

## Introduzione

Nella nostra vita quotidiana abbiamo spesso a che fare con suoni indesiderati provenienti da ambienti limitrofi a quello in cui ci troviamo (per esempio rumore proveniente dall'appartamento situato sopra al nostro, dall'aula vicina, ecc.). Lo studio dell'isolamento acustico è rivolto quindi all'abbattimento del livello sonoro trasmesso all'interno degli ambienti.

## Misura del POTERE FONOISOLANTE

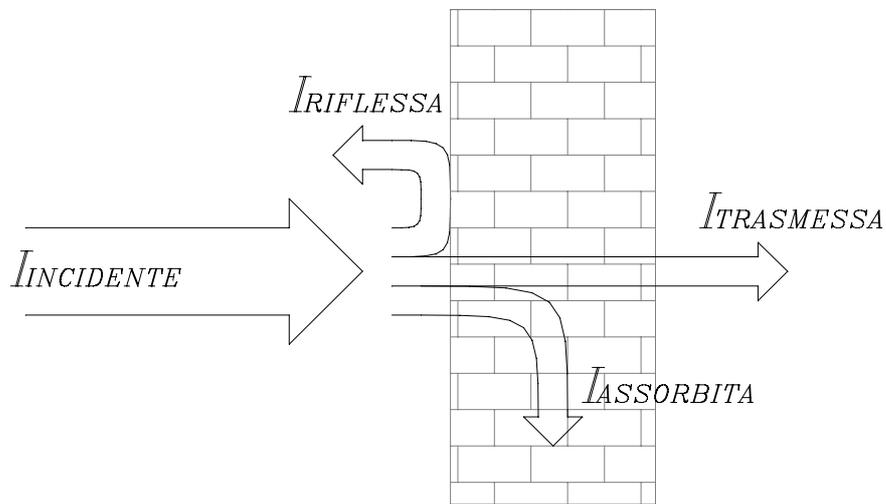


Figura 1

Quando un'onda sonora prodotta all'interno di un ambiente incontra una parete la sua intensità sonora viene in parte riflessa, in parte assorbita dal muro stesso e in parte è trasmessa nell'ambiente adiacente.

$$I_R + I_A + I_T = I_{INC} \quad (1)$$

Dividendo entrambi i membri dell'equazione per  $I_{INC}$  (1)

$$\frac{I_R}{I_{INC}} + \frac{I_A}{I_{INC}} + \frac{I_T}{I_{INC}} = \frac{I_{INC}}{I_{INC}} = 1 \quad (2)$$

Chiameremo i tre termini del primo membro rispettivamente coefficiente di riflessione, coefficiente d'assorbimento e coefficiente di trasmissione.

$$r + a + t = 1 \quad (3)$$

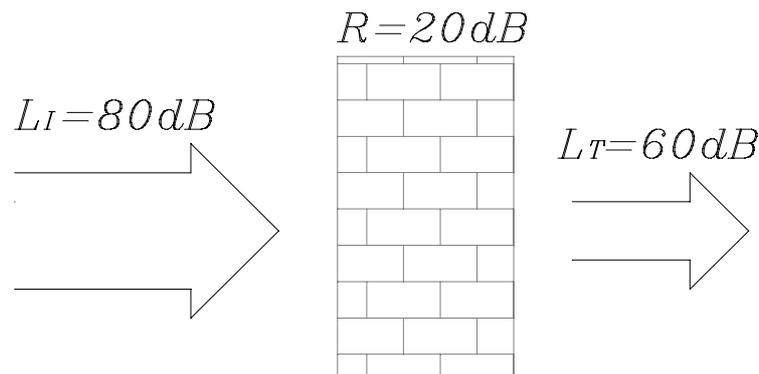
Il coefficiente d'assorbimento acustico  $\alpha$  utilizzato nelle precedenti lezioni contiene al suo interno sia l'assorbimento vero e proprio, sia il coefficiente di trasmissione: questo perché fino ad ora interessava solo che l'intensità sonora non "rimbalzasse" sulle pareti ritornando nell'ambiente che lo aveva prodotto e non ci preoccupavamo di dove si disperdeva; per esempio una finestra aperta è un buon assorbente per un osservatore posto nell'ambiente che produce il suono ( $\alpha$  grande) ma in realtà trasmette tutta l'intensità che riceve verso l'esterno: possiamo quindi pensare ad  $\alpha$  come ad un assorbimento acustico apparente.

$$\alpha = 1 - r = a + t \quad (4)$$

Il **potere fonoisolante R** si può definire come:

$$R = -\lg t \quad [dB] \quad (5)$$

Il segno meno fa sì che R sia positivo (infatti,  $T < I$  quindi il suo logaritmo è negativo). Il potere fonoisolante indica l'abbattimento in dB che il suono subisce passando attraverso una parete.



