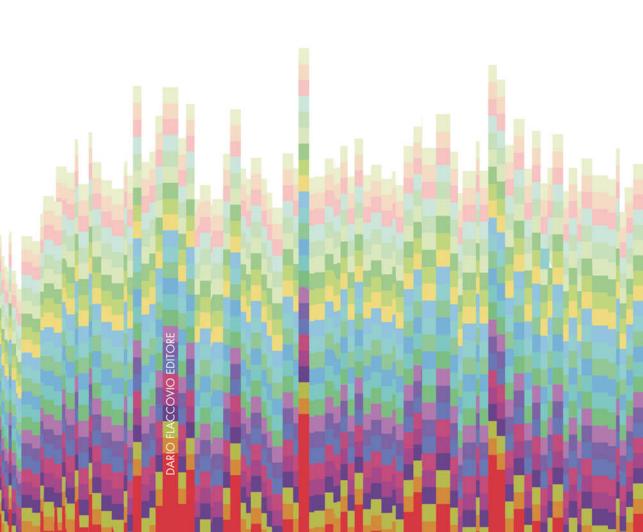
# APPLICAZIONI PRATICHE DI ACUSTICA

IN EDILIZIA, AMBIENTE E LAVORO

Scheda sul sito >



Stefano Bergero Maurizio Bernardoni Paolo Cavalletti Anna Chiari

# APPLICAZIONI PRATICHE DI ACUSTICA

IN EDILIZIA, AMBIENTE E LAVORO



Stefano Bergero — Maurizio Bernardoni — Paolo Cavalletti — Anna Chiari Applicazioni pratiche di acustica In edilizia, ambiente e lavoro

ISBN 978-88-579-0199-2

© 2013 by Dario Flaccovio Editore s.r.l. - tel. 0916700686 www.darioflaccovio.it info@darioflaccovio.it

Prima edizione: settembre 2013

Applicazioni pratiche di acustica in edilizia, ambiente e lavoro / Stefano Bergero ... [et al.]. Palermo : D. Flaccovio, 2013. ISBN 978-88-579-0199-2

1. Acustica. I. Bergero, Stefano <1972->. 620.25 CDD-22 SBN PAL0260948

CIP – Biblioteca centrale della Regione siciliana "Alberto Bombace"

Stampa: Tipografia Priulla, Palermo, settembre 2013

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.

La fotocopiatura dei libri è un reato.

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.

# **INDICE**

INTF	RODUZIONE	13
Parto ACU	e I STICA DI BASE	17
Capit	tolo 1	
ACU	STICA FISICA	19
1.1	Il suono	19
1.2	Grandezze caratteristiche	20
1.3	Suono puro	20
1.4	Velocità del suono	22
1.5	Pressione efficace	23
1.6	Intensità sonora e densità sonora	24
1.7	Campo di udibilità	25
1.8	Sorgente sonora	26
1.9	Livelli sonori	26
1.9	· · · · · · · · · · · · · · · · · · ·	27
	.2 Livello di intensità sonora	28
1.9 1.9	<ul><li>.3 Livello di potenza sonora</li><li>.4 Operazioni sui livelli di pressione sonora</li></ul>	29 30
1.10	Suoni complessi	32
1.11	Rumori	35
1.12	Bande di frequenza	36
1.12	•	37
	2.2 Bande di terzi d'ottava	38
1.13	Rumore bianco e rumore rosa	40
1.14	Esercizi	41

# 6 Applicazioni pratiche di acustica

Capi	tolo 2	
ACU	ISTICA FISIOLOGICA E FONOMETRIA	45
2.1	L'orecchio umano	45
2.2	Audiogramma normale	46
2.3	Curve di ponderazione	49
2.4	Costanti di tempo	52
2.5	Livello continuo equivalente	55
2.6	Livello di esposizione sonora	59
2.7	Analisi statistica dei rumori	61
•	tolo 3	
PRO	PAGAZIONE DEL SUONO ALL'APERTO	65
3.1	Propagazione del suono in campo libero	65
3.1		65 66
3.1		66
3.2	Propagazione del suono per onde sferiche	67
3.3	Propagazione del suono per onde cilindriche	68
3.4	Influenza della direttività	69
3.5	Propagazione del suono in presenza di ostacoli	70
3.5		71
3.5 3.5		72
3.6	Attenuazione in eccesso	73 75
3.7	Barriere acustiche	79
3.8	Esercizi	82
3.6	ESCICIZI	62
Part	e II	
ACU	USTICA NELL'EDILIZIA	109
•	tolo 4	
	PAGAZIONE DEL SUONO IN AMBIENTI CONFINATI	111
4.1	Acustica architettonica	111
4.2	Coefficienti di riflessione, assorbimento e trasmissione	112

		Indice 7	
4.3	Coefficiente di assorbimento apparente	112	
4.4	Acustica in campo riverberato	114	
4.5	Densità sonora di regime	115	
4.6	Livello di pressione sonora in un ambiente confinato	117	
4.7	Tempo di riverberazione	119	
4.8	Misura del tempo di riverberazione	121	
4.9	Limiti dell'acustica statistica	122	
4.10	Eco	123	
4.11	Risonanza per onde stazionarie	125	
4.12	Esercizi	129	
Capito	olo 5 DASSORBIMENTO E CORREZIONE ACUSTICA	143	
5.1	Tempo ottimale di riverberazione	143	
5.2	Riduzione dei rumori aerei in un ambiente confinato	146	
5.3 5.3.	Sistemi fonoassorbenti 1 Materiali porosi	147 147	
5.3.2 5.3.2		149 152	
5.4	Coefficiente di assorbimento ponderato	154	
5.5	Correzione acustica	158	
5.6	Esercizi	159	
Capito	olo 6 AMENTO ACUSTICO	169	
6.1	Modalità di trasmissione del rumore	169	
6.2	Potere fonoisolante	170	
6.3	Legge della massa e potere fonoisolante di pareti semplici	171	
6.4	Potere fonoisolante di pareti doppie	176	
6.5	Misura del potere fonoisolante	178	
6.6	Potere fonoisolante di pareti complesse	180	
6.7	Rumore aereo e rumore d'impatto	182	
6.8	Potere fonoisolante apparente	184	
6.9	Isolamento acustico	185	

