

Michele Pascali

ACUSTICA AMBIENTI INTERNI

PROPAGAZIONE ED ATTENUAZIONE DEL RUMORE, FONOASSORBIMENTO, FONOIOLAMENTO

- Propagazione in ambienti chiusi o confinati, per via aerea e strutturale attraverso divisori
 - Progettazione degli ambienti e isolamento dalle vibrazioni

TERZA EDIZIONE



SOFTWARE INCLUSO

MODULISTICA E SCHEMA DI RELAZIONE TECNICA AI SENSI DEL D.P.C.M. N. 215/1999




GRAFILL

Michele Pascali

ACUSTICA AMBIENTI INTERNI

ISBN 13 978-88-8207-781-5

EAN 9 788882 077815

Manuali, 177

Terza edizione, luglio 2015

Pascali, Michele <1951->
Acustica ambienti interni / Michele Pascali. – 3. ed. – Palermo :
Grafill, 2015
(Manuali ; 177)
ISBN 978-88-8207-781-5
1. Acustica architettonica.
620.25 CDD-22 SBN Pal0282041
CIP – Biblioteca centrale della Regione siciliana "Alberto Bombace"

Il volume è **disponibile anche in versione eBook** (formato *.pdf) compatibile con **PC, Macintosh, Smartphone, Tablet, eReader**.
Per l'acquisto di eBook e software sono previsti pagamenti con conto corrente postale, bonifico bancario, carta di credito e paypal.
Per i pagamenti con carta di credito e paypal è consentito il download immediato del prodotto acquistato.

Per maggiori informazioni inquadra con uno smartphone o un tablet il codice QR sottostante.



I lettori di codice QR sono disponibili gratuitamente su Play Store, App Store e Market Place.

Il disegno di copertina è stato in parte realizzato
nell'ambito di uno stage presso la Grafill S.r.l.

© **GRAFILL S.r.l.**

Via Principe di Palagonia, 87/91 – 90145 Palermo

Telefono 091/6823069 – Fax 091/6823313

Internet <http://www.grafill.it> – E-Mail grafill@grafill.it

Finito di stampare nel mese di luglio 2015

presso **Officine Tipografiche Aiello & Provenzano S.r.l.** Via del Cavaliere, 93 – 90011 Bagheria (PA)

Tutti i diritti di traduzione, di memorizzazione elettronica e di riproduzione sono riservati. Nessuna parte di questa pubblicazione può essere riprodotta in alcuna forma, compresi i microfilm e le copie fotostatiche, né memorizzata tramite alcun mezzo, senza il permesso scritto dell'Editore. Ogni riproduzione non autorizzata sarà perseguita a norma di legge. Nomi e marchi citati sono generalmente depositati o registrati dalle rispettive case produttrici.

A mia moglie

INDICE

PREMESSA	p.	9
1. PROPAGAZIONE DEL RUMORE AEREO ALL'INTERNO DI AMBIENTI CHIUSI O CONFINATI	"	11
1.1. Introduzione	"	11
1.2. Propagazione del suono in ambiente chiuso, dovuto a una sorgente funzionante al suo interno	"	12
1.2.1. Livello di pressione sonora in un ambiente chiuso completamente assorbente (campo sonoro diretto)	"	13
1.2.2. L'assorbimento acustico	"	15
1.2.3. Fenomeni acustici negli ambienti chiusi	"	18
1.2.4. Tempo di riverberazione e la formula di Sabine	"	33
1.2.5. L'assorbimento acustico dell'aria	"	38
1.2.6. Livelli sonori in uffici a pianta aperta (senza divisori) open space	"	40
1.3. La propagazione sonora in un condotto	"	43
2. MATERIALI FONOASSORBENTI	"	49
2.1. I materiali fonoassorbenti	"	49
2.1.1. Materiali assorbenti per porosità (medie/alte frequenze) .	"	49
2.1.2. Materiali assorbenti per risonanza di cavità (medie frequenze)	"	58
2.1.3. Materiale assorbente per risonanza di membrana	"	63
3. LA PROGETTAZIONE ACUSTICA DEGLI AMBIENTI: TRATTAMENTI DI FONOASSORBIMENTO	"	67
3.1. Criteri generali per la progettazione acustica dei locali dal punto di vista dell'assorbimento acustico	"	67
3.1.1. Scelta della forma	"	67
3.1.2. Parametri oggettivi per la qualificazione acustica dei locali	"	70
3.1.3. Calcolo delle unità assorbenti	"	73
3.1.4. Disposizione geometrica delle unità assorbenti	"	78

