

ROBERTO BARUFFA ANDREA BRUSCHI

Acustica dei componenti edilizi

DATI SPERIMENTALI E CRITERI DI SCELTA NATI DALL'ESPERIENZA
DI LABORATORIO SU VARI ELEMENTI DI EDIFICIO

R. Baruffa - A. Bruschi

ACUSTICA DEI COMPONENTI EDILIZI

ISBN 978-88-579-0005-6

© 2010 by Dario Flaccovio Editore s.r.l. – tel. 0916700686 – fax 091525738

www.darioflaccovio.it info@darioflaccovio.it

Prima edizione: febbraio 2010

Baruffa, Roberto <1968->

Acustica dei componenti edilizi : dati sperimentali e criteri di scelta nati dall'esperienza di laboratorio su vari elementi di edificio / Roberto Baruffa Andrea Bruschi - Palermo : D. Flaccovio, 2010.

ISBN 978-88-579-0005-6.

I. Acustica. I. Bruschi, Andrea <1960->.

620.2 CDD-21

SBN Pal0222154

CIP - Biblioteca centrale della Regione siciliana "Alberto Bombace"

Stampa: Tipografia Priulla, febbraio 2010

Nomi e marchi citati sono generalmente depositati o registrati dalle rispettive case produttrici.

L'editore dichiara la propria disponibilità ad adempiere agli obblighi di legge nei confronti degli aventi diritto sulle opere riprodotte.

Le fotocopie per uso personale del lettore possono essere effettuate nei limiti del 15% di ciascun volume/fascicolo di periodico dietro pagamento alla SIAE del compenso previsto dall'art. 68, commi 4 e 5, della legge 22 aprile 1941 n. 633. Le riproduzioni effettuate per finalità di carattere professionale, economico o commerciale o comunque per uso diverso da quello personale possono essere effettuate solo a seguito di specifica autorizzazione rilasciata dagli aventi diritto/dall'editore.



SERVIZI GRATUITI ON LINE

Questo libro dispone dei seguenti servizi gratuiti disponibili on line:

- filodiretto con gli autori
- le risposte degli autori a quesiti precedenti
- files di aggiornamento al testo
- possibilità di inserire il proprio commento al libro.

L'indirizzo per accedere ai servizi è: www.darioflaccovio.it/scheda/?codice=DF0005

INDICE

<i>Prefazione</i>	pag. IX
1. PRINCIPI BASE DI ACUSTICA	
1.1. Onde sonore..... »	1
1.2. Onde stazionarie	5
1.3. Grandezze acustiche	8
1.4. Operazioni con i logaritmi	15
1.5. Analisi in frequenza	16
1.6. Sensazione uditiva..... »	18
1.7. Propagazione del suono in ambiente esterno	24
1.8. Propagazione del suono in ambiente interno	27
2. IL POTERE FONOISOLANTE	
2.1. Premessa	29
2.2. Potere fonoisolante	30
2.3. Stima del potere fonoisolante di elementi monolitici	35
2.4. Pareti doppie	45
2.5. Diffrazione delle onde sonore attraverso aperture	47
3. IL TEMPO DI RIVERBERO	
3.1. Premessa	49
3.2. Normativa	50
3.3. Qualità acustica ambientale..... »	52
3.4. Tempo di riverbero ottimale	53
3.5. Intelligibilità	59
3.6. Esempio di analisi	60
3.7. Tempo di riverbero nelle misure di acustica edilizia	63
4. L'ASSORBIMENTO ACUSTICO	
4.1. Assorbimento acustico	67
4.2. Misura dell'assorbimento acustico	73

5. LA RESISTENZA AL FLUSSO

5.1. Premessa	»	87
5.2. Applicazioni	»	88
5.3. Misura della resistenza al flusso	»	89

6. LA POTENZA SONORA

6.1. Determinazione dei livelli di potenza sonora	»	93
6.2. Determinazione del livello di potenza sonora in camera riverberante	»	96
6.3. Determinazione del livello di potenza sonora in camera anecoica.....	»	98
6.4. Determinazione del livello di potenza sonora su piano riflettente	»	100
6.5. Determinazione del livello di potenza sonora con metodi ingegneristici »		103

7. LA RUMOROSITÀ DEGLI IMPIANTI

7.1. Impianti tecnici e d.p.c.m. 05/12/1997	»	105
7.2. Analisi previsionale.....	»	106
7.3. Trasmissione delle vibrazioni	»	107
7.3.1. Un'esperienza sperimentale	»	108
7.4. Misura	»	110
7.4.1. Esempio di normalizzazione	»	112
7.5. Norma UNI EN ISO 16032	»	113
7.6. Norma UNI EN ISO 10052	»	116
7.7. Allegato B delle norme	»	117
7.8. Impianti idraulici.....	»	118
7.8.1. Il problema dello scarico unico	»	120
7.8.2. Traccia	»	121
7.8.3. Un'esperienza di misura.....	»	121
7.9. Impianti di ventilazione meccanica.....	»	123
7.10. Impianti di riscaldamento	»	124
7.11. Impianti di condizionamento.....	»	125
7.12. Ascensori	»	127
7.13. Impianti di raccolta dei rifiuti centralizzati.....	»	127
7.14. Porte o tapparelle motorizzate.....	»	128
7.15. Impianti di aspirazione centralizzati	»	128

8. IL RUMORE DI CALPESTIO E LA RIGIDITÀ DINAMICA

8.1. Premessa	» 131
8.2. Normativa e misure	» 133
8.3. Attenuazione della rumorosità di calpestio per i rivestimenti	» 136
8.4. Rigidità dinamica	» 140
8.5. Esperienza di misura su un pavimento galleggiante	» 143
8.6. Esperienza di misura su una parete galleggiante	» 146
8.7. Smorzamento	» 149
8.8. Misura della rigidità dinamica apparente	» 150
8.9. Rigidità dinamica apparente ed effettiva	» 152
8.10. Valutazione analitica di s'_a	» 154
8.11. Valutazione della rigidità dinamica per materiali a più strati	» 154
8.12. Esempio di calcolo per materiali a più strati	» 156
8.13. Valutazione della rigidità dinamica nel tempo	» 156
8.14. Norme di prodotto europee	» 158
8.15. Esempi di misure riguardanti la comprimibilità	» 159
8.16. Materiali in commercio	» 161