8	Appl	icazioni pratiche di acustica	
	6.10	Isolamento acustico di facciata	187
	6.11	Livello di rumore da calpestio	188
	6.12	Attenuazione del rumore da calpestio	190
	6.13	Esercizi	193
	Capito	olo 7	
	VALU	UTAZIONE DELL'ISOLAMENTO ACUSTICO	207
	7.1	Indici di valutazione	207
	7.1.		207
	7.1.	1	209
	7.2	Formule empiriche per la valutazione del potere fonoisolante	211
	7.3	Formule empiriche per la valutazione del livello da calpestio	213
	7.3	Esercizi	213
	Capito	olo 8 SSIFICAZIONE ACUSTICA DELLE UNITÀ IMMOBILIARI	
	SECC	ONDO LA NORMA UNI 11367:2010	231
	8.1	Premessa	231
	8.2	Procedura di classificazione acustica	232
	8.3	Descrittori acustici	232
	8.3.		232
	8.3.	1	233
	8.3. 8.3.	1	234
	0.5.	discontinuo	235
	8	3.4.1 Livello sonoro immesso da impianti a funzionamento continuo	235
	8	3.4.2 Livello sonoro immesso da impianti a funzionamento discontinuo	237
	8.4	Classificazione acustica	238
	8.4.	Destinazioni d'uso a cui si applica la classificazione acustica e relativo criterio di classificazione	239
	8.4.	11	240
	8.4.	1	240
	8.5	Procedura di calcolo nel caso di misurazione di tutti gli elementi	241
	0.5	tecnici pertinenti	241
	8.5. 8.5.	1 C 1	<ul><li>241</li><li>242</li></ul>
	0.0.		

Procedura di calcolo nel caso campionamento degli elementi

Contenuti minimi della relazione tecnica

243

248

8.6

8.7

9

		Iı	ndice
8.8	Ap	pendici	248
8. 8. 8.	.9.1 .9.2 .9.3 .9.4 .9.5	empio di calcolo Isolamento acustico normalizzato di facciata $D_{2m,nT}$ Potere fonoisolante apparente delle partizioni orizzontali e verticali R' Livello di rumore normalizzato da calpestio $L'_{n,w}$ Livello sonoro immesso da impianti a funzionamento continuo $L_{ic}$ Livello sonoro immesso da impianti a funzionamento discontinuo $L_{id}$ Classificazione DPCM 05/12/1997 e confronto con la norma UNI 11367	249 250 250 252 253 253 254 254
	te III		
AC	USTI	CA AMBIENTALE E DEL LAVORO	257
	itolo 9		
MIS	SURE	AMBIENTALI	259
9.1	For	nometri	259
9.	.1.1	Microfono	261
9.	.1.2	Preamplificatore	261
	.1.3	Attenuatore	261
	.1.4	Filtri in bande di ottava e terzi di ottava	261
9.	.1.5	Elaboratore di segnale digitale	261
9.2	Mi	sure acustiche: parametri da considerare	262
9.	.2.1	Vento e pioggia	262
9.	.2.2	Temperatura	262
9.	.2.3	Pressione ambiente	262
9.	.2.4	Vibrazioni	263
9.	.2.5	Campi magnetici	263
9.3	Pos	sizionamento del microfono	263
9.4	Te	mpi di integrazione	263
9.	.4.1	Tempo di riferimento	264
9.	.4.2	Tempo a lungo termine	264
9.	.4.3	Tempo di osservazione	264
9.	.4.4	Tempo di misura	264
9.5	De	scrittori acustici del rumore ambientale	265
9.	.5.1	Livelli dei valori efficaci e massimi	265
9.	.5.2	Livello continuo equivalente di pressione sonora ponderata A	265
9.	.5.3	Livello sonoro di un singolo evento	267
9.	.5.4	Livello di rumore ambientale, residuo, differenziale e di emissione	267
9.	.5.5	Correzione del rumore Ambientale	268

()	

٨	nnlies	710	ni 1	aratiche	di	acustica

9.5.0 9.5.	1 1	268 268
9.6	Riconoscimento di componenti impulsive	269
9.7	Riconoscimento di componenti tonali	270
9.8	Rumore residuo e rumore di fondo	272
9.9	Rumore stradale	273
9.10	Rumore ferroviario	281
9.11	Rumore aeroportuale	283
9.12	Rumore da impianti elettroacustici in luogo pubblico	285
	olo 10 STICA AMBIENTALE: NORMATIVA, RELAZIONI E VALUT IPATTO ACUSTICO	TAZIONI 289
10.1	Classificazione acustica del territorio	289
10.1		289
10.1	ee i	291
10.1		292
10.1 10.1		293 296
10.2	Metodologia di redazione della zonizzazione acustica e piani di	270
10.2	risanamento	296
10.2		300
10.2		300
10.2	2.3 Analisi critica della zonizzazione acustica	301
10.2	2.4 Difficoltà applicative della normativa vigente	301
10.2	2.5 Caratterizzazione acustica del territorio comunale	302
10.2	2.6 Piani di risanamento pubblici	303
10.2	1	306
10.2	Norme di attuazione della classificazione acustica: insediamento c nuove attività	li 307
10.3	Tipologie di pratiche acustiche	308
	3.1 Linee guida di pratiche edilizie per cantieri esterni ed interni	308
	0.3.1.1 Cantiere edile con lavorazioni in esterno	309
	0.3.1.2 Cantiere edile con lavorazioni in esterno	310
	0.3.1.3 Parametri di misura	311
10.3		312
10.3	<u>.</u>	316
10.4	Esempi di calcolo	321
10.4	*	321

	Indice	11
10.4.2 Cantiere edile con lavorazioni in interno	324	
10.4.3 Valutazione di impatto acustico - Bar	326	
10.4.4 Valutazione di impatto acustico - Officina meccanica	335	
10.4.5 Valutazione di impatto acustico - Supergross	338	
10.4.6 Valutazione di impatto acustico - Pista di go-kart	342	
10.4.7 Valutazione di impatto acustico - Cinema	345	
10.4.8 Valutazione di impatto acustico - Discoteca/musica dal vivo all'ape	erto 348	
10.4.9 Valutazione Previsionale di Clima Acustico per la realizzazione di nuovo insediamento abitativo	un 354	
Capitolo 11		
VALUTAZIONE DELL'ESPOSIZIONE DEI LAVORATORI AL RUMORE	365	
11.1 Quadro normativo	365	
11.2 Metodologia di calcolo	366	
11.2.1 Grandezze da misurare, descrittori dell'esposizione ed impatto		
fisiologico	366	
11.2.1.1 Grandezze da misurare e loro significato	366	
11.2.1.2 Descrittori di esposizione	367	
11.2.1.3 Impatto fisiologico del rumore sull'udito	367	
11.2.2 Analisi procedurale	370	
11.2.3 Scelta della strategia di misurazione del livello di esposizione	372	
giornaliera 11.2.4 Strategia di misurazione basata sui compiti	375	
11.2.4.1 Calcolo dell'incertezza di misura	37 <i>5</i>	
11.2.4.2 Incertezza estesa	378	
11.2.5 Strategia di misurazione basata sulle mansioni	381	
11.2.6 Strategia di misurazione a giornata intera	383	
11.2.7 Livello di esposizione settimanale	384	
11.3 Livelli di esposizione al rumore e classi di rischio secondo		
DLgs. 81/08	385	
11.4 Confronto dei risultati delle misurazioni con i limiti imposti dal		
DLgs. 81/08 secondo la UNI 9432:2011	387	
11.5 Dispositivi di protezione individuali	388	
11.5.1 Attenuazione ottimale prevista	390	
11.5.2 Calcolo del livello sonoro continuo equivalente in presenza del		
dispositivo di protezione auricolare	391	
11.5.2.1 Metodo OBM per frequenza	392	
11.5.2.2 Metodo SNR	392	
11.5.2.3 Metodo HML per bande	393	

