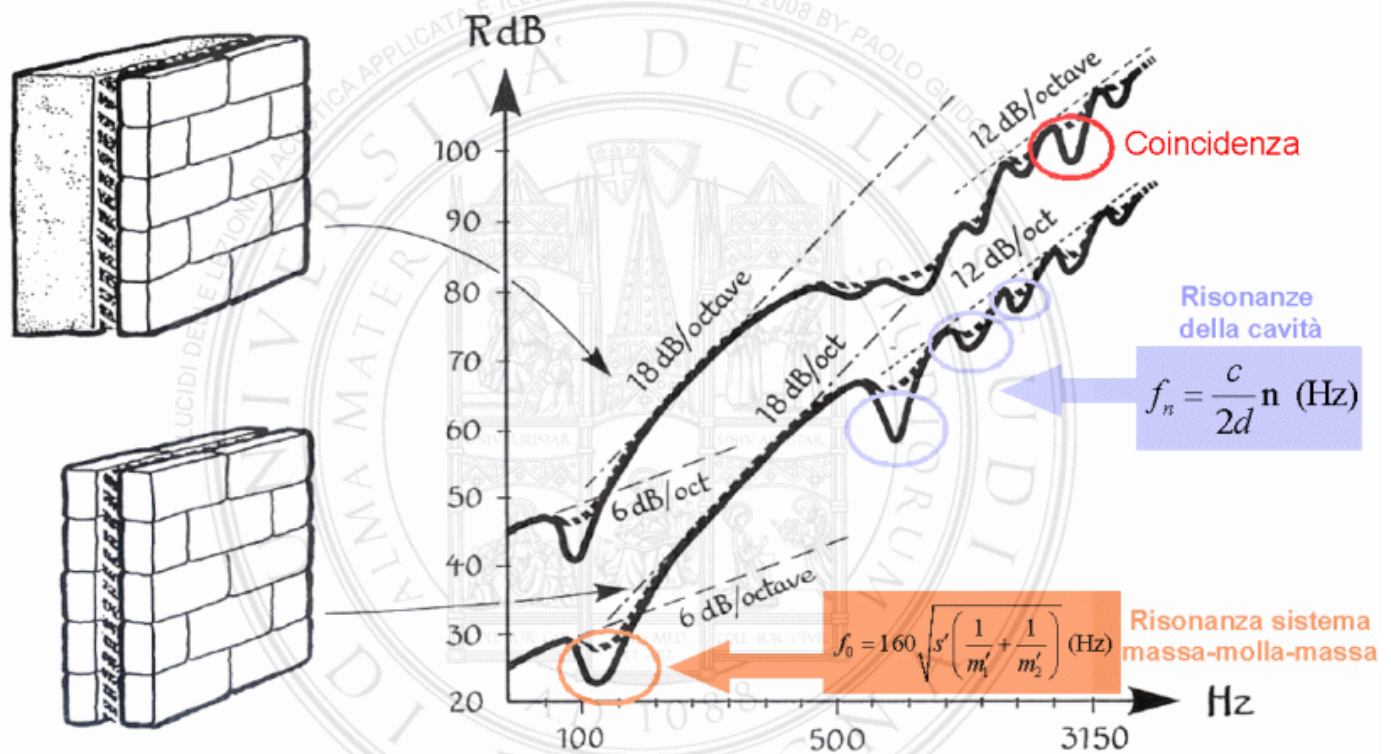
Frequenze di risonanza per alcuni tipi di pareti doppie

Image Courtesy of Brüel & Kjær



Esempio di diagramma dell'isolamento di una parete doppia

Image Courtesy of Brüel & Kjær



Frequenze di risonanza della cavità

Image Courtesy of Brüel & Kjær

Riepilogo del comportamento della parete doppia:

FREQUENZA DI RISONANZA DEL SISTEMA MASSA-MOLLA-MASSA

Sotto a tale frequenza le pareti sono completamente accoppiate. La parete si comporta come una parete di massa uguale alla somma delle due masse. Alla frequenza di risonanza si ha un brusco calo del potere fonoisolante. Tale calo si può ridurre inserendo materiale fonoassorbente all'interno della cavità.