9. LA PROGETTAZIONE DELLE FACCIATE

9.1. Premessa	» 165
9.2. Quadro normativo	» 167
9.3. Criteri progettuali	» 173
9.4. Potere fonoisolante di pareti opache per esterno	» 181
9.5. Criteri di scelta di vetrate isolanti	» 187
9.6. Marcatura CE di serramenti	» 193
9.7. Verifica in opera delle prestazioni di un serramento	» 197
9.8. Criteri di scelta di finestre in legno	» 200
9.9. Criteri di scelta di finestre in legno-alluminio	» 214
9.10. Criteri di scelta delle finestre in alluminio	» 220
9.11. Criteri di scelta delle finestre in PVC	» 226
9.12. Cassonetti	» 227
9.13. Criteri di scelta delle porte blindate	» 236
9.14. Aerazioni silenziate	» 246

10. LE PARTIZIONI INTERNE

10.1. Trasmissione del suono tra due locali adiacenti e stima dell'isolamento acustico del divisorio	» 253
10.2. Dati di R_w	» 254
10.3. Determinazione analitica del termine $\Delta R_{w,ij}$	» 259
10.4. Calcolo di K_{ij}	» 260
10.5. Determinazione sperimentale del potere fono isolante apparente R'	» 261

11. L'INCERTEZZA NELLE MISURE DI ACUSTICA EDILIZIA

11.1. Premessa	» 265
11.2. Dati di letteratura	» 268
11.3. Incertezza associata alla misura dei tempi di riverbero	» 271
11.4. Procedure per l'analisi dell'incertezza nelle prove in opera in condizioni di ripetibilità	» 271
11.5. Incertezza estesa e numero di gradi libertà.....	» 272
11.6. Isolamento acustico tra ambienti interni secondo la norma UNI EN ISO 140-4.....	» 273
11.7. Isolamento acustico di facciata secondo la norma UNI EN ISO 140-5	» 274
11.8. Isolamento dal rumore di calpestio secondo la norma UNI EN ISO 140-7 »	274
11.9. Impianti tecnologici a funzionamento discontinuo secondo	» 275
la norma UNI EN ISO 16032	» 275
11.10. Esempio numerico relativo a una misura dell'isolamento acustico di una partizione interna	» 276

12. LA NUOVA NORMA SULLA CLASSIFICAZIONE ACUSTICA DEGLI EDIFICI

12.1. Premessa	» 281
12.2. Legislazione europea sull'argomento	» 284
12.3. Aspetti generali della futura norma sulla classificazione acustica degli edifici	» 286

Prefazione

Il testo nasce dall'esperienza vissuta in questi ultimi anni dagli autori all'interno del laboratorio di acustica e vibrazioni dell'Istituto Giordano S.p.A., anni di grande fermento nel settore edilizio e di frenetica attività per il laboratorio, all'interno del quale è stata prodotta una enorme quantità di dati sperimentali su svariate tipologie di materiali provenienti dal settore delle costruzioni civili.

La sistemazione analitica e completa di questo grande archivio risulta impresa ardua e potenzialmente dispersiva; si è pensato perciò di redigere un testo che ne tragga una breve ma organica sintesi, indirizzato a chi desidera conoscere i dati prestazionali dei materiali e i loro criteri di scelta, ricavati direttamente dalle misure sperimentali effettuate.

La struttura del testo è organizzata con lo stesso schema dei corsi di acustica edilizia organizzati dall'Istituto Giordano per gli operatori di settore: una breve sintesi introduttiva sui concetti generali e una successiva focalizzazione sui dati sperimentali, utilizzando in modo particolare la comunicazione visiva attraverso numerose immagini e fotografie illustrative.

Particolare attenzione è riposta nelle tipologie costruttive spesso sottovalutate dalla letteratura tecnica: serramenti monoblocco a due o più ante, cassonetti, porte in legno, porte blindate per esterno, soglie parafreddo, materiali resilienti multistrato per sottopavimentazioni, ecc.

Per i componenti delle facciate esterne degli edifici è stata effettuata l'analisi dei punti di convergenza e le criticità tra isolamento acustico e termico.

Un ringraziamento particolare ai nostri valenti colleghi Omar Nanni e Luca Mordenti, ad Antonietta Serra per il supporto fornito in merito alle prestazioni termoisolanti dei serramenti, al caro e compianto Vito Lorenzo Giordano, fondatore dell'omonima azienda, e all'attuale direzione che ci ha supportato durante tutta la stesura dell'opera.

1. PRINCIPI BASE DI ACUSTICA

1.1. ONDE SONORE

Un corpo vibrante a contatto con un mezzo elastico, solido, liquido o aeriforme si trova inizialmente in quiete; le particelle del mezzo, non soggette ad altre sollecitazioni esterne, permangono in una condizione di equilibrio caratterizzata da una pressione statica P_0 . Quando il corpo inizia a vibrare, le particelle a contatto con esso cominciano ad oscillare mettendo poi in movimento quelle adiacenti generando una perturbazione che si propaga nel mezzo con velocità c . La forzante impressa dal corpo vibrante è contrastata dalle forze elastiche del mezzo, risultante delle forze intermolecolari, che spingono le particelle a ritornare nella posizione di equilibrio iniziale ma, a causa della forza di inerzia, tale posizione viene oltrepassata. A questo punto le forze elastiche agiscono nella direzione opposta facendo oscillare le particelle attorno alla loro posizione di equilibrio con ampiezza però sempre minore, a causa dell'effetto delle forze dissipative di attrito viscoso, fino a quando non viene di nuovo raggiunta la posizione di equilibrio.