12	Applicazio	oni pratiche di acustica	
	11.5.3	Calcolo del livello sonoro di picco in presenza del dispositivo di	
		protezione auricolare	394
	11.5.4	Verifica dell'adeguatezza dei DPI	394
	11.5.5	Valutazione dell'efficacia DPI	395
	11.6 Co	ntenuti minimi della relazione	395
	11.7 Ese	empi di calcolo	396
	11.7.1	Esempio guida per esposizioni basate sui compiti	397
	11.7.2	Esempio guida per esposizioni basate sulle mansioni	399
	11.7.3	Esempio guida per esposizioni a giornata intera	401
	BIBLIOG	RAFIA	405
	Tes	sti	405
	No	rme	405
	Leg	gislazione Nazionale	407
	Alt	ro	409

411

APPENDICE

#### INTRODUZIONE

Il presente testo è il risultato dell'esperienza maturata dagli autori nell'insegnamento dell'acustica applicata, sia a livello universitario nei corsi di studio di Architettura ed Ingegneria, sia a livello di formazione professionale nell'ambito di corsi d'aggiornamento rivolti a professionisti.

Tre sono i principali campi d'applicazione dell'acustica tecnica affrontati in questo libro, quello ambientale, quello edilizio e quello relativo alla sicurezza sul lavoro.

L'acustica ambientale è finalizzata alla riduzione dell'inquinamento acustico nell'ambiente esterno e alla valutazione dell'impatto acustico di nuove opere infrastrutturali o edilizie.

L'acustica in ambito edilizio si occupa di garantire un adeguato isolamento degli edifici dal rumore proveniente da o diretto verso l'esterno ed altri edifici confinanti, nonché dal rumore di origine impiantistica. Contemporaneamente è oggetto di studio la realizzazione di una corretta distribuzione del suono all'interno di ambienti caratterizzati da particolari destinazioni d'uso, quali l'ascolto della musica e della parola.

L'acustica relativa alla valutazione del rischio *rumore negli ambienti lavorativi* è finalizzata alla salvaguardia dei lavoratori occupati in attività caratterizzate da una significativa esposizione al rumore.

Il presente manuale ha lo scopo di trattare i temi precedentemente esposti con particolare riferimento alla legislazione e alla normativa tecnica vigenti, riportando numerosi esempi applicativi e casi di studio.

La caratteristica principale che gli autori hanno voluto conferire al testo è rappresentata dall'idea di guidare il tecnico alla risoluzione dei problemi "partendo da zero", ovvero presupponendo che il lettore non possieda alcuna conoscenza in campo acustico. Per questo motivo la prima parte del testo è dedicata ai fondamenti dell'acustica, senza nessuna velleità di competizione con i testi tradizionali, ai quali si rimanda per una più dettagliata trattazione delle tematiche di base.

Volendo quindi dare al manuale uno spiccato carattere applicativo sono state volutamente tralasciate le dimostrazioni delle principali relazioni che descrivono la propagazione del suono in campo libero e riverberato, mentre ci si è soffermati sulla loro applicazione attraverso esercizi ed esempi interamente svolti e ragionati. L'apparato matematico è ridotto al minimo indispensabile, senza che però questo comprometta il rigore scientifico della trattazione e l'uso di un appropriato linguaggio tecnico.

Il testo è organizzato in tre parti, ciascuna delle quali è suddivisa in capitoli.

La Prima Parte "Acustica di base" è costituita dai primi tre capitoli.

Il Capitolo 1 è dedicato all'acustica fisica: vengono introdotte le principali grandezze che descrivono il fenomeno sonoro, con particolare riferimento ai concetti di livello sonoro e di frequenza e all'analisi in frequenza dei rumori.

Il Capitolo 2 tratta l'acustica fisiologica, ovvero lo studio di come l'orecchio umano risponde allo stimolo sonoro. In questo capitolo vengono anche forniti alcuni concetti di

### Applicazioni pratiche di acustica

fonometria utili per le misure acustiche: curve di ponderazione, costanti di tempo, livello continuo equivalente, SEL, analisi statistica di un tracciato sonoro.

Il Capitolo 3 tratta della propagazione del suono all'aperto in assenza ed in presenza di ostacoli: un cenno particolare viene rivolto alle barriere acustiche.

La Seconda Parte "Acustica nell'edilizia" è costituita da cinque capitoli.

Il Capitolo 4 tratta della propagazione del suono in campo riverberato mediante l'approccio dell'acustica statistica, con particolare riferimento ai concetti di densità sonora di regime e di tempo convenzionale di riverberazione. Si è inoltre accennato a due fenomeni tipici dell'acustica degli ambienti interni: l'eco e le onde stazionarie.

Il Capitolo 5 tratta della correzione acustica degli ambienti interni, finalizzata al conseguimento del tempo ottimale di riverberazione e alla riduzione del rumore aereo. Vengono descritti i principali sistemi fonoassorbenti (materiali porosi, risuonatori acustici e pannelli vibranti), dedicando un piccolo approfondimento alla valutazione del coefficiente d'assorbimento acustico medio ponderato mediante la norma UNI EN ISO 11654.

Il Capitolo 6 è dedicato al tema del fonoisolamento, con particolare riferimento al concetto di potere fonoisolante di una struttura. Vengono introdotti i principali descrittori dell'isolamento acustico degli edifici nei confronti sia dei rumori aerei sia dei rumori impattivi, con un breve cenno alle norme della serie UNI EN ISO 140 per la loro misura in opera.

Nel Capitolo 7 è descritta la procedura prevista dalle norme UNI EN ISO 717 per la valutazione dei descrittori dell'isolamento acustico e del livello da calpestio. Vengono anche fornite alcune formule empiriche per determinare in modo semplificato gli indici di valutazione.

Nel Capitolo 8 è illustrata la procedura di classificazione acustica delle unità immobiliari prevista dalla norma UNI 11367, proponendo un breve confronto con il DPCM 05/12/1997 che attualmente costituisce la legislazione cogente in materia di requisiti acustici passivi degli edifici.

La Terza Parte "Acustica ambientale e del lavoro" è formata dagli ultimi tre capitoli.