3.2.	La correzione acustica di un ambiente	p.	79
3.2.1.	Metodo teorico	~	81
3.2.2.	Metodo sperimentale	~	95
3.2.3.	Posizionamento dei materiali	~	96
3.3.	Trattamenti di fonoassorbimento degli ambienti di lavoro non industriali in funzione della loro destinazione d'uso	~	97
3.3.1.	Uffici	~	102
3.3.2.	Attività commerciali	~	103
3.3.3.	Ambienti scolastici	~	104
3.3.4.	Strutture sanitarie	~	104
3.4.	Trattamento di fonoassorbimento dei condotti	~	104
4.	PROPAGAZIONE DEL RUMORE PER VIA AEREA ATTRAVERSO DIVISORI	~	109
4.1.	Trasmissione del rumore per via aerea attraverso divisori di locali adiacenti	~	109
4.1.1.	Meccanismo di propagazione dei rumori aerei	~	109
4.1.2.	Potere fonoisolante	~	110
4.1.3.	Potere fonoisolante di divisori semplici: legge della massa, fenomeni di risonanza, effetti di coincidenza	~	114
4.1.4.	Potere fonoisolante di divisori con zone deboli (presenza di finestre, fori, porte, ecc.) (Potere fonoisolante medio)	~	125
4.1.5.	Potere fonoisolante di divisori doppi	~	127
4.2.	Trasmissione del rumore per via aerea attraverso divisori dall'interno verso l'ambiente esterno	~	131
4.3.	Isolamento acustico per rumori aerei	~	133
5.	TRASMISSIONE DEL RUMORE PER VIA STRUTTURALE (RUMORI IMPATTIVI)	~	135
5.1.	Generalità	~	135
5.2.	Livello di rumore di calpestio	~	137
5.3.	Attenuazione del rumore di calpestio	~	139
5.3.1.	Pavimentazione elastica	~	141
5.3.2.	Pavimento galleggiante	~	145
5.3.3.	Controsoffitto elasticamente sospeso	~	148
6.	LA PROGETTAZIONE ACUSTICA DEGLI AMBIENTI: TRATTAMENTI DI FONOISOLAMENTO	~	149
6.1.	Introduzione	~	149
6.2.	Riduzione della trasmissione del rumore tra ambienti	~	149