FREQUENZA DI RISONANZA DELLA CAVITA'

Sopra a tale frequenza i pannelli sono completamente disaccoppiati. Il potere fonoisolante del sistema è circa uguale alla somma dei poteri fonoisolanti dei singoli pannelli.

Tra le due frequenze il potere fonoisolante ha una pendenza di circa 18 dB/ottava.

Materiale fonoassorbente nella cavità può ridurre anche i "buchi" dovuti alle risonanze di cavità.

Alle alte frequenze compare il fenomeno della **coincidenza**.

NOTA: per ridurre il fenomeno della coincidenza, è sempre bene che le due pareti abbiano masse diverse!

Occorre fare attenzione che la frequenza di risonanza del sistema massa-molla-massa sia fuori dal campo in cui interessa avere buon isolamento poiché a tale frequenza il potere fonoisolante è molto basso. Per abbassare questa frequenza si possono allontanare i pannelli o aumentarne la massa.

MISURA IN LABORATORIO DEL POTERE FONOISOLANTE

Norma UNI EN ISO 140-3

 Se si considera la sola trasmissione diretta D , si misura il **potere fonoisolante R** .

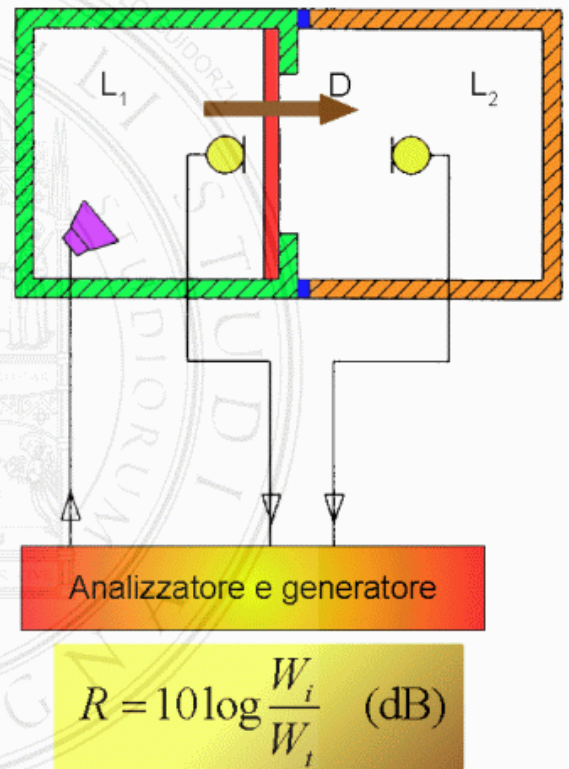
I due ambienti sono disgiunti e le trasmissioni laterali di energia minime.

 Si misurano, frequenza per frequenza, il livello medio di pressione nell'ambiente di origine L_1 e nell'ambiente ricevente L_2 . Il potere fonoisolante si ricava con la formula:

$$R = L_1 - L_2 + 10 \log \frac{S}{A} \quad (\text{dB})$$

 dove S è l'area del campione di prova in m^2 e A l'area di assorbimento equivalente, calcolata con la formula:

$$A = \frac{0,16 \cdot V}{T} \quad [\text{m}^2]$$

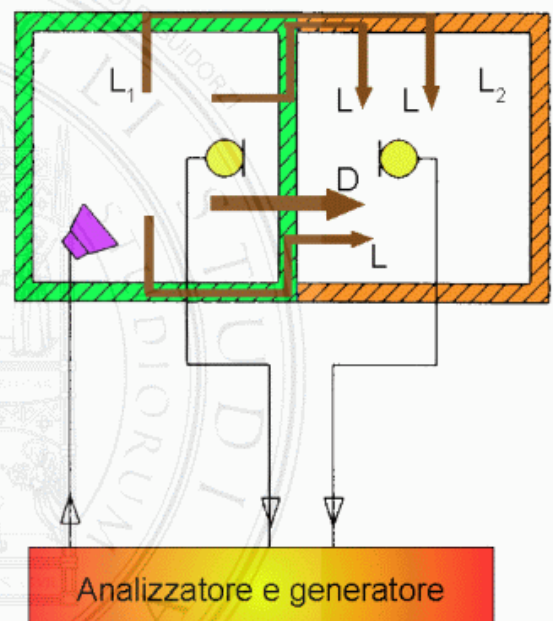
 dove T è il tempo di riverberazione dell'ambiente di ricezione.

 Considerando anche la trasmissione di energia lungo elementi laterali (L), si va a misurare il **potere fonoisolante apparente R'** .

$$R' = 10 \log \frac{W_i}{W_i + W_{lat}} \quad (\text{dB})$$

 dove W_{lat} è la potenza trasmessa per vie laterali.

La misura avviene come nel caso precedente

$$R' = L_1 - L_2 + 10 \log \frac{S}{A} \quad (\text{dB})$$



MISURA IN OPERA DEL POTERE FONOISOLANTE

Norma UNI EN ISO 140-4

Si misura il **potere fonoisolante apparente R'**
 In opera sono presenti vie di trasmissione aeree e
 strutturali non presenti in laboratorio. Si misurano quindi
 la trasmissione diretta D e quelle laterali L .

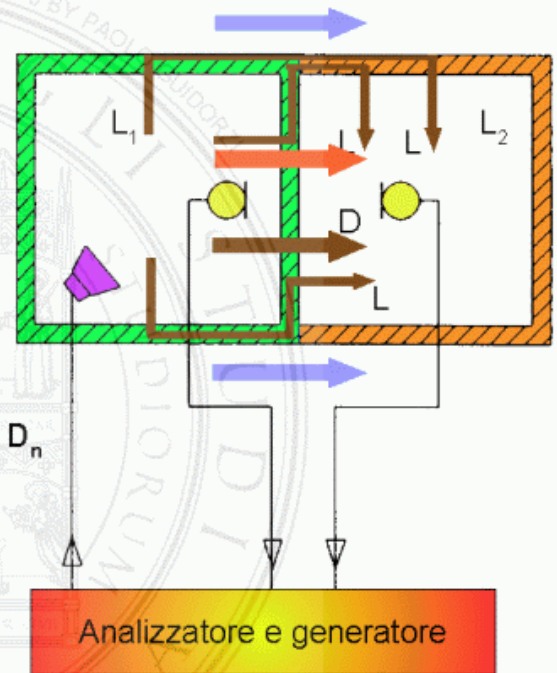
$$R' = L_1 - L_2 + 10 \log \frac{S}{A} \quad (\text{dB})$$

La ISO 140-4 permette anche di valutare un divisorio in
 opera con la misura dell'**isolamento acustico normalizzato D_n**

$$D_n = L_1 - L_2 + 10 \log \frac{A}{A_0} \quad (\text{dB})$$

dove A è l'area equivalente di assorbimento acustico
 dell'ambiente ricevente, e A_0 un valore di riferimento 10 m^2
 Oppure l'**isolamento acustico normalizzato rispetto al
 tempo di riverberazione D_{nT}** ($T_0=0,5$ secondi)

$$D_{nT} = L_1 - L_2 + 10 \log \frac{T}{T_0} \quad (\text{dB})$$



$$R' = 10 \log \frac{W_i}{W_i + W_{lat}} \quad (\text{dB})$$

PARETI COMPOSTE – ELEMENTI IN PARALLELO

Nel caso di pareti composte da più elementi (porte,
 finestre, aperture o zone di diverso spessore o
 materiale) occorre calcolare l'attenuazione totale.