Nel Capitolo 9 vengono descritte le tecniche di misura del rumore ambientale, con particolare riferimento al DM Ambiente 16/03/1998. Viene quindi analizzato il rumore prodotto da alcune particolari sorgenti (stradale, ferroviario, aeroportuale, impianti elettroacustici in luoghi di intrattenimento danzante e pubblico spettacolo), con riferimento alla legislazione e alla normativa tecnica vigenti.

Nel Capitolo 10 sono riportati alcuni richiami sulla classificazione acustica del territorio, con particolare riferimento ai piani di risanamento, alle pratiche tipo per ottenere le autorizzazioni in deroga per i cantieri temporanei mobili, le autorizzazioni per le attività commerciali e le pratiche di clima e impatto acustico. Sono riportati esempi di calcolo relativi a pratiche tipo per ottenere autorizzazioni in deroga e a valutazioni d'impatto acustico.

Il Capitolo 11 è dedicato alla valutazione dell'esposizione dei lavoratori al rumore in base alla legislazione vigente (Testo Unico in materia di salute e sicurezza nei luoghi di lavoro) a alla normativa tecnica (UNI EN ISO 9612, UNI 9432, UNI EN 458 e UNI/TR 11347). Vengono descritte le tre strategie di misura, basate sui compiti, sulle mansioni e a giornata intera, e per ciascuna di esse è presentato un esempio di calcolo del livello di esposizione al rumore.

. .

Introduzione

Si ringraziano fin d'ora quanti, studenti o professionisti, dopo aver letto il presente manuale, effettueranno apprezzamenti, consigli di miglioramento o critiche costruttive, anche segnalando eventuali sviste o errori. Gli interessati sono invitati a mettersi in contatto con gli autori in modo tale che le osservazioni possano essere prese in considerazione in caso di riedizione o di ampliamento dell'opera.

Gli autori

# Parte I ACUSTICA DI BASE

## Capitolo 1

#### **ACUSTICA FISICA**

#### 1.1 Il suono

Il *suono* è una sensazione percepita dall'orecchio umano, provocata da rapide fluttuazioni della pressione atmosferica intorno al suo valore medio.

Un tubo rigido aperto alle estremità, con stantuffo in moto alternativo al suo interno, può essere una *sorgente sonora* di onde piane (Figura 1.1). Il moto alternativo del pistone provoca compressioni e rarefazioni dell'aria presente all'interno del condotto.

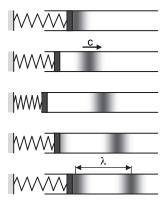


Figura 1.1 - Sorgente sonora: tubo con stantuffo in moto alternativo.

Un altro esempio di sorgente sonora può essere una lamina elastica incernierata ad un'estremità che, vibrando, produce compressioni e rarefazioni degli strati d'aria circostante (Figura 1.2).



Figura 1.2 - Sorgente sonora: lamina elastica incernierata.

Se l'aria è in quiete, le particelle d'aria oscillano intorno alla loro posizione di equilibrio, mentre le compressioni e rarefazioni dell'aria si propagano nello spazio.

#### 1.2 Grandezze caratteristiche

La pressione dell'aria in quiete è detta *pressione atmosferica* p<sub>atm</sub> [Pa], che al livello del mare risulta in condizioni normali pari a 101325 Pa.

Essendo il suono una perturbazione di pressione intorno ad un valore medio, in acustica assume significato non tanto la pressione assoluta p in un determinato istante, quanto la variazione di pressione  $\Delta p$  rispetto alla pressione dell'aria in quiete, detta anche pressione acustica:

$$\Delta p(\tau) = p(\tau) - p_{atm} \tag{1.1}$$

ove  $\tau$  è il tempo [s].

Nel caso dei fenomeni fisici oscillatori assumono importanza le seguenti grandezze:

- il periodo T [s], definito come il tempo necessario al compimento di un'oscillazione completa;
- la *frequenza* f [Hz], definita come il numero di oscillazioni che si verificano nell'unità di tempo, e pertanto pari all'inverso del periodo:

$$f = \frac{1}{T} \tag{1.2}$$

• la *pulsazione* ω [rad/s], corrispondente alla velocità angolare:

$$\omega = \frac{2\pi}{T} = 2\pi f \tag{1.3}$$

- la lunghezza d'onda λ [m], definita come lo spazio percorso dall'onda sonora nel tempo T, ovvero la distanza tra due compressioni (o rarefazioni) successive;
- l'ampiezza dell'oscillazione Δp<sub>max</sub> [Pa], ovvero la massima differenza tra la pressione assoluta e la pressione atmosferica.

#### 1.3 Suono puro

Ritornando all'esempio di Figura 1.1, se il pistone è un oscillatore armonico semplice, il suo movimento è regolato dalla seguente legge sinusoidale (Figura 1.3):

$$x(\tau) = A\cos(\omega \tau) \tag{1.4}$$

 $x = posizione del pistone all'istante temporale \tau$ 

A = ampiezza massima dell'oscillazione del pistone

 $\omega$  = pulsazione del moto

1. Acustica fisica

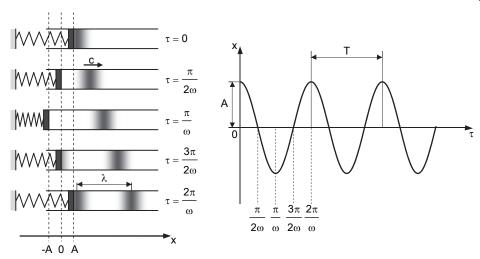


Figura 1.3 - Moto armonico semplice.

In tale condizione, anche la pressione in qualunque punto del tubo è descrivibile mediante una legge sinusoidale, avente la stessa pulsazione della legge del moto del pistone (Figura 1.4):

$$p(\tau) = p_{atm} + \Delta p_{max} \cos(\omega \tau)$$
 (1.5)

ovvero, ricordando la (1.1):

$$\Delta p(\tau) = \Delta p_{\text{max}} \cos(\omega \tau) \tag{1.6}$$

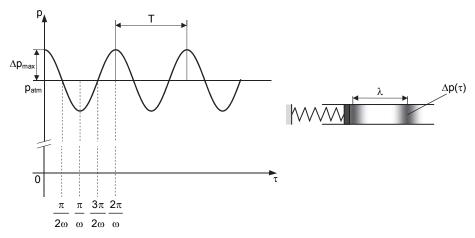


Figura 1.4 - Suono puro prodotto dal moto alternativo del pistone.

Un suono la cui legge di variazione della pressione sonora è descrivibile mediante una funzione di tipo sinusoidale nel tempo è detto *suono puro*. Un suono puro è pertanto caratterizzato da un'unica frequenza.

In Figura 1.4 è quindi rappresentata l'*onda piana progressiva* associata al suono puro prodotto dal moto alternativo dello stantuffo all'interno di un tubo rigido: sono evidenziati la lunghezza d'onda, ovvero la distanza tra due compressioni (rarefazioni) successive, ed il periodo, ovvero il tempo in cui lo stantuffo compie un'oscillazione completa.