6.2.1.	Interventi per limitare la trasmissione diretta e indiretta e ottenere un buon isolamento	p.	150
6.2.2.	Struttura ad elevato potere fonoisolante	"	163
6.2.3.	Criteri per una corretta progettazione acustica dei locali di pubblico spettacolo (comprese le multisale) dal punto di vista dell'isolamento acustico.....	"	164
6.3.	Riduzione del rumore per mezzo di cappe di rivestimento.....	"	190
6.4.	Influenza degli impianti sull'acustica degli edifici	"	192
6.4.1.	Impianti di riscaldamento	"	193
6.4.2.	Impianti di condizionamento e di refrigerazione.....	"	194
6.4.3.	Impianti idrici di alimentazione e scarico	"	196
6.4.4.	Impianti di sollevamento (ascensori).....	"	197
6.4.5.	Impianti elettrici	"	199
6.5.	Isolamento delle vibrazioni	"	199
6.5.1.	Sistemi oscillanti	"	201
6.5.2.	Trasmissione delle vibrazioni e loro attenuazione.....	"	205
6.5.3.	Elementi per realizzare l'isolamento e lo smorzamento vibrazionale	"	213
6.5.4.	Dispositivi particolari.....	"	231
6.5.5.	Collegamenti elastici.....	"	232
6.5.6.	La misura delle vibrazioni	"	232
PROCEDURE E MODULISTICA			" 235
A.	Schemi di indagine per l'ottimizzazione acustica di un ambiente confinato (correzione acustica)	"	235
A1.	Metodo teorico.....	"	235
A2.	Metodo sperimentale	"	237
A3.	Impiego di software previsionali	"	239
B.	Schema di relazione tecnica ai sensi del D.P.C.M. 16 aprile 1999, n. 215 "Regolamento recante norme per la determinazione dei requisiti acustici delle sorgenti sonore nei luoghi di intrattenimento danzante e di pubblico spettacolo e nei pubblici esercizi"	"	242
B1.	Modello di autocertificazione	"	245
C.	Schema tipo per la definizione dell'isolamento vibrazionale (scelta degli antivibranti).....	"	246
INSTALLAZIONE DEL SOFTWARE INCLUSO.....			" 249
-	Note sul software incluso	"	249

– Requisiti hardware e software	p.	249
– Download del software e richiesta della password di attivazione	~	249
– Installazione ed attivazione del software	~	250
BIBLIOGRAFIA	~	251
– Testi	~	251
– Cataloghi e documentazione tecnica ditte produttrici materiali fonoisolanti e fonoassorbenti, strumentazione	~	251
– Siti Web	~	252
LICENZA D’USO	~	255
SCHEDE DI REGISTRAZIONE	~	256

PREMESSA

La tipologia del rumore negli ambienti confinati e negli edifici è generalmente costituita dal rumore aereo e dal rumore d'impatto.

Il rumore aereo è caratterizzato dal fatto che l'emissione avviene, all'origine, direttamente in aria. Ad esempio possono essere considerati rumori aerei quelli prodotti dalle seguenti sorgenti: voce, radio, TV, elettrodomestici in genere.

Il rumore d'impatto, invece, è dovuto all'eccitazione diretta che si verifica quando due solidi entrano bruscamente in contatto. Gli urti e le vibrazioni che ne derivano si propagano per via solida attraverso i due corpi per poi trasformarsi in rumore aereo. Un esempio in questo caso è costituito dal così detto rumore di calpestio.

Lo scopo principale del testo è quello di fornire una base di conoscenza riguardo agli aspetti teorici e pratici della propagazione del suono e/o rumore negli ambienti chiusi o confinati, di suggerire i tipi di interventi necessari per ridurre, modificare, ostacolare la propagazione del suono e/o rumore e di indicare le soluzioni da adottare per una corretta progettazione acustica, sia dal punto di vista dell'assorbimento, che dell'isolamento acustico.

PROPAGAZIONE DEL RUMORE AEREO ALL'INTERNO DI AMBIENTI CHIUSI O CONFINATI

▼ 1.1. Introduzione

Quando un'onda sonora colpisce una superficie, l'energia sonora incidente viene in parte riflessa, in parte assorbita e in parte trasmessa attraverso la superficie stessa (fig. 1.1.1).

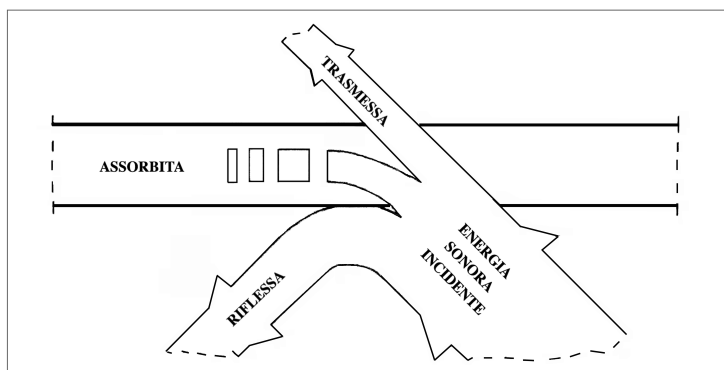


Fig. 1.1.1. Propagazione dell'energia sonora incidente

La parte di energia sonora che viene riflessa dipende dalle caratteristiche di assorbimento acustico della superficie, mentre la parte che viene trasmessa dipende dalle caratteristiche di isolamento acustico del sistema.