**Figura 2**

Da questa definizione si può ben capire che  $\alpha$  e  $R$  sono due parametri distinti ed indipendenti, anche se capita troppo spesso che vengano confusi. Dietro a questi parametri stanno infatti due concetti entrambi importanti ma distinti:

assorbire = non riflettere

isolare = non far uscire

Fonoassorbenti sono quindi materiali solitamente leggeri, morbidi, con impedenza simile a quella dell'aria (il massimo assorbimento si ha quando l'impedenza dei due materiali è uguale); perciò una finestra aperta ha assorbimento 1, che è l'assorbimento ideale.

Fonoisolanti sono invece materiali duri e pesanti (le onde sonore non riescono a deformarli) come per esempio una lastra di piombo.

Se metto uno strato di materiale assorbente contro le pareti otterrò un ambiente che assorbe meglio (ho introdotto in pratica un adattatore di impedenza) ma probabilmente fuori sentirò più rumore. L'isolamento acustico presenta necessità differenti rispetto all'isolamento termico. Un ottimo isolante termico come il polistirolo (anche con l'aggiunta di materiali rigidi come il poliuretano) si comporta

con il suono in modo da amplificarlo; spesso, infatti, gli isolanti acustici, che sono materiali a cellule aperte, sono pessimi isolanti temici (questi ultimi sono invece materiali a cellule chiuse) e viceversa.

Per misurare il potere fonoisolante di una parete composta da materiale uniforme (parete di cemento, piombo, ecc.) si utilizza la **legge di massa** riportata nell'equazione (6); pareti non omogenee, per esempio muri in mattoni, non rispettano fedelmente questa legge.

$$R = 20 \lg(\sigma \cdot f) - 42,5 \text{ dB} \quad (6)$$

$\sigma$  - densità superficiale della parete in  $\text{kg/m}^2$

$f$  - frequenza del suono

In realtà il valore a destra dell'uguale della (6) è pari a 44, per via del fatto che le onde sonore si muovono in modo casuale.

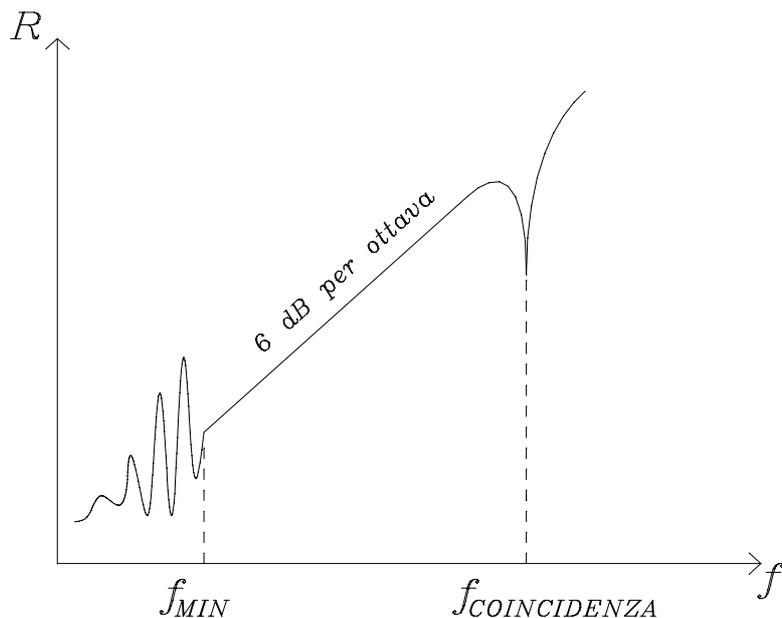
Da questa legge si può notare che il potere fonoisolante di una parete non è costante per tutte le frequenze ma cresce di  $6 \text{ dB}$  per ottava.

Per esempio una parete di cemento ( $\rho = 2400 \text{ kg/m}^3$ ) spessa  $10 \text{ cm}$  ( $= 0,1 \text{ m}$ ) avrà potere fonoisolante dato da:

$$R_{100} = 20 \lg(240 \cdot 100) - 42,5 = 45,1 \text{ dB} \quad (7)$$

$$R_{1000} = 20 \lg(240 \cdot 1000) - 42,5 = 65,1 \text{ dB} \quad (8)$$

dove  $R_{100}$  e  $R_{1000}$  sono il potere fonoisolante per il suono a frequenza rispettivamente di  $100$  e  $1000 \text{ Hz}$ , che assumono in questo esempio valori soddisfacentemente elevati. Il grafico che rappresenta il valore di  $R$  in funzione della frequenza è qui sotto riportato in figura 3.