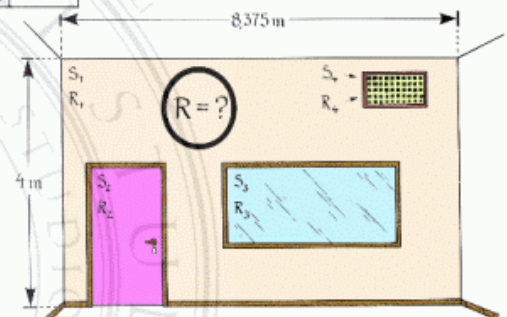
R_i dB	t_i	$S_i \text{ m}^2$	$t_i S_i$
1	50	0,00001	28,0
2	25	3,0	0,00028
3	14	2,0	
4	7	0,5	

$$S = \sum S_i =$$

$$\sum t_i S_i =$$

$$R = 10 \log_{10} \left(\frac{\sum S_i}{\sum t_i S_i} \right) =$$

$$\bar{t} = \left(\frac{\sum t_i S_i}{\sum S_i} \right) \quad t_i = 10^{\frac{-R_i}{10}} \Leftrightarrow R_i = 10 \log \left(\frac{1}{t_i} \right)$$



$$R = 10 \log \left(\frac{1}{\bar{t}} \right) = 10 \log \left(\frac{\sum S_i}{\sum t_i S_i} \right) = 10 \log \left(\frac{\sum S_i}{\sum 10^{\frac{-R_i}{10}} S_i} \right)$$