#### 1.4 Velocità del suono

La *velocità del suono* c [m/s] è la velocità di propagazione dell'oscillazione di pressione: è il rapporto tra la lunghezza d'onda ed il periodo, nonché il prodotto tra la lunghezza d'onda e la frequenza:

$$c = \frac{\lambda}{T} = \lambda f \tag{1.7}$$

Il suono si propaga attraverso i mezzi elastici solidi, liquidi e aeriformi.

Negli *aeriformi* la velocità del suono dipende dalla temperatura. In particolare nel caso di gas perfetto risulta:

$$c = \sqrt{kR_1 T} \tag{1.8}$$

 k = costante adimensionale dipendente dal tipo di gas perfetto, data dal rapporto tra il calore specifico a pressione costante ed il calore specifico a volume costante

R<sub>1</sub> = costante particolare del gas perfetto, data dal rapporto tra la costante universale dei gas perfetti e la massa molecolare [J/kgK]

T = temperatura assoluta [K]

Ad esempio per l'aria a 20 °C si ha: 
$$c = \sqrt{1.405 \cdot 287.0 \cdot 293.15} = 343.8 \cong 344 \frac{m}{s}$$

La velocità del suono nell'aria aumenta di circa 0.6 m/s per ogni grado di aumento della temperatura. Ciò spiega ad esempio perché in estate si sentono rumori provenienti da lontano (ad es. treno in transito) che in inverno non vengono percepiti.

Nei liquidi la velocità del suono risulta:

$$c = \sqrt{\frac{K}{\rho}} \tag{1.9}$$

K = modulo di elasticità del liquido [Pa]

 $\rho$  = densità del liquido [kg/m<sup>3</sup>]

Ad esempio nel caso di acqua a 20 °C risulta: 
$$c = \sqrt{\frac{2.2 \cdot 10^9}{1000}} = 1483 \frac{m}{s}$$

1. Acustica fisica

Nei solidi la velocità del suono di un'onda longitudinale risulta:

$$c = \sqrt{\frac{E}{\rho}} \tag{1.10}$$

E = modulo di elasticità di Young [Pa]

 $\rho = densità [kg/m^3]$ 

Il suono si propaga più velocemente nei solidi con grande elasticità e bassa densità. Ad esempio nel caso dell'alluminio risulta:

$$c = \sqrt{\frac{70 \cdot 10^9}{2700}} = 5092 \, \frac{m}{s}$$

In Tabella 1.1 è riportato il valore indicativo della velocità del suono per differenti materiali.

Tabella 1.1 - Velocità del suono in vari tipi di materiali.

Materiale	Velocità del suono [m/s]
Aria (20 °C)	344
Acqua (20 °C)	1410
Acciaio	5200
Alluminio	5100
Calcestruzzo	3400
Legno	3400
Mattoni	3000
Piombo	1220
Vetro	4100

#### 1.5 Pressione efficace

Si definisce **pressione efficace**  $p_e$  [Pa] il valore quadratico medio su un periodo T della pressione acustica  $\Delta p(\tau)$ :

$$p_{e} = \sqrt{\frac{1}{T} \int_{0}^{T} \Delta p^{2}(\tau) d\tau}$$
 (1.11)

Il significato geometrico della pressione efficace è rappresentato in Figura 1.5: l'area tratteggiata sottesa all'andamento del quadrato della pressione acustica è pari all'area rettangolare grigia sottesa al quadrato della pressione efficace. Si noti che, poiché il valore medio della variazione di pressione sonora su un periodo è nullo, è necessario riferirsi al valore quadratico medio che è una quantità sempre positiva.

Nel caso di suono puro il legame tra la pressione efficace e l'ampiezza dell'oscillazione è dato dalla seguente relazione:

$$p_{e} = \frac{\Delta p_{max}}{\sqrt{2}} \tag{1.12}$$

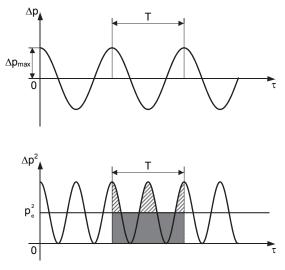


Figura 1.5 - Pressione efficace.

#### 1.6 Intensità sonora e densità sonora

Un'onda sonora che si propaga attraverso un mezzo trasporta energia. Per descrivere il contenuto energetico associato alla propagazione di un'onda sonora si introducono le grandezze intensità sonora e densità sonora.

Si definisce *intensità sonora* I [W/m²] di un'onda la potenza sonora che fluisce attraverso una superficie di area unitaria normale alla direzione di propagazione dell'onda:

$$I = \frac{dW}{dS} \tag{1.13}$$

essendo dW la potenza sonora (energia sonora nell'unità di tempo) che fluisce attraverso l'area elementare dS posta perpendicolarmente alla direzione di propagazione dell'onda. Si definisce *densità sonora* D [J/m³] in un mezzo l'energia sonora presente nell'unità di volume:

$$D = \frac{dE}{dV} \tag{1.14}$$

essendo dE l'energia sonora contenuta nel volume elementare dV.

Nel caso di un'*onda piana progressiva* (Figura 1.4) l'intensità sonora e la densità sonora si esprimono mediante le seguenti relazioni:

$$I = \frac{\Delta p_{\text{max}}^2}{2\rho c} = \frac{p_e^2}{\rho c} \tag{1.15}$$

1. Acustica física

$$D = \frac{I}{c} = \frac{\Delta p_{\text{max}}^2}{2\rho c^2} = \frac{p_e^2}{\rho c^2}$$
 (1.16)

La quantità pc, prodotto tra la densità del mezzo e la velocità del suono, è detta *impedenza acustica* del mezzo [kg/m²s].

Nel caso di aria (T = 20 °C) l'impedenza acustica risulta: 
$$\rho c = 1.2 \cdot 344 = 413 \frac{kg}{m^2 s}$$

L'intensità sonora si utilizza soprattutto nello studio della propagazione del suono all'aperto (campo libero), mentre la densità sonora è utilizzata nell'acustica degli ambienti confinati (campo riverberato).

Si noti che nelle (1.15) e (1.16) l'intensità sonora e la densità sonora dipendono entrambe dal quadrato della pressione efficace. Ne segue che la quantità  $p_e^2$  è legata al contenuto energetico associato alla propagazione del suono. Noto il valore locale della pressione efficace  $p_e$ , è quindi possibile conoscere il valore locale dell'intensità energetica I dell'onda acustica e della densità sonora D nel mezzo.

Vista l'importanza della pressione efficace, nel seguito della trattazione, salvo dove altrimenti specificato, la si indicherà semplicemente con p e con il solo termine "pressione" si intenderà sempre la pressione efficace.