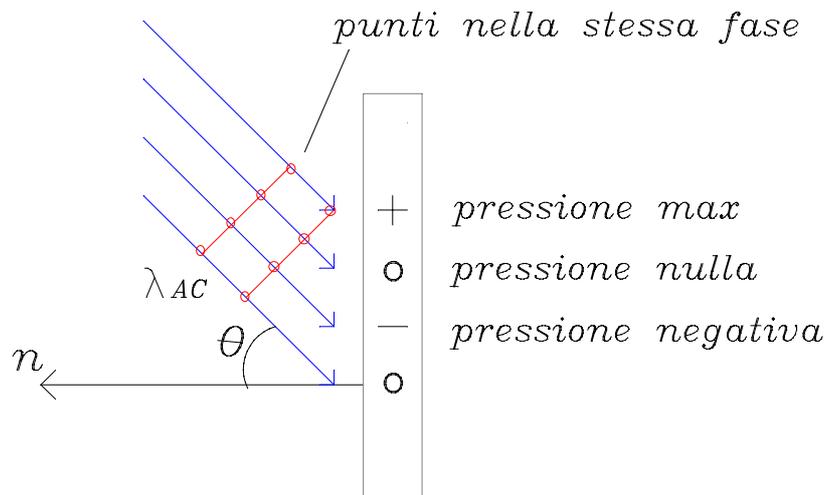


**Figura 3**

Purtroppo l'andamento lineare (6 dB per ottava) previsto dalla legge di massa si verifica nella pratica solo a frequenza intermedie. Nella zona delle basse frequenze succede che a certe frequenze la parete entra in risonanza con il suono mentre ad altre va in antirisonanza; queste frequenze dipendono da caratteristiche geometriche (le dimensioni della parete) e dai vincoli che bloccano la parete (cerniere, ecc.). Spostandosi verso le alte frequenze si incontra un'altra zona dove la curva non è lineare: ad una ben precisa frequenza detta **frequenza di coincidenza** la parete si mette a vibrare riducendo il suo **R**.

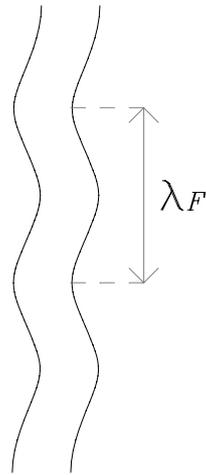
Il valore di questa frequenza è:  $f_c = \frac{c^2}{\pi \cdot S} \sqrt{\frac{3\rho \cdot (1-\nu^2)}{t}}$ . Questo fenomeno avviene

solo se le onde sonore arrivano con un'angolazione diversa dalla normale alla parete; in ogni istante ci sono punti della parete su cui l'onda acustica esercita il massimo della pressione sonora, altri dove il carico è nullo e altri ancora dove è negativo (figura 4).



**Figura 4**

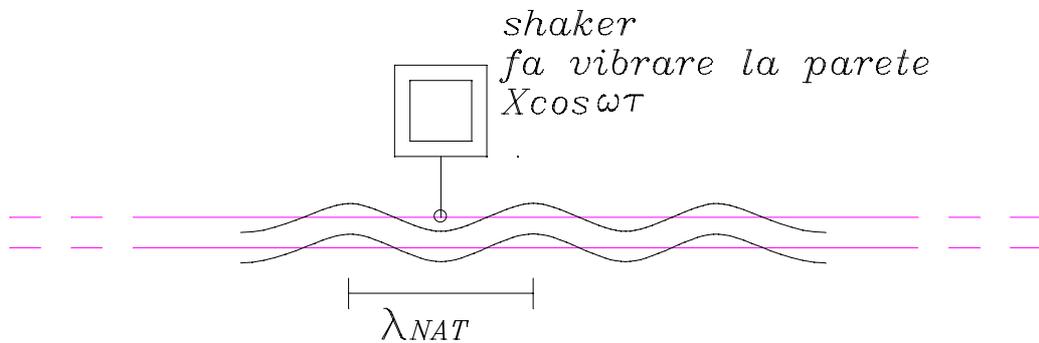
La parete tende allora a flettersi con una certa lunghezza d'onda  $\lambda_F$  (campo flessionale forzato) che dipende dall'angolo  $\theta$  e dalla lunghezza d'onda del suono incidente (9).