In un ambiente chiuso è perciò fondamentale distinguere, con chiarezza, queste due caratteristiche:

- *l'assorbimento acustico* che è l'attitudine delle superfici che lo delimitano a non riflettere i suoni, i relativi coefficienti di assorbimento acustico indicano la frazione di energia sonora non riflessa (essi variano da 0 per le superfici totalmente riflettenti a 1 per le superfici totalmente assorbenti);
- *l'isolamento acustico* che è l'attitudine delle superfici che lo delimitano a non trasmettere suoni ed è rappresentato dall'attenuazione in [dB] che il suono subisce nell'attraversarle.

Sia l'assorbimento acustico che l'isolamento acustico variano in funzione della frequenza del segnale sonoro e quindi vanno analizzati in funzione di essa.

È importante precisare inoltre, che il comportamento acustico di un ambiente dipende dai diversi elementi che lo compongono, la cui scelta, disposizione ed assemblaggio sono qualificanti e condizionanti ai fini del risultato che s'intende conseguire.

Nel presente capitolo viene trattata la propagazione sonora in un ambiente chiuso, le cui dimensioni sono grandi rispetto alla lunghezza d'onda (λ) della più bassa frequenza che interessa, cioè vengono esclusi i piccoli spazi, il cui comportamento nei confronti del suono è oggetto di studio di un particolare settore dell'acustica che riguarda, tra l'altro, i silenziatori e le cavità risonanti.

▼ 1.2. Propagazione del suono in ambiente chiuso, dovuto a una sorgente funzionante al suo interno

La propagazione delle onde sonore all'interno di un ambiente chiuso, oltre che dal tipo di sorgente (S) in esso presente¹, dipende dalle superfici al contorno e dagli oggetti in esso contenuti.

Se un ambiente è costituito da superfici completamente assorbenti, l'energia sonora che perviene al punto di ricezione (R) in condizioni stazionarie, è data esclusivamente da quella direttamente irradiata dalla sorgente (vedi fig. 1.2.1) e il campo sonoro è detto diretto.

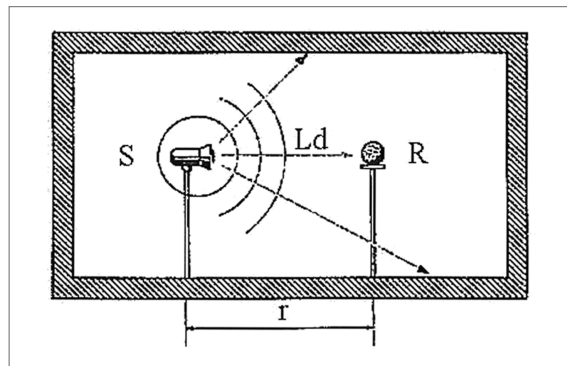


Fig. 1.2.1. *Rappresentazione dell'energia sonora in un ambiente chiuso non riflettente (pareti, soffitto e pavimento completamente assorbenti)*

In generale, però, le superfici di un ambiente riflettono le onde sonore, per cui nel punto di ricezione non arriva solo l'energia irradiata direttamente dalla sorgente, ma, in condizioni stazionarie, gli perviene anche tutta quell'energia acustica irradiata in ogni altra direzione (vedi fig. 1.2.2).