La modalità di propagazione della perturbazione è fondamentalmente legata alle

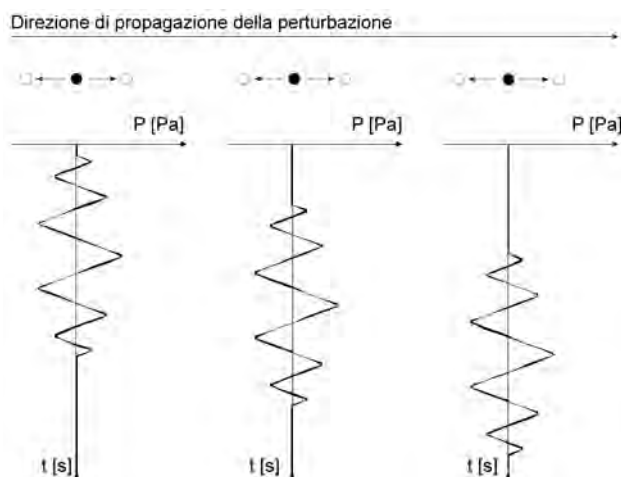


Figura 1.1
Propagazione di una perturbazione
in un fluido

caratteristiche di resistenza elastica del mezzo. Nei fluidi, aventi unicamente resistenza elastica a deformazioni di compressione, la propagazione della perturbazione avviene nella direzione di oscillazione delle particelle con onde longitudinali: aree del mezzo con pressione maggiore quella di equilibrio (zone di compressione) si alternano a quelle a pressione minore (zone di rarefazione); in figura 1.1 è riportato un esempio di propagazione di una perturbazione. Nei solidi, aventi inoltre anche resistenza elastica a deformazioni tangenziali, la propagazione avviene anche attraverso onde trasversali, ortogonali alla direzione di oscillazione delle particelle.

Quando la perturbazione è percepita dall'apparato auditivo umano, generando una sensazione uditiva, si parla di *onde sonore*.

Nei fluidi ideali (omogenei, isotropi e perfettamente elastici) il campo sonoro $P(x, y, x, t)$ può essere definito analiticamente ricorrendo alle equazioni di equilibrio dinamico, conservazione della massa e di stato dalle quali, nel caso si tratti di un gas perfetto, si ottiene l'equazione dell'onda avente la seguente forma:

$$\nabla^2 P = \frac{1}{c^2} \frac{\partial^2 P}{\partial t^2} \quad (1.1)$$

in cui c , la velocità di propagazione del suono, è pari a:

$$c = \sqrt{\gamma \frac{P_0}{\rho_0}} \quad (1.2)$$

dove

γ = rapporto tra il calore specifico a pressione costante e quello a volume costante;

P_0 = pressione del gas nelle condizioni di equilibrio statico;

ρ_0 = densità del gas nelle condizioni di equilibrio statico.

Dalla formula (1.2) si evidenzia come la velocità del suono sia indipendente dalla pressione statica P_0 in quanto nei gas perfetti il rapporto P/ρ è funzione unicamente dalla temperatura T . Nonostante l'aria non possa essere considerata come un gas perfetto, l'equazione (1.2) fornisce un valore molto vicino a quello effettivo e la dipendenza della velocità del suono nell'aria c dalla temperatura T è espressa dalla relazione:

$$c = 331,6 + 0,6 \cdot T \quad (1.3)$$

In generale, nei fluidi, la velocità del suono c è fornita dalla relazione:

$$c = \sqrt{\frac{K_s}{\rho_0}} \quad (1.4)$$

in cui K_s è il modulo di elasticità adiabatico del fluido. Come accennato in precedenza, nei solidi la propagazione del suono avviene in due direzioni ortogonali tra loro

e quindi si definiscono, attraverso le relazioni (1.5) e (1.6) rispettivamente, la velocità longitudinale c_L :

$$c_L = \sqrt{\frac{D}{\rho}} \quad (1.5)$$

e quella trasversale c_T :

$$c_T = \sqrt{\frac{G}{\rho}} \quad (1.6)$$

in cui D è la rigidità longitudinale e G quella trasversale (entrambe sono funzione del modulo di Young E e di Poisson ν); c_L è sempre maggiore di c_T .