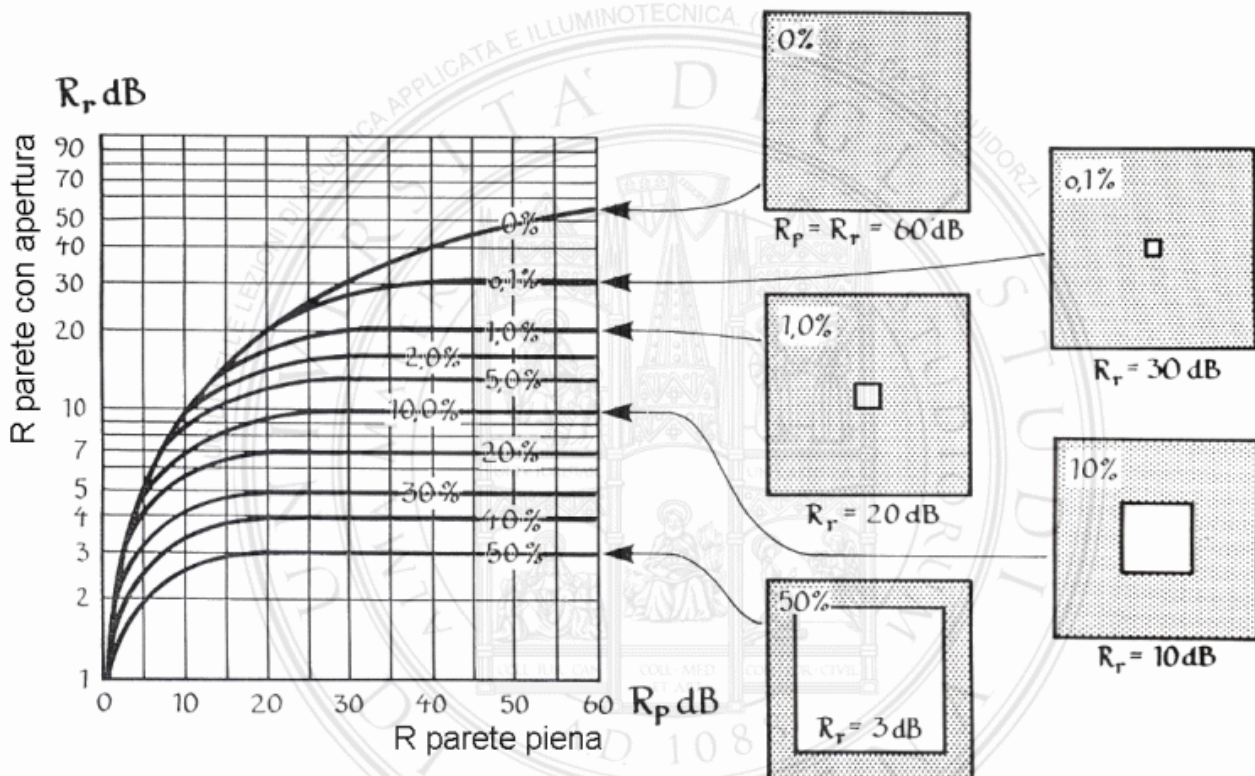
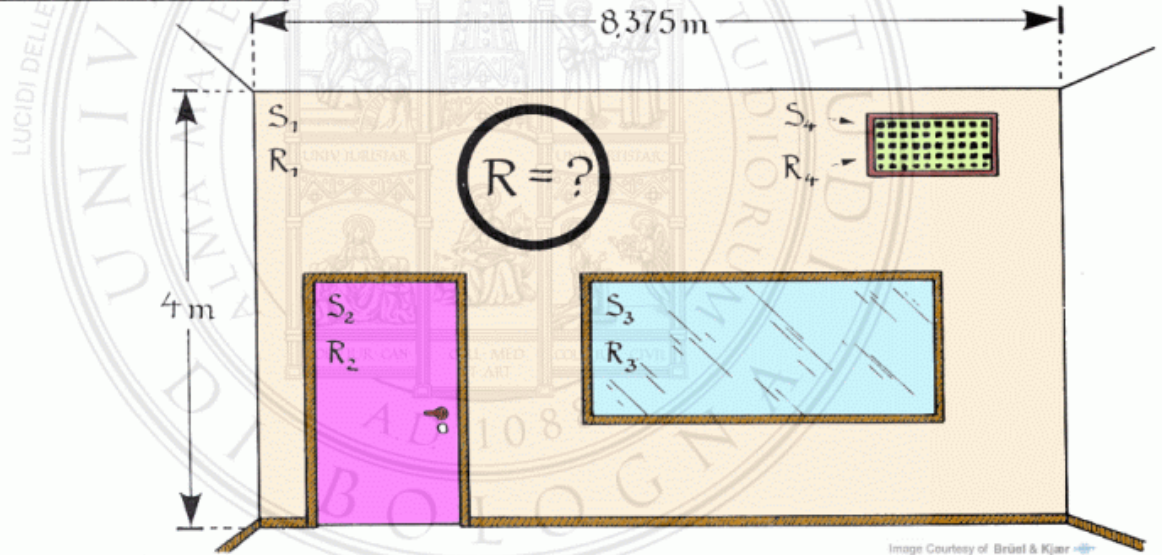
$$\tau_i = 10^{-0,1R_i}$$

	R_i dB	τ_i	S_i m ²	$\tau_i S_i$
1	50	0,00001	28,0	0,00028
2	25	0,00316	3,0	0,0095
3	14	0,0398	2,0	0,0796
4	7	0,1995	0,5	0,0998

$$S = \sum S_i = 33,5$$

$$\sum \tau_i S_i = 0,189$$

$$R = 10 \log_{10} \left(\frac{\sum S_i}{\sum \tau_i S_i} \right) = 22,5 \text{ dB}$$



ATTENZIONE: un'apertura solo dello 0,1% fa decadere il potere fonoisolante di ben 30 dB
 Un isolamento acustico efficace è basato sull'attenzione ai particolari!

$$0,1\% \Rightarrow t = 0,001 \Leftrightarrow R = 10 \log \left(\frac{1}{t} \right) = 30 \text{ dB}$$

$$1\% \Rightarrow t = 0,01 \Leftrightarrow R = 10 \log \left(\frac{1}{t} \right) = 20 \text{ dB}$$

$$10\% \Rightarrow t = 0,1 \Leftrightarrow R = 10 \log \left(\frac{1}{t} \right) = 10 \text{ dB}$$

$$50\% \Rightarrow t = 0,5 \Leftrightarrow R = 10 \log \left(\frac{1}{t} \right) = 3 \text{ dB}$$