Le onde che raggiungono il punto di ricezione sono di due tipi:

- quelle provenienti direttamente dalla sorgente (L_d) che danno vita a un campo sonoro diretto;
- quelle che arrivano al punto di ricezione dopo aver subito riflessioni semplici (L_{r1}) o multiple (L_{r2}) contro le pareti del locale che danno vita a un campo sonoro riflesso o riverberato.

¹ Omnidirezionale, con direttività, ecc.

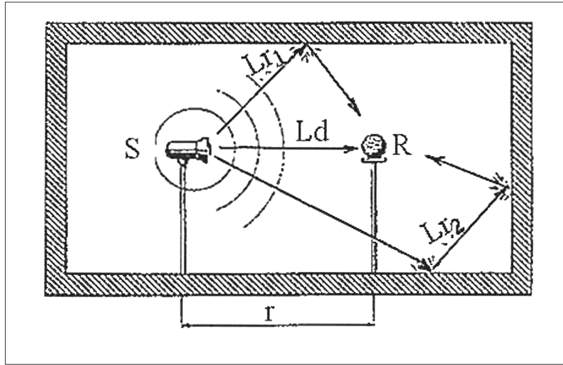


Fig. 1.2.2. Rappresentazione dell'energia sonora in un ambiente chiuso riflettente

L'entità di queste ultime dipende dalla natura, finitura e disposizione delle superfici che delimitano l'ambiente, più le pareti sono pesanti e lisce, quindi riflettenti, più queste onde sono numerose e di elevata intensità. In generale, quindi, il campo sonoro presente in un ambiente è dovuto al campo sonoro diretto e al campo sonoro riflesso o riverberato.

Eccetto che nello spazio prossimo alla sorgente, il campo sonoro che generalmente si instaura, a regime, nell'ambiente in condizioni stazionarie, è un campo sonoro uniformemente diffuso.

1.2.1. Livello di pressione sonora in un ambiente chiuso completamente assorbente (campo sonoro diretto)

Nel caso ideale, in cui le superfici che delimitano un ambiente sono completamente assorbenti, la potenza sonora che perviene al punto di ricezione, in condizioni stazionarie, è quella direttamente irradiata dalla sorgente data da:

$$W = \frac{p^2}{\rho c} 4\pi r^2 \text{ [W]} \tag{1.2.1}$$

dove:

ρ = densità dell'aria $\left[\frac{Kg}{m^3} \right]$

c = velocità del suono $\left[\frac{m}{s} \right]$

r = distanza tra il punto di ricezione e la sorgente [m]

p = pressione sonora $\left[\frac{N}{m^2} \right] = [Pa]$

La relazione che correla il livello di pressione sonora alla distanza r dalla sorgente (L_p) con il livello di potenza sonora della sorgente (L_w) è data da:

$$L_p = L_w + 10 \log \frac{1}{4\pi r^2} \text{ [dB]} \quad (1.2.2)$$

o da:

$$L_p = L_w - 11 - 20 \log r \text{ [dB]} \quad (1.2.3)$$

e ricordando le proprietà dei logaritmi anche da:

$$L_p = L_w - 10 \log 4\pi r^2 \text{ [dB]} \quad (1.2.4)$$

in quanto:

$$10 \log \frac{1}{4\pi r^2} = 10 \log 1 - 10 \log 4\pi r^2 = 0 - 10 \log 4\pi r^2 = -10 \log 4\pi r^2$$

In fig. 1.2.3 si riporta l'andamento di $L_p - L_w$ in funzione della distanza r dalla sorgente. Come si può rilevare dalla sua osservazione se si raddoppia la distanza dalla sorgente si ha una riduzione del livello sonoro di 6 dB.