**Figura 5**

$$\lambda_F = \frac{\lambda_{AC}}{\text{sen } \theta} \quad (9)$$

La parete, inoltre, ha una sua lunghezza d'onda naturale  $\lambda_{NAT}$  che si può osservare se la si fa vibrare (si usa uno strumento chiamato shaker).



**Figura 6**

Si ha la coincidenza quando la lunghezza dell'onda del campo forzante (sonoro) è uguale alla lunghezza d'onda naturale misurata per un carico alla stessa frequenza. L'ampiezza del fenomeno dipende dal fattore di smorzamento del materiale: per materiali "canterini" come il vetro, con fattore di smorzamento basso,  $R$  ha una grande caduta. Per questo motivo si usa un vetro camera, fatto da due lastre di diverso spessore (quindi con diversa frequenza di coincidenza) separate da uno strato d'aria o ancor meglio da un film plastico antisfondamento come quello usato per le vetrate delle banche che fa da cuscinetto elastico smorzante. Inoltre, si può osservare che più la parete è sottile più aumenta la frequenza di coincidenza.

Si definisce infine una frequenza di risonanza

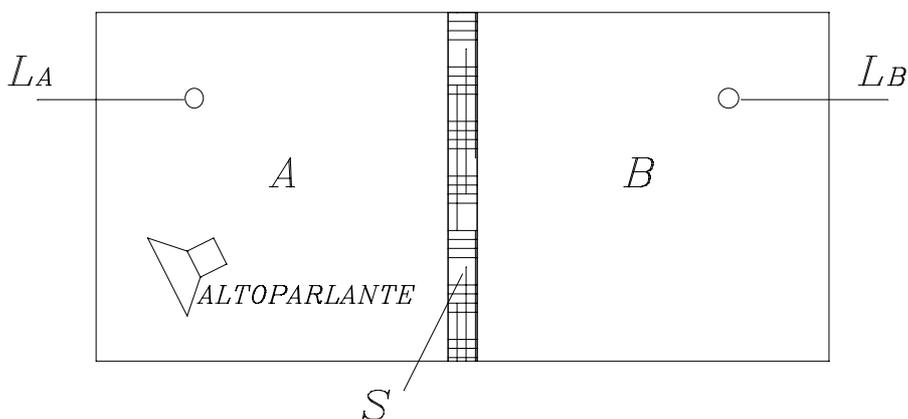
$$f_{m,n} = \frac{\pi \cdot s}{4} \sqrt{\frac{E}{3\rho \cdot (1-\nu^2)}} \left[ \left( \frac{m}{l_m} \right)^2 + \left( \frac{n}{l_n} \right)^2 \right]$$

## Misure di isolamento acustico

La misura di isolamento acustico è un problema delicato per problemi legislativi, visto che sono stati stabiliti, nella legge che tratta i requisiti acustici passivi degli edifici, i valori minimi di isolamento per i divisori verticali (pareti, finestre, ecc.), per i divisori orizzontali (solai, ecc.) e per le trasmissioni di rumore attraverso tubature ed altri impianti presenti nelle abitazioni; questi livelli minimi sono molto elevati ed inoltre richiedono misurazioni eseguite da personale specializzato, fattori che contribuiscono all'aumento del costo delle abitazioni. La legge di riferimento è il **decreto del presidente del consiglio dei ministri del 5 dicembre 1997** riguardante la determinazione dei requisiti acustici passivi degli edifici.

Se un edificio non rientra nei limiti imposti dalla legge non gli viene data l'abitabilità e spesso non è possibile fare degli aggiustamenti che risolvono il problema visto che frequentemente le cause sono strutturali (travi di metallo che propagano il suono, ecc.) e quindi si è costretti ad abbattere l'edificio.

Viene misurata la differenza di livello sonoro tra l'ambiente dove viene generato il suono e quello dove si ascolta (due stanze adiacenti facenti parte di due appartamenti diversi divise da una parete cieca (senza porte))



**Figura 7**

L'altoparlante è rivolto verso un angolo in modo che il suono sia principalmente riverberato. Le misure vanno effettuate a tutte le frequenze separatamente (secondo le norme ISO tra 100 Hz e 5 kHz in bande di 1/3 d'ottava). Se fosse

$$L_A - L_B = R \quad (10)$$

sarebbe molto facile; in realtà il livello \$L\_B\$ non dipende solo dal potere fonoisolante ma anche dalle dimensioni di B, dal suo potere fonoassorbente e dal suo riverbero.