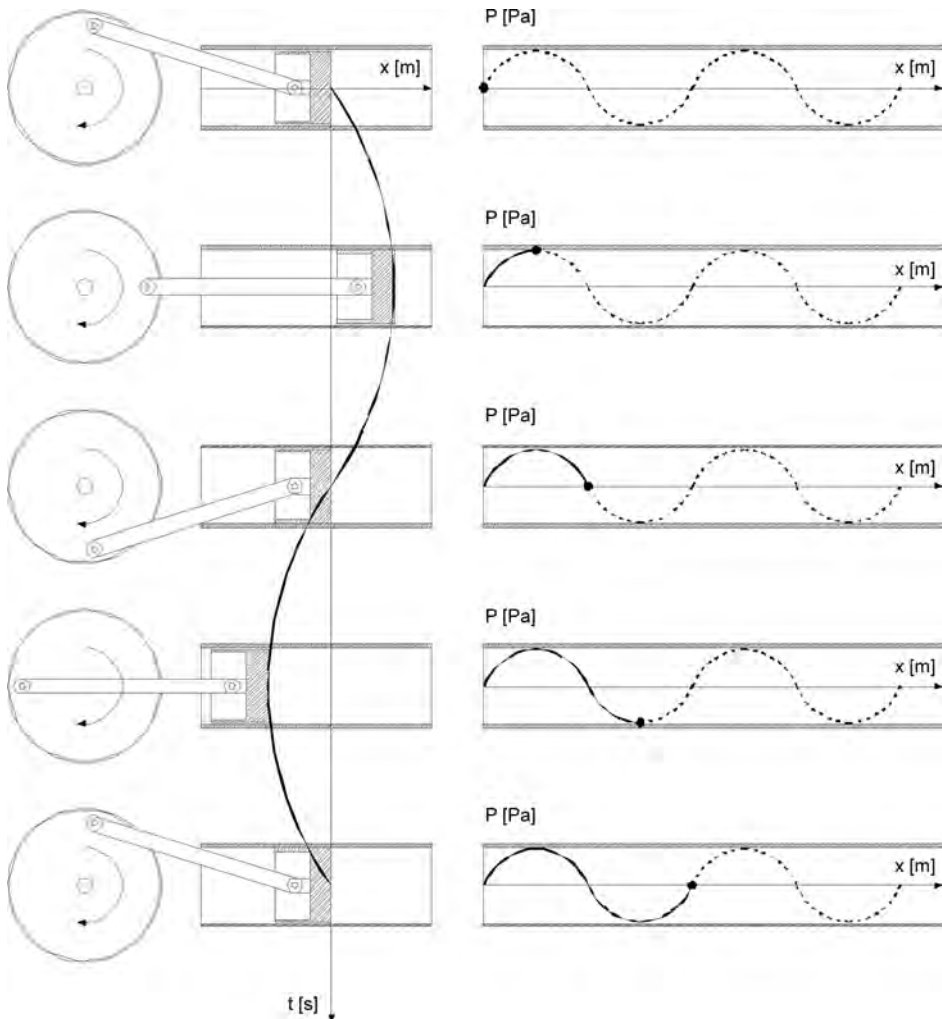


Figura 1.2. Sistema di generazione di un'onda piana all'interno di un sistema cilindro-pistone

Come mostrato in figura 1.2, per introdurre le grandezze che descrivono un'onda sonora, usualmente si ricorre alla similitudine di un disco che ruota attorno a un perno baricentrico al quale è collegata radialmente la biella di un pistone che trasla all'interno di un lungo cilindro. Se il disco ruota con velocità angolare ω costante, il pistone trasla in direzione assiale secondo una legge sinusoidale, generando nel mezzo contenuto nel cilindro un'onda sonora sinusoidale:

$$P(t) = \bar{P} \cdot \sin(\omega t + \varphi) \quad (1.7)$$

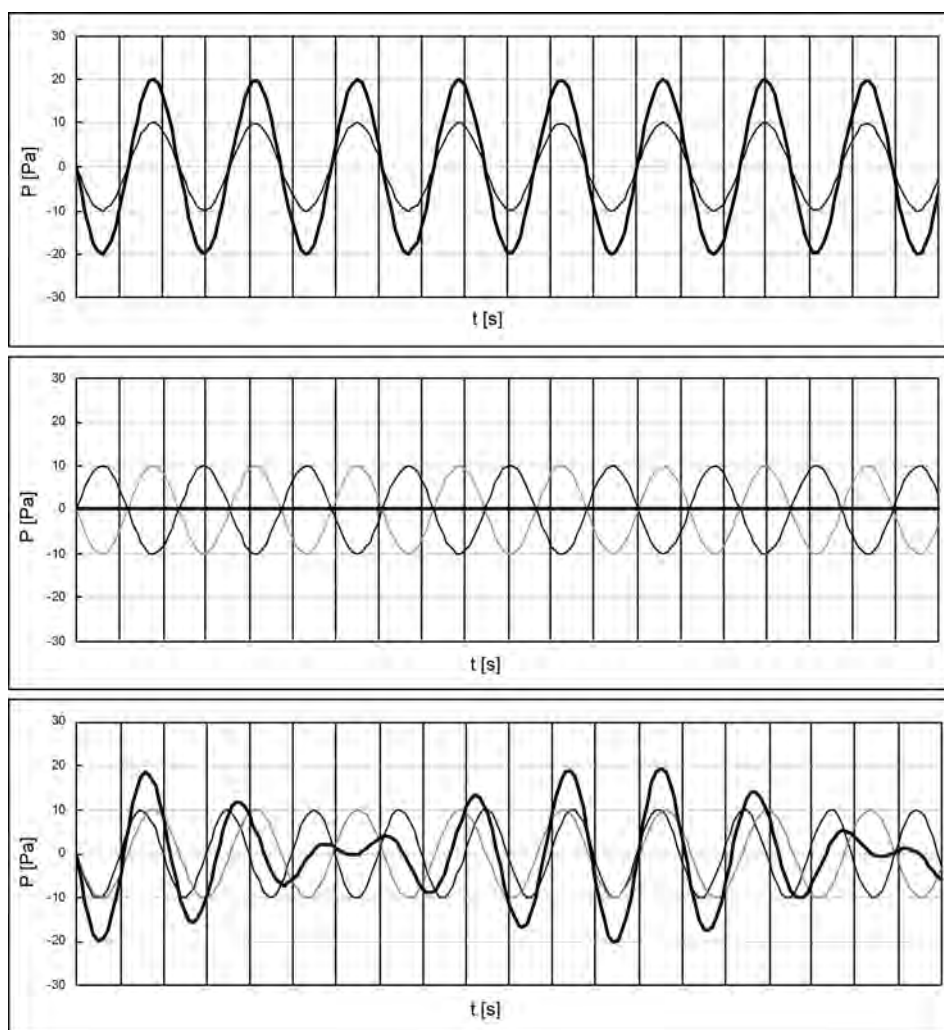


Figura 1.3. Due onde sinusoidali con uguale ampiezza e diversa fase; in alto in fase, al centro in opposizione di fase; in basso, a causa di una modesta differenza di frequenza tra le due onde, l'instaurarsi del fenomeno dei battimenti

in cui $\bar{P}$ è l'ampiezza dell'oscillazione dell'onda, t rappresenta il tempo e φ lo sfasamento.