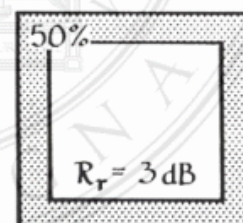
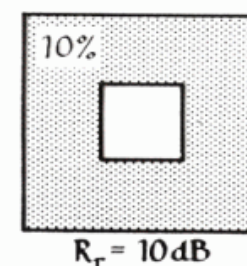
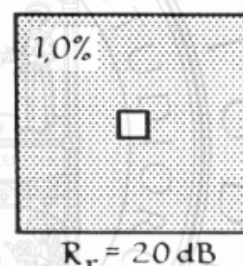
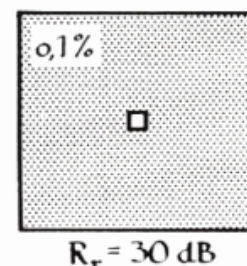
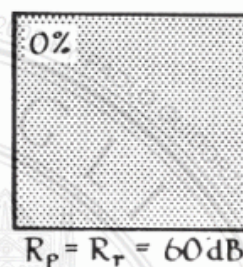


Image Courtesy of Brüel & Kjær

LIVELLO DI RUMORE DA CALPESTIO

La grandezza acustica caratteristica del solaio è il **livello sonoro impattivo normalizzato** L_n :

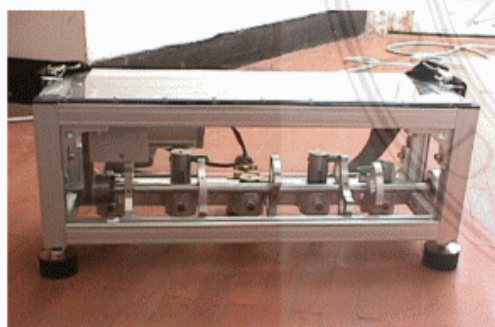
$$L_n = L_i + 10 \lg \frac{A}{A_0}$$

L_i : livello di pressione acustica nell'ambiente disturbato

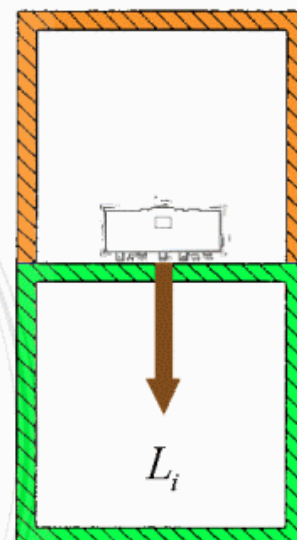
A : area equivalente di assorbimento dell'ambiente ricevente (m^2) = 0,16 V/T

A_0 : area di riferimento 10 m^2

Per la misura si usa una sorgente nota:
 il **Generatore di calpestio normalizzato**



Il generatore è un dispositivo costituito da cinque martelli d'acciaio di peso 500 g, di forma cilindrica, disposti in linea retta, che cadono perpendicolarmente sulla superficie in prova, da una altezza di 40 mm per forza di gravità.



Il livello di pressione sonora da calpestio può essere normalizzato in due modi:

1 – DPCM 5-12-97

Normalizzazione rispetto all'assorbimento acustico

$$L_n = L_i + 10 \lg \frac{A}{A_0}$$

L_i : livello di pressione acustica nell'ambiente disturbato

A : area equivalente di assorbimento dell'ambiente ricevente (m^2) = $0,16 V/T$

A_0 : area di riferimento $10 m^2$

2 – Regolamento edilizio Emilia-Romagna

Normalizzazione rispetto al tempo di riverberazione

$$L_{n,T} = L_i - 10 \lg \frac{T}{T_0}$$

T : tempo di riverberazione dell'ambiente ricevente (s)

T_0 : tempo di riferimento 0,5 s

I due metodi risultano equivalenti per un volume dell'ambiente ricevente pari a $31,25 m^3$