$$W_t = k \cdot S \quad (11)$$

Dove  $W_t$  è la potenza trasmessa,  $k$  una costante e  $S$  la superficie della parete divisoria. Visto che il contributo del suono diretto è trascurabile utilizzo la formula del campo riverberante:

$$D_{REG} = \frac{4 \cdot W_t}{\alpha \cdot S_t \cdot c} \quad (12)$$

quindi si aggiunge un termine correttivo alla equazione (10) per compensare l'errore che avevamo fatto semplificando troppo il sistema fisico

$$R = L_A - L_B + 10 \cdot \lg \frac{S_{divisorio}}{\alpha \cdot S_t} \quad (13)$$

A questo punto devo misurare il  $T_{60}$  di B (ad ogni frequenza)

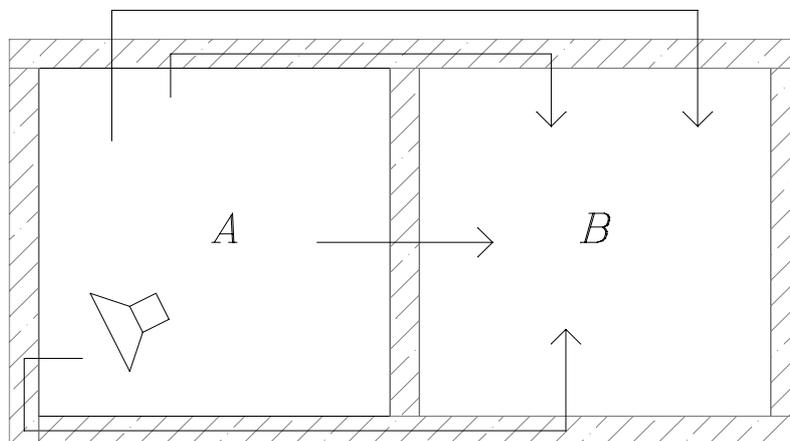
$$T_{60} = 0,16 \frac{V}{\alpha \cdot S} \quad (14)$$

$V$  – volume della stanza B

$$\alpha \cdot S = 0,16 \frac{V}{T_{60}} \quad (15)$$

$$R' = L_A - L_B + 10 \cdot \lg \left[ \frac{S_{DIV} \cdot T_{60}}{0,16 \cdot V} \right] \quad (16)$$

**$R'$  - potere fonoisolante apparente** (apparente perché lo consideriamo della parete mentre il suono può essere arrivato nell'ambiente B percorrendo anche strade diverse, vedi figura 8).  $R'$  è il valore che ottengo se effettuo le misurazioni in loco.



## Figura 8

$$R' = R - 4 \div 5 \text{ dB} \quad (17)$$

$R$  – potere fonoisolante misurato in laboratorio dove non ci sono percorsi alternativi per le onde sonore.

La legge stabilisce i valori minimi del potere fonoisolante apparente  $R'$ , non di quello misurato in laboratorio.

Solitamente per aumentare l'isolamento acustico si mette una parete doppia con in mezzo un materiale fonoisolante.

## Livello di calpestio

Un importante problema per le abitazioni è il **livello di calpestio** (fra un piano e l'altro).

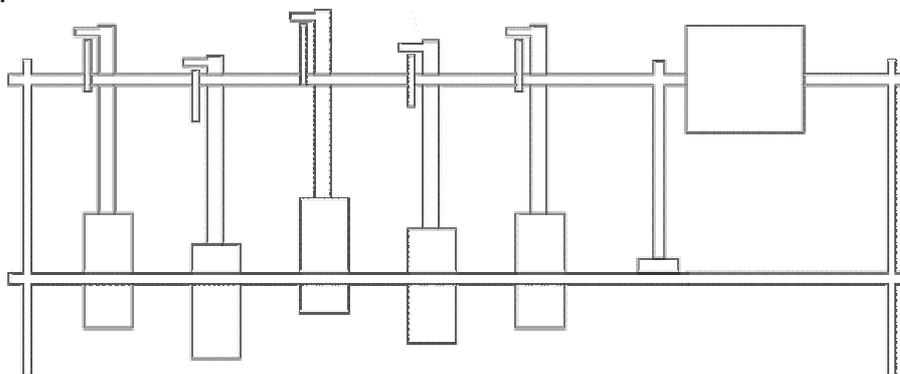


Fig. 1- schema di un generatore di calpestio

Vediamo come è fatta e come funziona la macchina di calpestio, quell'oggetto normalizzato che si appoggia sul pavimento del piano superiore per produrre il rumore che deve essere misurato nel piano sottostante. Come è illustrato in fig.1 si tratta di un sistema con un motore e delle canne che sollevano e lasciano cadere dei martelli d'acciaio. Le caratteristiche meccaniche sono le seguenti :

- 5 martelli in linea, interasse 100 mm ;
- peso dei martelli : 500 g ;
- ritmo di percussione : 10 colpi al secondo ;
- altezza di caduta : 40 mm ;
- materiale : acciaio.