Il periodo dell'onda T , definito come il tempo necessario affinché il disco connesso al cilindro compia una rotazione completa, pari a 2π , con velocità angolare ω , è fornito dalla relazione:

$$T = \frac{2\pi}{\omega} = \frac{1}{f} \quad (1.8)$$

dove f rappresenta la frequenza, cioè il numero di giri che il disco compie nell'unità di tempo e che si misura in Hertz. La lunghezza d'onda λ , definita come la distanza che separa due punti che ad un certo istante t si trovano alla stessa pressione, è quindi uguale a:

$$\lambda = \frac{c}{f} = cT = c \frac{2\pi}{\omega} \quad (1.9)$$

Qualora le oscillazioni abbiano modesta ampiezza vale il principio di sovrapposizione lineare degli effetti. Nel caso di due onde sinusoidali piane di ampiezza P_1 e P_2 e frequenza f_1 e f_2 , gli effetti dovuti alla loro combinazione dipendono dalle ampiezze, dalle frequenze e dallo sfasamento. Come mostrato in figura 1.3, se le due onde sonore hanno stessa ampiezza e frequenza, la risultante può essere un'onda sonora con ampiezza doppia, nel caso di sfasamento nullo, o nulla nel caso di sfasamento pari a π . La combinazione tra due segnali sinusoidali aventi caratteristiche uguali tra loro ad eccezione di una modesta differenza di velocità angolare, e quindi di frequenza, origina un'alternanza temporale di silenzio e amplificazione, il cosiddetto fenomeno dei battimenti.

1.2. ONDE STAZIONARIE

Un fenomeno che riveste rilevante importanza nell'acustica architettonica ed edilizia è rappresentato dalla formazione di onde stazionarie in ambienti interni delimitati da pareti riflettenti. Al fine di introdurre il fenomeno fisico, si considerino due onde sinusoidali aventi stessa ampiezza massima $\bar{y}$ e frequenza che si propagano lungo la direzione medesima ma con verso opposto, le funzioni d'onda sono quindi:

$$y_1 = \bar{y} \cdot \sin(kx - \omega t) = \bar{y} \cdot \sin\left[\omega \cdot \left(\frac{x}{c} - t\right)\right] \quad (1.10)$$

$$y_2 = \bar{y} \cdot \sin(kx + \omega t) = \bar{y} \cdot \sin\left[\omega \cdot \left(\frac{x}{c} + t\right)\right] \quad (1.11)$$

in cui k è il rapporto tra la pulsazione ω e la velocità di propagazione dell'onda c .

L'onda risultante ha la seguente funzione:

$$y = y_1 + y_2 = 2\bar{y} \cdot \sin(kx) \cos(\omega t) = 2\bar{y} \cdot \sin\left(\omega \frac{x}{c}\right) \cos(\omega t) \quad (1.12)$$

dalla quale si evince che in ogni punto x l'oscillazione segue nel tempo una legge sinusoidale con frequenza $f = \omega/2\pi$, mentre l'ampiezza dell'oscillazione è pari a:

$$2\bar{y} \cdot \sin\left(\omega \frac{x}{c}\right) \quad (1.13)$$

L'ampiezza di oscillazione è nulla quindi per tutti quei valori di x tali che l'argomento del seno sia pari a:

$$\omega \frac{x}{c} = n \cdot \pi \quad \text{con } n = 0, 1, 2 \dots \quad (1.14)$$

e perciò, in base alla definizione di lunghezza d'onda λ riportata nella formula (1.9), per x uguale a:

$$x = n \cdot \frac{\lambda}{2} \quad (1.15)$$

mentre i valori di massima ampiezza di oscillazione si hanno quando:

$$\omega \frac{x}{c} = \frac{\pi}{2} + n \cdot \pi \quad \text{con } n = 0, 1, 2 \dots \quad (1.16)$$

cioè per x pari a:

$$x = \frac{\lambda}{2} \cdot \left(n + \frac{1}{2}\right) \quad (1.17)$$

La posizione dei punti con ampiezza di oscillazione nulla, i nodi, e quelli con ampiezza massima, gli antinodi, non varia nel tempo e quindi l'onda viene detta *stazionaria*.

Nel caso della corda di uno strumento che ha lunghezza finita, i nodi si formeranno in corrispondenza degli estremi della corda ($x = 0$ e $x = L$) e quindi in base alla formula (1.15) si possono generare onde che soddisfano la seguente relazione:

$$L = n \cdot \frac{\lambda}{2} \quad (1.18)$$

che sono caratterizzate dall'avere una lunghezza d'onda λ e una frequenza f fornite rispettivamente dalle relazioni:

$$\lambda = \frac{2L}{n} \quad \text{e} \quad f = \frac{n \cdot c}{2L} \quad (1.19)$$

Per $n = 1$ si ha la cosiddetta frequenza fondamentale, mentre per $n > 1$ si generano

le armoniche multiple della fondamentale alcune delle quali, negli strumenti a corda, sono amplificate per risonanza dalla cassa armonica. In figura 1.4 è mostrata l'onda fondamentale e le armoniche di ordine superiore.