#### 1.7 Campo di udibilità

L'intervallo di frequenza dei *suoni percepibili* dall'orecchio umano risulta compreso tra 16÷20 Hz e 16000÷20000 Hz. Al di sotto dei 16÷20 Hz si hanno gli *infrasuoni*, mentre al di sopra dei 16÷20 kHz si hanno gli *ultrasuoni*.

Essendo in aria  $c=344\,$  m/s, dalla (1.7) risulta che il corrispondente intervallo di lunghezza d'onda di suoni udibili risulta compreso tra circa 17 mm e 17 m. Si nota che le lunghezze d'onda in tale intervallo sono dello stesso ordine di grandezza degli oggetti e degli ostacoli che le onde incontrano nel loro propagarsi, a differenza di quanto avviene per la propagazione della luce, ove le lunghezze d'onda del campo del visibile sono piccolissime e comprese nell'intervallo  $0.38 \div 0.76\,\mu m$ .

In Figura 1.6 è rappresentato il legame tra lunghezza d'onda e frequenza nel caso di propagazione in aria.

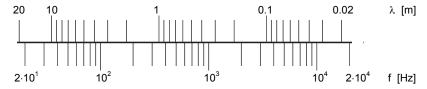


Figura 1.6 - Legame tra lunghezza d'onda e frequenza per propagazione in aria (c = 344 m/s).

La *pressione efficace* p dei suoni udibili è molto piccola rispetto alla pressione atmosferica. Alla frequenza di 1000 Hz la soglia di udibilità risulta pari a circa 2·10<sup>-5</sup> Pa, mentre la soglia del fastidio è posta a circa 20 Pa. Pressioni superiori a 200 Pa provocano la rottura del timpano.

Si noti ad esempio che una variazione di pressione pari a 200 Pa corrisponde alla pressione statica esercitata da 2 cm di colonna acqua. Applicando la legge di Stevino, si ottiene infatti:

$$H = \frac{p}{\rho \cdot g} = \frac{200}{1000 \cdot 9.81} = 2 \cdot 10^{-2} \text{ m}$$

Una pressione dinamica di soli 2 cm di colonna d'acqua può portare alla rottura del timpano, mentre staticamente tale pressione è appena percettibile.

#### 1.8 Sorgente sonora

Le sorgenti sonore vengono caratterizzate dal punto di vista acustico mediante la *potenza sonora* W [W], definita come l'energia emessa dalla sorgente nell'unità di tempo. Si tratta di una proprietà intrinseca della sorgente sonora.

La potenza sonora di una sorgente non si misura direttamente, ma si determina a seguito di misure della pressione sonora nell'intorno della sorgente stessa.

Integrando l'intensità sonora, misurata in corrispondenza della superficie immaginaria S che circonda completamente la sorgente, si ottiene dalla (1.13) la potenza sonora totale irradiata dalla sorgente:

$$W = \int_{S} I_{S} dS \tag{1.17}$$

essendo  $I_S$  l'intensità sonora rilevata su un'area elementare dS della superficie immaginaria.

Nel caso particolare in cui la *sorgente* sia *isotropa*, ovvero irradi energia uniformemente in tutte le direzioni, e considerando una superfice immaginaria, ad esempio, sferica di raggio r che la circonda, risulta dalla (1.17):

$$W = I_S 4\pi r^2 \tag{1.18}$$

Se la sorgente è isotropa, I<sub>S</sub> può essere misurata in qualunque punto della superficie immaginaria.

#### 1.9 Livelli sonori

La pressione sonora dei suoni udibili dall'orecchio umano è circa compresa nell'intervallo  $2 \cdot 10^{-5} \div 20$  Pa. Il rapporto tra le pressioni massima e minima udibili è dell'ordine di  $10^6$ .

Essendo l'intensità sonora proporzionale al quadrato della pressione sonora, ne segue che il rapporto tra le intensità massima e minima udibili è dell'ordine dei 10<sup>12</sup>.

Dal momento che le grandezze acustiche utilizzate possono quindi assumere valori numerici molto grandi o molto piccoli, risulta opportuno utilizzare una *scala logaritmica*, così da contrarre il campo numerico delle grandezze stesse. Inoltre l'introduzione di una scala logaritmica si adatta anche meglio alla caratteristica dell'orecchio umano che presenta una risposta più di tipo logaritmico che lineare.

Una qualunque grandezza X può essere definita sotto forma di *scala di livello* in *decibel* [dB]. Il valore della grandezza in esame X viene confrontato con un valore convenzionale della grandezza stessa  $X_{rif}$ , assunto come riferimento, mediante la seguente espressione:

$$L = 10\log \frac{X}{X_{rif}} \tag{1.19}$$

Se  $X_{rif}$  è il riferimento, la relazione (1.19) esprime il livello L di X rispetto a  $X_{rif}$ , espresso in decibel. Il livello di X risulta nullo, ovvero pari a 0 dB, quando X assume il valore di riferimento  $X_{rif}$ .

Si noti che il logaritmo presente nella (1.19) è in base 10:  $\log = \log_{10}$ .\*

#### 1.9.1 Livello di pressione sonora

Si definisce livello di pressione sonora la quantità:

$$L_{p} = 10\log\frac{p^{2}}{p_{rif}^{2}} = 20\log\frac{p}{p_{rif}}$$
 (1.20)

La pressione di riferimento è quella relativa alla soglia di udibilità media alla frequenza di 1000 Hz, ovvero  $p_{rif} = 2.10^{-5}$  Pa.

Il campo di pressione dei suoni udibili è compreso quindi tra 0 dB (soglia di udibilità) e 140 dB (rottura del timpano), così come rappresentato in Figura 1.7.

Si noti che la moltiplicazione per 10 del logaritmo serve ad evitare un'eccessiva compressione dei risultati, che altrimenti sarebbero compresi tra 0 e 14 B (Bel). Inoltre si osservi che all'interno del logaritmo la pressione efficace compare elevata al quadrato in quanto il livello di pressione sonora è una quantità di tipo energetico.

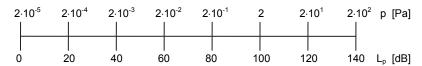


Figura 1.7 - Legame tra pressione efficace [Pa] e livello di pressione sonora [dB].

In Tabella 1.2 si riportano a titolo indicativo alcuni valori tipici del livello di pressione sonora e come vengono percepiti dall'uomo.

$$\log_{10} x = y \iff x = 10^y$$

Ad esempio:  $\log_{10} 1000 = 3 \iff 1000 = 10^3$ 

Proprietà dei logaritmi utili in acustica:

$$\log 1 = 0$$
  $\log xy = \log x + \log y$   $\log \frac{x}{y} = \log x - \log y$   $\log x^y = y \log x$ 

<sup>\*</sup> Si ricorda che il logaritmo in base 10 di un numero x è l'esponente y che bisogna dare a 10 per ottenere il numero stesso:

Tabella 1.2 - Valori tipici del livello di pressione sonora.