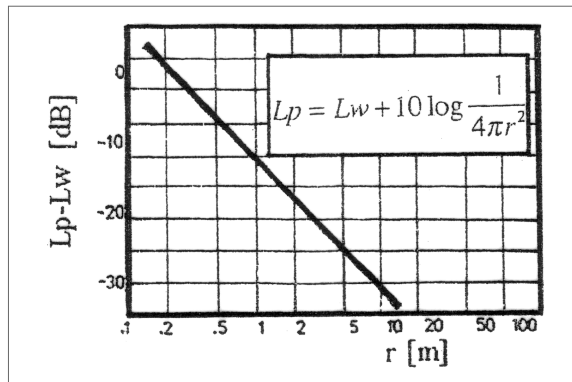


Fig. 1.2.3. Riduzione del livello sonoro con la distanza dalla sorgente

Nel caso in cui la sorgente presenta una direttività, le relazioni precedenti diventano:

$$W = \frac{p^2}{\rho c} \frac{4\pi r^2}{Q} \text{ [W]} \quad (1.2.1')$$

$$L_p = L_w + 10 \log \frac{Q}{4\pi r^2} \text{ [dB]} \quad (1.2.5)$$

dove Q = fattore di direttività.

Ricordando le proprietà dei logaritmi, la (1.2.5.) si può anche scrivere in questo modo:

$$L_p = L_w - 10 \log 4\pi r^2 + 10 \log Q \text{ [dB]} \quad (1.2.6)$$

e posto $10 \log Q = ID$ "indice di direttività" si ha:

$$Lp = Lw - 10 \log 4\pi r^2 + ID \text{ [dB]} \quad (1.2.7)$$

$$Lp = Lw - 11 - 20 \log r + ID \text{ [dB]} \quad (1.2.8)$$

Se si confrontano queste relazioni con quelle relative alla propagazione del suono in campo libero si rileva che esse risultano identiche.

1.2.2. L'assorbimento acustico

L'assorbimento acustico è l'attitudine di un materiale a dissipare, in qualche modo, l'energia sonora incidente e a far sì che questa non venga completamente riflessa. Per ogni materiale si può definire un coefficiente di assorbimento acustico α dato dal rapporto fra l'energia sonora assorbita (generalmente trasformata in calore) $E_a = W_a \cdot t$ e l'energia totale incidente $E_i = W_i \cdot t$:

$$\alpha = \frac{E_a}{E_i} = \frac{W_a}{W_i} \quad (1.2.9)$$

dove:

W_a = potenza acustica assorbita [W];

W_i = potenza acustica incidente [W];

t = tempo [s].

Esso è un numero puro variabile fra 0 e 1 ed esattamente è uguale a 0 se l'energia incidente è completamente riflessa e uguale a 1 se è completamente assorbita.

In tab. 1.2.1. sono riportati i coefficienti di assorbimento acustico di alcuni materiali (α_i) e le unità assorbenti ($A_j = S_j \cdot \alpha_j$) di elementi vari aventi superficie S_j , quali arredi, persone, ecc., che possono essere presenti nell'ambiente e che possono assorbire, anche loro, parte dell'energia irradiata dalla sorgente, in funzione della frequenza in bande di ottava nel campo $125 \div 4000$ Hz.

Tab. 1.2.1. Coefficienti di assorbimento acustico di alcuni materiali (α_i) e unità assorbenti di elementi vari ($A_j = S_j \cdot \alpha_j$) in funzione della frequenza

Coefficients di assorbimento acustico di alcuni materiali (α_i)						
Materiale	Coefficients di assorbimento alle frequenze [Hz]					
	125	250	500	1000	2000	4000
Parete in muratura (senza intonaco)	0.02	0.02	0.03	0.03	0.05	0.07
Parete intonacata	0.01	0.01	0.02	0.02	0.03	0.02
Marmo lucidato	0.01	0.01	0.01	0.02	0.02	0.02
Lastra di vetro, aderente a parete	0.03	0.03	0.02	0.02	0.02	0.02
Pavimento in marmette, o in cemento battuto	0.01	0.01	0.02	0.02	0.03	0.03
Parquet di legno, plastificato o lucidato (su solaio rigido)	0.05	0.05	0.05	0.05	0.05	0.05

(segue)