In realtà la versione più nuova delle norme (uscita nel '97) specifica con grande cura il trattamento superficiale e i dettagli geometrici della testa dei martelli : raggi di curvatura, sfasamenti, ecc.; quindi non è semplicemente sufficiente garantire diametro e peso del singolo martello, ma è necessario normalizzare con grande cura la geometria della zona di battuta. Questa richiesta di grande accuratezza ha portato ad avere martelli con teste sostituibili, poiché picchiando a lungo su pavimenti duri questi dettagli geometrici vengono compromessi ed è quindi necessario che periodicamente la macchina venga revisionata.

La seguente illustrazione mostra schematicamente in che modo avviene la misura del potere fonoisolante fra due ambienti.

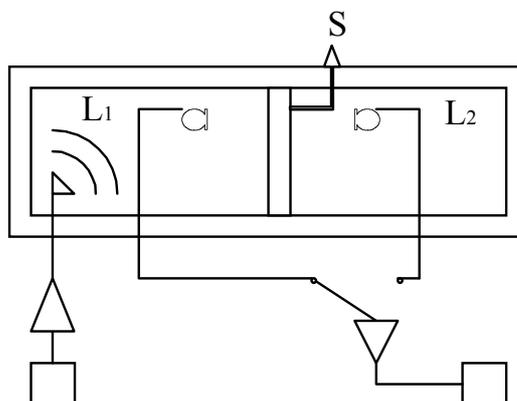


Fig. 2

Posizionando nell'ambiente 1 l'altoparlante e un microfono, nell'ambiente 2 un secondo microfono e misurando i livelli sonori si ottiene il potere fonoisolante  $R$  :

$$R = L_1 - L_2 + 10 \lg \frac{S}{A} \quad (\text{dB}) \quad (1)$$

dove  $S$  è l'area del tramezzo e  $A$  è la superficie equivalente dell'ambiente ricevente, in cui è compresa anche quella della parete di separazione. La norma che descrive questa misurazione, effettuata in laboratorio, è la ISO 140/III, mentre se la misura viene eseguita in opera occorre applicare la ISO 140/VI, la quale si occupa specificatamente dell'isolamento in opera ed indica come grandezza da misurare  $R'$ , che non è il vero potere fonoisolante del tramezzo, si chiama infatti potere fonoisolante apparente (il suo valore tiene conto anche dei cammini di fiancheggiamento) ed è la grandezza che la normativa italiana prevede di misurare. Un'altra grandezza che la normativa italiana prevede di misurare è il cosiddetto isolamento di facciata. Quest'ultimo si ottiene misurando il livello sonoro all'esterno di un edificio ed il livello sonoro in una stanza dello stesso. L'isolamento di facciata è normalmente costituito dall'isolamento dei "paraventi" (in particolare delle finestre). E' importante notare che in questo processo non si misurano semplicemente  $L_1$  e  $L_2$ , ma poiché il rumore esterno è variabile nel tempo, è necessario mediare su un intervallo temporale lungo, calcolando i livelli equivalenti in modo da avere valori stabili sia dentro che fuori. Osserviamo inoltre che la misurazione deve essere effettuata in opera, non in laboratorio, con uno strumento a due canali poiché è indispensabile che la misura sia sincrona, non si ha la garanzia che il rumore esterno rimanga costante, sebbene sia consentito dalle norme (e caldamente consigliato) l'utilizzo di un altoparlante. Questa tecnica è sostanzialmente diversa dalle precedenti, infatti nella misura in laboratorio del potere fonoisolante tutto è assolutamente stabile e invariante, quindi si può utilizzare un solo strumento, in fig.2 si nota una sorta di "switch" che mi permette di leggere prima un canale poi l'altro.

Per la prova di calpestio il problema della sincronia non si pone nemmeno, poiché si utilizza un solo microfono.

C'è infine un requisito sull'isolamento dal rumore degli impianti funzionali all'edificio, su questo la normativa italiana prevede due limiti :

- 35 dB per i rumori estemporanei di breve durata ;
- 25 dB per i rumori costanti e non intermittenti ;

ovviamente il livello non va misurato nella stanza in cui si trova la sorgente del rumore, ma in quella a fianco. Si osservi che queste sono norme che regolano l'isolamento degli edifici, non il rumore prodotto dagli impianti, l'impianto può anche produrre parecchio rumore, l'importante è che non si senta "a casa del vicino", questo è il concetto che è alla base della nostra legislazione.