[dB]	0	10	20	30	40	50		60	70	8	0	90	100		120
Sensazione	silenzi assolut	C	alma	liev percez				rumori assordanti sopportabili per brevissime esposizioni							
[dB]	0	10	20	30	40	50		60	70		80	90	1	00	120
Possibilità di conversazion	a hassa voce		a voce normale		lad alta voc		a voce	ce diffici			olo dando	Imp	ossibile		
[dB]	0		10	2	20	30	40		50	60	70	80	90	100	120
Ambiente	aboratoi di acusti	-	udio di istrazio		asa ii npag			tame città		strac	le traf			officine e stabilimenti rumorosi	

Si vuole determinare la variazione del livello di pressione sonora dovuta ad un raddoppio della pressione sonora.

Detti  $L_{p1}$  il livello di pressione sonora associato alla pressione  $p_1 = p$  e  $L_{p2}$  il livello di pressione sonora associato alla pressione  $p_2 = 2p$ , si ottiene:

$$\begin{split} L_{p1} &= 10 log \frac{p_1^2}{p_{rif}^2} = 10 log \frac{p^2}{p_{rif}^2} \\ L_{p2} &= 10 log \frac{p_2^2}{p_{rif}^2} = 10 log \frac{4p^2}{p_{rif}^2} = 10 log \frac{p^2}{p_{rif}^2} + 10 log 4 = L_{p1} + 6 dB \end{split}$$

Raddoppiando la pressione sonora, il livello di pressione sonora aumenta di 6 dB. Risulta pertanto evidente che, mentre le pressioni sonore sono quantità additive, i livelli di pressione sonora non sono quantità additive.

#### 1.9.2 Livello di intensità sonora

Si definisce livello di intensità sonora la quantità:

$$L_{I} = 10\log\frac{I}{I_{rif}} \tag{1.21}$$

L'intensità di riferimento risulta  $I_{rif} = 10^{-12} \text{ W/m}^2$ , che rappresenta l'intensità sonora corrispondente alla soglia di udibilità a 1000 Hz, ipotizzando costante l'impedenza acustica del mezzo. Infatti dalla (1.15) si ottiene:

$$I_{rif} = \frac{p_{rif}^2}{\rho c} = \frac{(2 \cdot 10^{-5})^2}{1.2 \cdot 344} \cong 10^{-12} \, \text{W} \, / \, \text{m}^2$$

Il livello di pressione sonora e di intensità sonora risultano pertanto numericamente coincidenti e spesso nella pratica si parla semplicemente di *livello sonoro* L.

$$L_{I} = 10 \log \frac{I}{I_{rif}} = 10 \log \left( \frac{p^{2}}{\rho c} \frac{\rho c}{p_{rif}^{2}} \right) = L_{p}$$
 (1.22)

Si vuole determinare la variazione di livello di intensità sonora dovuta ad un raddoppio dell'intensità sonora.

Detti  $L_{I1}$  il livello di intensità sonora associato all'intensità  $I_1 = I$  e  $L_{12}$  il livello di intensità sonora associato all'intensità  $I_2 = 2I$ , si ottiene:

$$\begin{split} L_{11} &= 10 log \frac{I_{1}}{I_{rif}} = 10 log \frac{I}{I_{rif}} \\ L_{12} &= 10 log \frac{I_{2}}{I_{rif}} = 10 log \frac{2I}{I_{rif}} = 10 log \frac{I}{I_{rif}} + 10 log 2 = L_{11} + 3 dB \end{split}$$

Raddoppiando l'intensità sonora, il livello di intensità sonora aumenta di 3 dB.

Si noti che, essendo l'intensità sonora proporzionale al quadrato della pressione sonora, un raddoppio della pressione sonora coincide con un quadruplico dell'intensità sonora, cui corrisponde un aumento di livello di 6 dB.

Risulta infine evidente che, mentre le intensità sonore sono quantità additive, i livelli di intensità sonora non sono quantità additive.

#### 1.9.3 Livello di potenza sonora

Si definisce livello di potenza sonora la quantità:

$$L_{W} = 10\log \frac{W}{W_{rif}}$$
 (1.23)

La potenza di riferimento è assunta convenzionalmente  $W_{rif} = 10^{-12} W$ .

La potenza sonora ed il livello di potenza sonora sono grandezze caratteristiche di una sorgente sonora.

In Figura 1.8 è riportata la corrispondenza tra i valori di potenza sonora ed i rispettivi livelli.

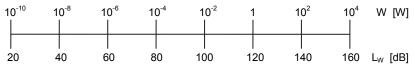


Figura 1.8 - Legame tra potenza sonora [W] e livello di potenza sonora [dB].

In Tabella 1.3 si riportano a titolo indicativo valori tipici della potenza sonora e del rispettivo livello di diverse sorgenti sonore.

Le potenze sonore emesse dalle sorgenti sono solitamente molto inferiori alle potenze elettriche o meccaniche consumate. Ad esempio, nel caso degli altoparlanti, il rendimento, ovvero il rapporto tra la potenza acustica emessa e la potenza elettrica consumata, è generalmente piuttosto basso, dell'ordine dell'1-2%. Ne segue che un altoparlante da 100 W di potenza elettrica emette 1-2 W di potenza acustica, a cui corrisponde un livello di potenza sonora pari a circa 120 dB.

Tabella 1.3 - Valori tipici del livello di potenza sonora.

W [W]	Lw [dB]	Sorgente
10-9	30	bisbiglio
10-4	80	conversazione (valore efficace su lungo periodo)
10 <sup>-3</sup>	90	voce gridata (valore efficace su lungo periodo)
10-2	100	veicolo in marcia su autostrada
10 <sup>-1</sup>	110	apparecchio radio ad alto volume, ventilatore centrifugo
1	120	martello perforatore
10	130	motore di un piccolo aereo
$10^{2}$	140	aereo di linea a 4 propulsori
10 <sup>5</sup>	160	turboreattore
$10^{7}$	190	missile

Si vuole determinare la variazione di livello di potenza sonora dovuta ad un raddoppio della potenza sonora.

Detti  $L_{W1}$  il livello di potenza sonora associato alla potenza  $W_1 = W$  e  $L_{W2}$  il livello di potenza sonora associato alla potenza  $W_2 = 2W$ , si ottiene:

$$\begin{split} L_{W1} &= 10\log\frac{W_1}{W_{rif}} = 10\log\frac{W}{W_{rif}} \\ L_{W2} &= 10\log\frac{W_2}{W_{rif}} = 10\log\frac{2W}{W_{rif}} = 10\log\frac{W}{W_{rif}} + 10\log2 = L_{W1} + 3dB \end{split}$$

Raddoppiando la potenza sonora, il livello di potenza sonora aumenta di 3 dB.