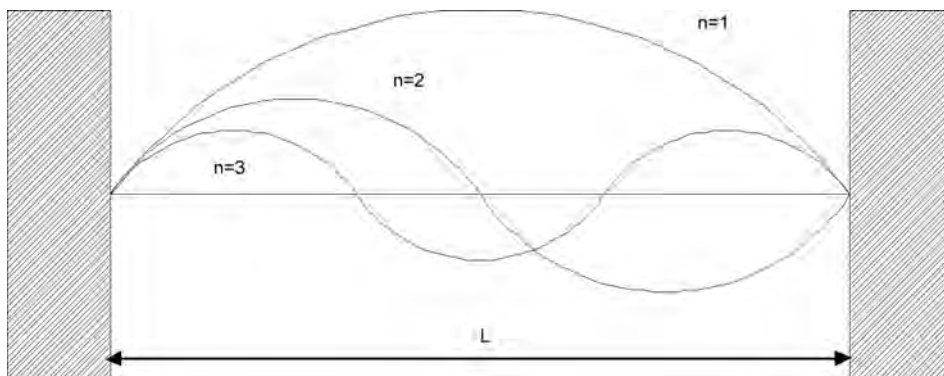


Figura 1.4. Onda fondamentale e armoniche di ordine superiore

All'interno di una stanza rettangolare, delimitata da pareti con un omogeneo ed elevato coefficiente di riflessione, si generano onde stazionarie tra le pareti simili a quelle descritte precedentemente per la corda. Una sorgente sonora, posta in un angolo della stanza, irradia in tutte le direzioni originando un campo sonoro caratterizzato da riflessioni multiple da parte delle pareti che equivalgono agli "estremi della corda". Con riferimento alla figura 1.5, tra le pareti ortogonali all'asse x , poste a distanza L_x , si generano due onde, una incidente e l'altra riflessa, aventi stessa frequenza e ampiezza di oscillazione. In realtà l'onda che incide sulla seconda parete è originata dalla riflessione dell'onda sonora emessa dalla sorgente sulla prima parete e quindi, avendo subito una riflessione in meno, ha ampiezza maggiore rispetto a quella riflessa dalla superficie opposta; a causa però dell'elevato coefficiente di riflessione delle pareti, i due valori sono prossimi tra loro e le onde propagandosi nella stessa direzione, ma con verso opposto, si combinano generando un'onda sta-

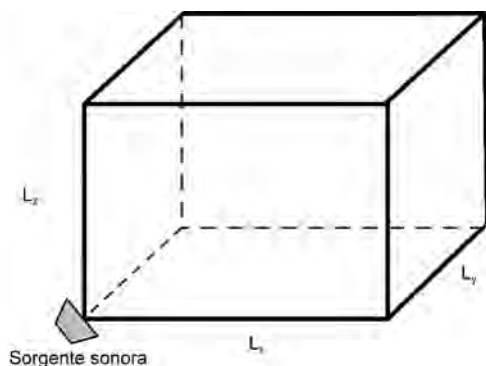


Figura 1.5
Generazione del campo sonoro in un ambiente chiuso con forma di parallelepipedo

zionaria, in cui non variano nel tempo la posizione dei punti di massima e minima pressione sonora, e dei punti in cui la pressione è pari a quella di equilibrio statico. In base alla (1.19), la frequenza minima alla quale si genera questo fenomeno è fornita dalla relazione:

$$f = \frac{c}{2l_x} \quad (1.20)$$

Come evidenziato nel caso della corda, si sviluppano anche tutte le onde stazionarie con frequenza pari a un multiplo intero della fondamentale. Considerando anche gli altri due modi assiali, quelli tangenziali (le onde hanno componenti secondo due assi) e obliqui (componenti secondo tutti e tre gli assi), in generale, i modi di vibrazione di una stanza sono forniti dalla relazione:

$$f_n = \frac{c}{2} \sqrt{\left(\frac{n_x}{l_x}\right)^2 + \left(\frac{n_y}{l_y}\right)^2 + \left(\frac{n_z}{l_z}\right)^2} \quad (1.21)$$

in cui n_x , n_y , e n_z sono numeri interi superiori a 1.

1.3. GRANDEZZE ACUSTICHE

La propagazione delle onde sonore nell'aria è una variazione di pressione rispetto al valore di equilibrio statico in atmosfera P_a tale da generare una sensazione uditiva: la pressione sonora $p(t)$ nell'istante t può essere quindi definita come:

$$p(t) = P(t) - P_a \quad (1.22)$$

in cui $P(t)$ è il valore della pressione nell'aria. La pressione sonora $p(t)$ oscilla attorno allo zero assumendo valori positivi quando $P(t)$ è maggiore di P_a e negativi quando è minore. Per evitare di utilizzare l'ampiezza e la fase o addirittura la notazione complessa (parte immaginaria e parte reale) è stato introdotto il concetto di pressione acustica efficace p_{eff} il cui valore è fornito dalla relazione:

$$p_{eff} = \sqrt{\frac{1}{\tau} \int p(t)^2 dt} \quad (1.23)$$

in cui τ rappresenta il tempo in cui si è scelto di effettuare la media. La pressione acustica efficace p_{eff} assume solo valori positivi, è misurabile e quantifica la sensazione uditiva, ma assume una tale ampiezza di valori, compresi in genere tra 20 μPa e 200 Pa, da essere difficilmente utilizzabile. Per questa ragione, si è scelta la notazione logaritmica decimale introducendo il livello di pressione sonora L , misurato in dB, fornito dalla relazione:

$$L_p = 10 \cdot \text{Log} \left(\frac{p_{eff}^2}{p_0^2} \right) \quad (1.24)$$

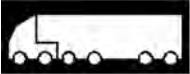
	$[10^{-6} \text{ Pa}]$	$[dB]$
	2000000000	140
	635000000	130
	200000000	120
	63500000	110
	20000000	100
	6350000	90
	2000000	80
	635000	70
	200000	60
	63500	50
	20000	40
	6350	30
	2000	20
	635	10
	200	0

Figura 1.6. Corrispondenza tra pressione sonora efficace p_{eff} e livello di pressione sonora L

in cui p_0 è la pressione acustica efficace di riferimento, pari a $20 \mu\text{Pa}$, la minima pressione efficace che a 1000 Hz è in grado di generare una sensazione uditiva. Come riportato in figura 1.6 il livello di pressione sonora ora varia tra 0 e 140 dB originando però le problematiche legate alle operazioni coi logaritmi che saranno discusse nel paragrafo successivo.

In assenza di fenomeni dissipativi, l'energia sonora irradiata da una sorgente nell'unità di tempo si propaga nell'aria mantenendosi costante, ma distribuendosi su fronti d'onda la cui forma dipende dalle caratteristiche di direzionalità della sorgente e di confinamento del mezzo (ad esempio un semispazio su piano riflettente), mentre l'estensione aumenta al crescere della distanza dalla sorgente. Come mostrato in figura 1.7, nel caso di una sorgente sonora sferica immersa nell'aria che emette costantemente nel tempo e uniformemente in tutte le direzioni, l'energia trasferita nell'unità di tempo al mezzo, cioè la potenza sonora, non varia nel tempo, ma allontanandosi dalla sorgente si ripartisce nello spazio su fronti d'onda sferici, centrati sulla sorgente, la cui area aumenta col quadrato della distanza.