Prima di chiudere il capitolo sull'isolamento occorre dire che le grandezze trattate fino ad ora sono dipendenti dalla frequenza (si ricordi la legge di massa). E'

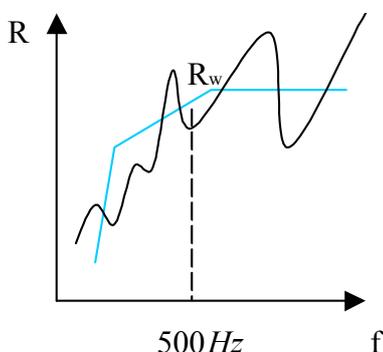


Fig. 3- curva di isolamento (nero),  
curva di riferimento (blu)

utile, e necessario per legge, tradurre la curva di isolamento (composta da più valori, poiché si lavora in terzi d'ottava) in un singolo numero, che rappresenti mediamente l'andamento su tutto lo spettro. Si utilizza la cosiddetta tecnica dell'indice di valutazione. La normativa che stabilisce come fare il calcolo dell'indice di valutazione è la ISO 717, la quale contiene uno spettro normalizzato del potere fonoisolante, spettro che, come si può vedere in fig.3, è costituito da un segmento ad alta pendenza (il valore aumenta 6 dB per ottava), un segmento a media pendenza (il valore aumenta 3 dB per ottava) e un segmento orizzontale (il valore non varia con la frequenza). Il tutto è costruito a partire da un valore di riferimento a 500 Hz che è 56 dB. La curva di riferimento viene fatta traslare in verticale sul diagramma fino a che si verifica una determinata condizione sul valor medio degli scostamenti positivi (per scostamenti positivi si intendono le differenze tra la curva alta e dato sperimentale più basso). Sostanzialmente la curva viene fatta scendere sul diagramma a passi di 1 dB e ogni volta si calcola il valor medio aritmetico delle "differenze positive" (all'inizio la somma ed il valor medio saranno molto grandi) come segue :

$$\Delta_{Medio} = \frac{\sum_{i=1}^{N_b} (L_{rif} - R_{sper})_i}{N_b} \leq 2 dB \quad (2)$$

considerando il valore tra parentesi se lo stesso è positivo, non considerandolo se è negativo. Ci si ferma quando si verifica per la prima volta che lo stato medio è minore di 2 dB. Quando ciò si verifica si legge il valore che si ha sulla curva di riferimento a 500 Hz, tale valore si dice  $R_w$  (il pedice "w" indica che si tratta di un indice di valutazione) ed è su di esso che sono posti dei limiti dalla vigente normativa italiana.

Per il livello normale di calpestio la cosa è speculare anche se non identica (normalmente questo è un rumore che scende andando verso le alte frequenze). La curva di riferimento in questo caso va fatta salire perché, mentre il potere fonoisolante è un parametro che è bene sia grande, il livello di calpestio è bene sia piccolo. Si parte con la curva che ha un valore a 500 Hz di 40 dB, poi la si fa salire a passi di 1 dB, finché la somma degli scarti positivi (positivi quando la curva sperimentale è sotto la curva di riferimento) è tale per cui  $\Delta_{medio} \leq 2\text{dB}$ .

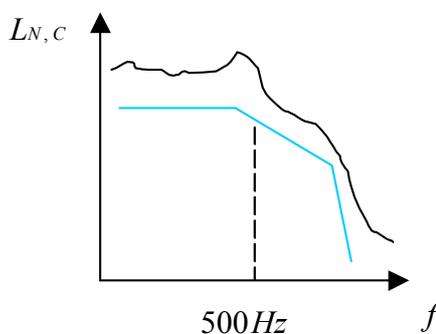
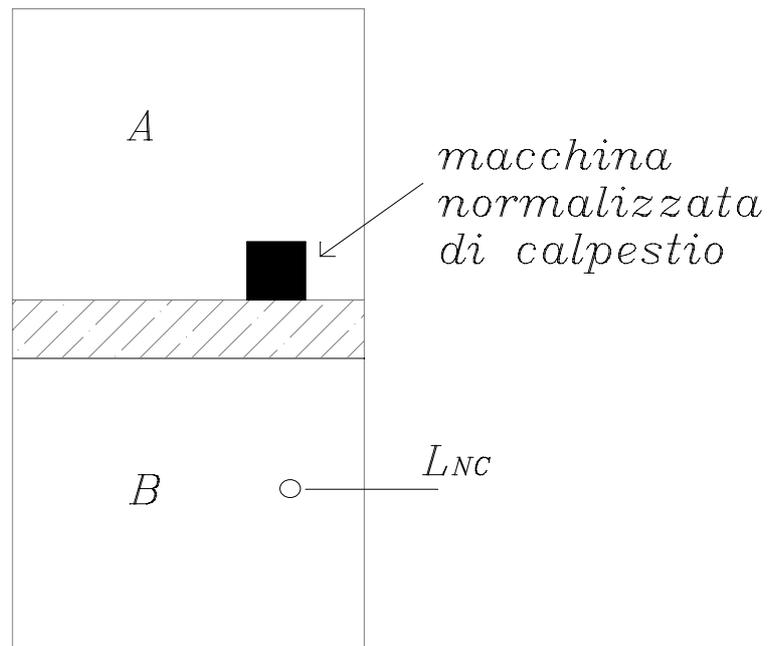


Fig.4- livello normalizzato di calpestio

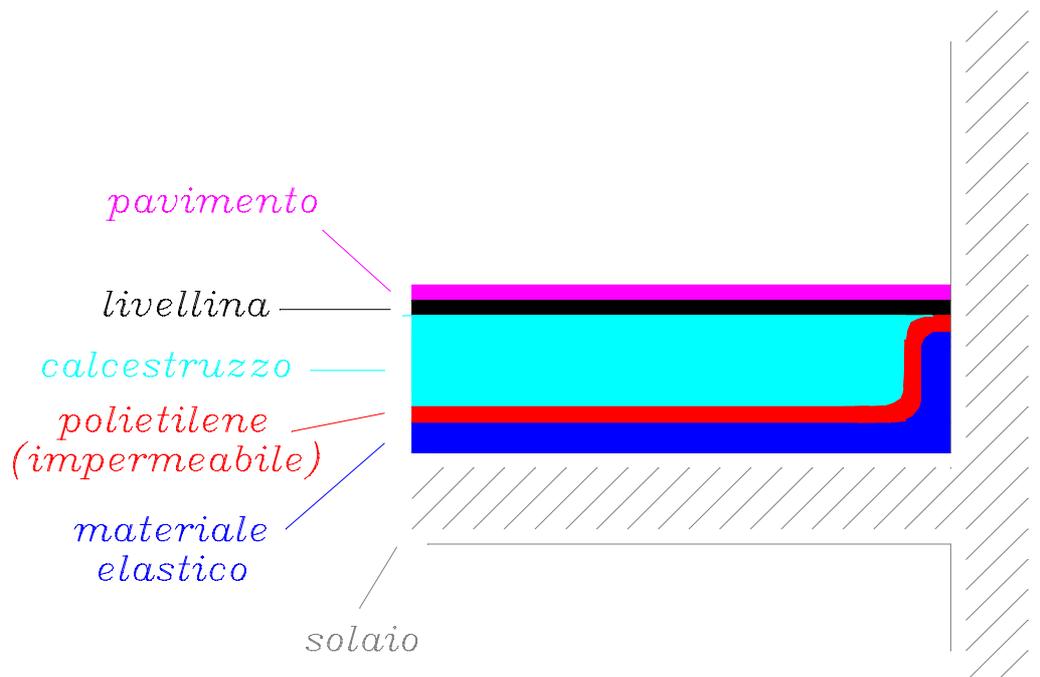
Anche il livello di calpestio deve essere misurato in opera (non in laboratorio) nel seguente modo: si posiziona una **macchina normalizzata di calpestio** nel locale disturbante (normalizzata perché deve avere caratteristiche specifiche indicate nelle norme ISO), composta da 5 martelli d'acciaio che pesano 200 g l'uno che cadono da 50 mm di altezza, e con un fonometro si misura nell'ambiente sottostante lo spettro del livello normalizzato di calpestio (come prima dobbiamo tenere conto del tempo di riverbero).





**Figura 5**

I limiti minimi stabiliti per legge sono molto elevati, mentre con i pavimenti in cotto, in pavet, in marmo, piastrellati, ecc., molto utilizzati in Italia, si misurano livelli elevati (anche  $10\text{ dB}$  oltre i limiti); la moquette al contrario consente un ottimo isolamento (in particolare se molto spessa come viene molto usata in Gran Bretagna da dove è stata presa la legge). La soluzione “vera” che permette di eliminare il problema è il cosiddetto **pavimento galleggiante** (figura 10).



**Figura 6**

Per stare nei limiti imposti dalla legge serve un dimensionamento tipo: solaio (deve reggere tutto il peso) = 25 cm, materiale elastico (serve a svincolare lo “zatterone” dal solaio) = 2÷3 cm, calcestruzzo = 7÷8 cm (anche armato), livellina + piastrelle = 5 cm. Con un pavimento di questo tipo, dovendo costruire un palazzo, si perde almeno un piano .