L'energia sonora irradiata può essere descritta attraverso le seguenti grandezze:

- potenza sonora, l'energia sonora emessa dalla sorgente nell'unità di tempo, espressa in Watt;
- intensità sonora, l'energia sonora che nell'unità di tempo attraversa in direzione normale una superficie unitaria, espressa in Watt/m^2 ;
- densità sonora, l'energia sonora che nell'unità di tempo è contenuta nell'unità di volume del mezzo, espressa in Watt/m^3 .

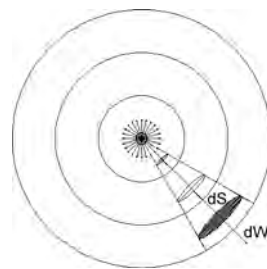


Figura 1.7
Sorgente sonora sferica

In base alla sua definizione, l'intensità sonora I può essere espressa tramite la relazione:

$$I = \frac{dW}{dS} \quad (1.25)$$

in cui dW rappresenta la potenza sonora che attraversa la superficie dS disposta ortogonalmente alla direzione di propagazione dell'onda. Individuata una superficie con area S che circonda la sorgente sulla quale rilevare l'intensità sonora I , la potenza

sonora W è fornita dalla relazione:

$$W = \int_S I(x,y,z) \cdot dS \quad (1.26)$$

Nel caso di sorgente sferica, il valore di I dipende unicamente dalla distanza r dal centro della sorgente alla quale è effettuata la sua rilevazione e la potenza sonora W può essere determinata tramite la relazione:

$$W = 4\pi r^2 \cdot I \quad (1.27)$$

Nella propagazione di una perturbazione, uno strato di particelle agisce su quello adiacente con una forza F il cui valore è fornito dal prodotto tra la pressione p e l'area sulla quale è applicata. Sotto l'azione della forzante, nell'intervallo di tempo dt , le particelle subiscono uno spostamento nella direzione di propagazione della perturbazione pari a dx e cui corrisponde la velocità $u = dx/dt$. Il lavoro compiuto è pari a $dL = F dx = p dS dx$, la potenza a $dW = p dS u$ e l'intensità sonora I , cioè la potenza che fluisce in direzione ortogonale alla superficie dS , è espresso dalla relazione:

$$I(t) = \frac{dW(t)}{dS} = p(t) \cdot u(t) \quad (1.28)$$

Pressione sonora p e velocità di spostamento delle particelle del mezzo u sono correlate tra loro tramite l'impedenza acustica Z il cui valore è fornito dalla relazione:

$$Z = \rho_0 \cdot c = \frac{p}{u} \quad (1.29)$$

in cui ρ_0 è la densità dell'aria in condizioni standard e c è la velocità di propagazione del suono nell'aria. Sostituendo la formula (1.29) nella (1.28) si ottiene che nel generico istante t l'intensità sonora I è pari a:

$$I(t) = \frac{p(t)^2}{\rho_0 \cdot c} \quad (1.30)$$

e mediando nell'intervallo di tempo τ :

$$\bar{I} = \frac{1}{\rho_0 \cdot c} \left(\frac{1}{\tau} \int p(t)^2 \cdot dt \right) = \frac{p_{\text{eff}}^2}{\rho_0 \cdot c} \quad (1.31)$$

L'energia sonora è trasportata dall'onda con velocità c , e quindi, come riportato in figura 1.8, nell'unità di tempo il fronte d'onda raggiunge la coordinata $x + c$, definendo così nel mezzo un volume $V = S \cdot c$. La densità di energia sonora D è quindi nel generico istante t uguale a:

$$D(t) = \frac{W(t)}{S \cdot c} = \frac{I(t)}{c} \quad (1.32)$$

e, mediando nell'intervallo di tempo τ , pari a:

$$\bar{D} = \frac{\bar{I}}{c} = \frac{p_{\text{eff}}^2}{\rho_0 \cdot c^2} \quad (1.33)$$

In un ambiente interno, l'intensità sonora incidente I , in un punto qualsiasi di una delle superfici che lo delimitano, è la somma di tutti i contributi I_θ , provenienti, entro un angolo solido elementare $d\Omega$, da una qualunque direzione del semispazio, secondo la relazione:

$$I = \int_0^{2\pi} I_\theta \cdot d\Omega \quad (1.34)$$

Nell'ipotesi di perfetta diffusione del campo sonoro, alle onde sonore incidenti è associata una intensità costante I_n , come mostrato in figura 1.9, che si può scomporre in una componente tangenziale alla parete e in una normale, il valore di I_θ è pari quindi a:

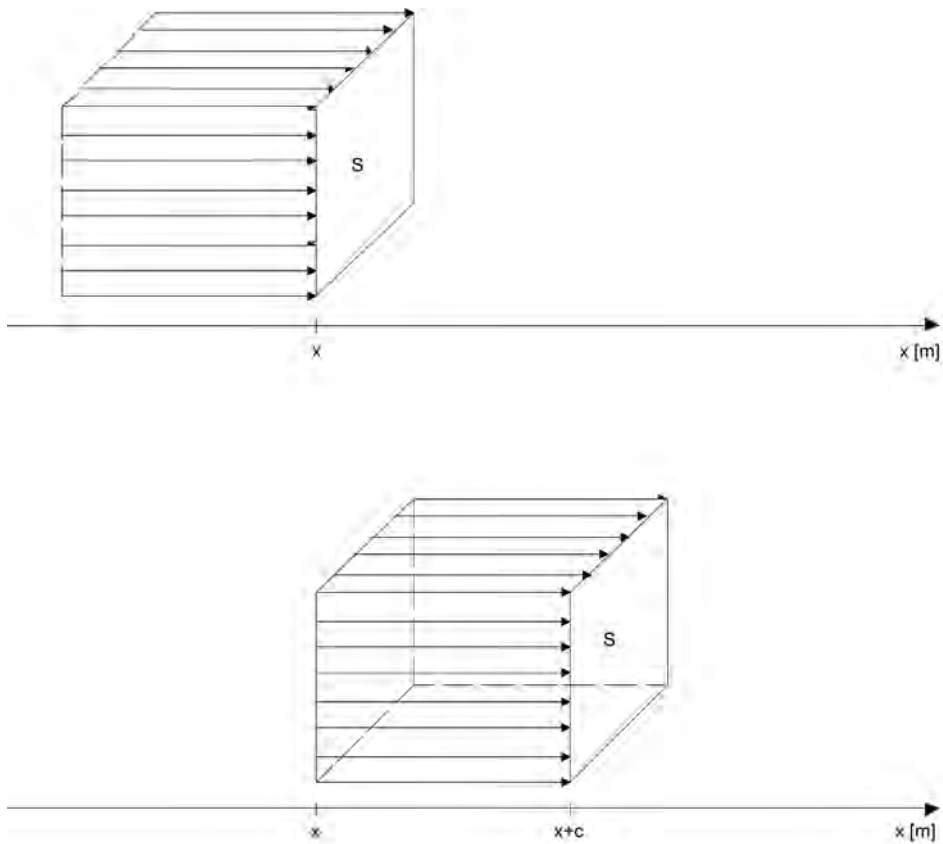


Figura 1.8. Trasporto dell'energia sonora da parte dell'onda

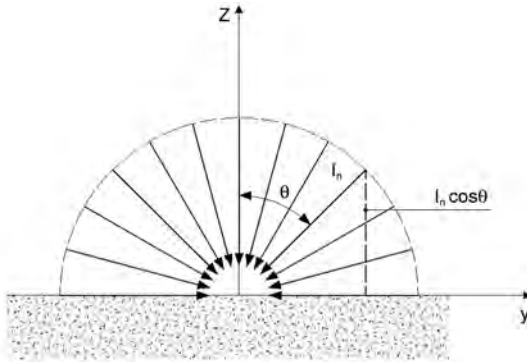


Figura 1.9
Andamento della potenza sonora incidente
in un punto nelle ipotesi di perfetta diffusione

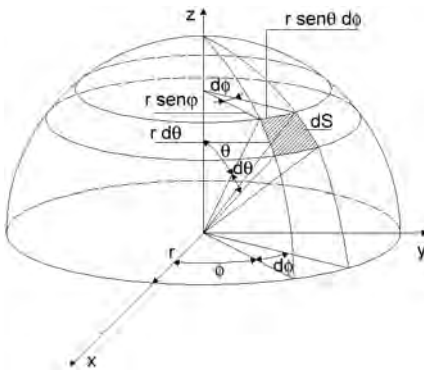


Figura 1.10
Criterio di valutazione della potenza sonora
incidente risultante in un punto

$$I_{\theta} = I_n \cdot \cos\theta \quad (1.35)$$

Con riferimento alla figura 1.10, l'angolo solido elementare $d\Omega$ è fornito dalla relazione:

$$d\Omega = \frac{dS}{r^2} = \frac{(r \cdot d\theta)(r \cdot \sin\theta \cdot d\phi)}{r^2} = \sin\theta \cdot d\theta \cdot d\phi \quad (1.36)$$

Sostituendo le formule (1.35) e (1.36) nella (1.34) si ottiene che l'intensità sonora incidente risultante I è pari a:

$$I = \int_{\phi=0}^{2\pi} \int_{\theta=0}^{\pi/2} I_n \cdot \cos\theta \cdot \sin\theta \cdot d\theta \cdot d\phi \quad (1.37)$$

da cui:

$$I = 2\pi \cdot I_n \int_{\theta=0}^{\pi/2} \cos\theta \cdot \sin\theta \cdot d\theta = \pi \cdot I_n \quad (1.38)$$

Mantenendo l'ipotesi di perfetta diffusione del campo sonoro, per determinare la densità di energia sonora globale D , relativa a tutte le direzioni di propagazione delle onde sonore che convergono in un determinato punto dello spazio si può effettuare un'operazione simile a quella mostrata precedentemente per l'intensità sonora I , con la differenza che l'integrazione deve essere effettuata in tutto lo spazio e che D non è una grandezza direzionale. D è quindi fornita dalla relazione:

$$D = \int_0^{4\pi} D_n \cdot d\Omega = \int_{\varphi=0}^{2\pi} \int_{\theta=-\pi/2}^{\pi/2} D_n \cdot \sin\theta \cdot d\theta \cdot d\varphi = 4\pi \cdot D_n \quad (1.39)$$

in cui D_n è il contributo proveniente da una generica direzione.

L'intensità sonora costante in un punto di una superficie I_n è in relazione con la densità di energia sonora D_n tramite la formula (1.32) che, ricorrendo alla (1.38) e alla (1.39), diventa:

$$I = \frac{c}{4} \cdot D \quad (1.40)$$

In base alla (1.33), mediando nel tempo τ , la formula precedente diventa:

$$\bar{I} = \frac{p_{\text{eff}}^2}{4 \cdot \rho_0 \cdot c} \quad (1.41)$$

La notazione logaritmica, introdotta per il livello di pressione sonora L_p , può essere utilizzata anche per le grandezze appena introdotte e quindi si parla di:

livello di potenza sonora L_w :

$$L_w = 10 \cdot \text{Log} \left(\frac{W}{W_0} \right) \quad (1.42)$$

in cui W_0 è la potenza sonora di riferimento pari a 10^{-12} W;

livello di intensità sonora L_I :

$$L_I = 10 \cdot \text{Log} \left(\frac{I}{I_0} \right) \quad (1.43)$$

in cui I_0 è la intensità sonora di riferimento pari a 10^{-12} W/m²;

livello di densità sonora L_D :

$$L_D = 10 \cdot \text{Log} \left(\frac{D}{D_0} \right) \quad (1.44)$$

in cui D_0 è la densità sonora di riferimento pari a 10^{-12} W/m³.

Tutte le grandezze sono espresse in dB; per il livello di potenza sonora si ricorre frequentemente alla notazione dB/1pW.