Risulta pertanto evidente che mentre le potenze sonore sono quantità additive, i livelli di potenza sonora non sono quantità additive.

#### 1.9.4 Operazioni sui livelli di pressione sonora

Quando più sorgenti operano contemporaneamente, il livello di pressione sonora complessivo in un punto del campo sonoro è il livello che corrisponde alla somma delle singole intensità sonore nel punto.

Siano L<sub>p1</sub> e L<sub>p2</sub> i livelli di pressione sonora corrispondenti alle intensità sonore I<sub>1</sub> e I<sub>2</sub>:

$$L_{\text{p1}} = L_{\text{II}} = 10 log \frac{I_{_{1}}}{I_{_{\text{rif}}}} \hspace{1cm} I_{_{1}} = I_{_{\text{rif}}} 10^{L_{_{\text{p1}}/10}} \label{eq:logical_logical}$$

$$L_{\rm p2} = L_{\rm I2} = 10 log \frac{I_2}{I_{\rm rif}} \qquad \quad I_2 = I_{\rm rif} 10^{L_{\rm p2}/10} \label{eq:Lp2}$$

Il livello di pressione sonora L<sub>p</sub> complessivo risulta:

$$L_{p} = L_{I} = 10\log\frac{I_{1} + I_{2}}{I_{cir}} = 10\log\frac{I_{rif}10^{L_{p1}/10} + I_{rif}10^{L_{p2}/10}}{I_{cir}} = 10\log\left(10^{L_{p1}/10} + 10^{L_{p2}/10}\right) (1.24)$$

Nel caso di N livelli, ciascuno di pressione sonora L<sub>pi</sub>, il livello complessivo risulta:

1. Acustica fisica

$$L_{p} = 10 \log \left( \sum_{i=1}^{N} 10^{\frac{L_{pi}}{10}} \right)$$
 (1.25)

In Tabella 1.4 è riportato un abaco semplificato per la somma di due livelli di pressione sonora, che riporta il numero di dB da sommare al livello più elevato in funzione della differenza tra i due livelli.

Tabella 1.4 - Abaco semplificato per la somma di due livelli sonori.

differenza tra i due livelli [dB]	Valore da sommare al livello maggiore [dB]
0	3
1	2.5
2	2
3	2
4	1.5
5	1
6	1
7	1
8	0.5
9	0.5
10 o più	0

In particolare, se i due livelli sono uguali, il livello complessivo si ottiene incrementando il livello di 3 dB.

Se i due livelli differiscono di più di 10 dB, il livello complessivo è pari al livello più elevato ed il contributo del livello inferiore è trascurabile. Ciò spiega il perché il rumore comunemente detto di fondo, ma più correttamente detto residuo (cfr. par. 9.8), nelle misure acustiche è considerato ininfluente se il segnale oggetto di misura è almeno 10 dB maggiore di esso.

La formula relativa alla somma di due livelli sonori può essere utilizzata anche in sottrazione, ed è utilizzata in acustica edilizia quando si deve eliminare dal livello di pressione sonora misurato il contributo del rumore residuo:

$$L_{p} = 10\log(10^{L_{p1}/10} - 10^{L_{p2}/10})$$
 (1.26)

L<sub>p</sub> = livello di pressione sonora del segnale depurato del rumore residuo,

L<sub>p1</sub> = livello di pressione sonora rilevato, dovuto alla combinazione del segnale con il rumore residuo,

 $L_{p2}$  = rumore residuo rilevato in assenza del segnale.

Si osserva che le norme tecniche della serie UNI EN ISO 140, relative alla misura in opera dei requisiti acustici passivi degli edifici, prevedono che, nel caso in cui la differenza tra il livello del segnale combinato con il rumore residuo e quello del rumore residuo stesso risulti minore o uguale a 6 dB, venga applicata una correzione forfettaria di 1.3 dB, pari al valore corrispondente alla differenza di 6 dB. Quanto sopra al solo fine di indicare i limiti di affidabilità delle misurazioni nel resoconto di prova (cfr. esercizio 3 al cap. 7).

#### 1.10 Suoni complessi

Facendo sempre riferimento alla sorgente sonora di Figura 1.1, se il pistone è collegato ad un disco, ad esempio di forma ellissoidale così come rappresentato in Figura 1.9, la legge che descrive il moto del pistone all'interno del tubo è sempre di tipo periodico, ma non perfettamente sinusoidale.

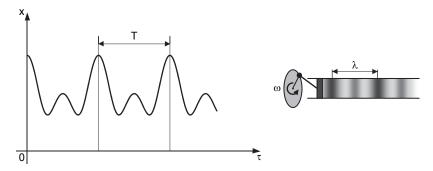


Figura 1.9 - Legge del moto di uno stantuffo collegato a un disco ellissoidale.

Anche la pressione in qualunque punto del tubo è descrivibile mediante una funzione periodica. Un suono a carattere *periodico* è detto *complesso*.

I suoni complessi presentano andamenti temporali della pressione sonora periodici, ma non sinusoidali. I suoni puri sono particolari suoni complessi il cui andamento temporale della pressione sonora è di tipo sinusoidale.

Una qualunque oscillazione periodica può essere sviluppata in serie di Fourier, cioè può essere vista come somma di oscillazioni sinusoidali semplici, dette *armoniche*, le cui frequenze sono in progressione aritmetica, ovvero sono multiple intere della più bassa, detta *frequenza fondamentale*.

Ne segue che, nel caso di suono complesso, la pressione assoluta p risulta (cfr. par 1.3):

$$p(\tau) = p_{atm} + \Delta p_{max,1} \cos(\omega_1 \tau) + \Delta p_{max,2} \cos(\omega_2 \tau) + \Delta p_{max,3} \cos(\omega_3 \tau) + \dots$$
 (1.27)

La variazione di pressione rispetto alla pressione atmosferica (pressione acustica) vale quindi dalla (1.1):

$$\Delta p(\tau) = \Delta p_{\text{max},1} \cos(\omega_1 \tau) + \Delta p_{\text{max},2} \cos(\omega_2 \tau) + \Delta p_{\text{max},3} \cos(\omega_3 \tau) + \dots \tag{1.28}$$

 $\omega_1 = 2\pi f_0$  pulsazione corrispondente alla frequenza fondamentale  $f_0$  (prima armonica)

 $\omega_2 = 2\omega_1 = 4\pi f_0$  pulsazione corrispondente alla frequenza  $2f_0$  (seconda armonica)

 $\omega_3=3\omega_1=6\pi f_0~$  pulsazione corrispondente alla frequenza  $3f_0$  (terza armonica)

In Figura 1.10 è rappresentato un esempio di scomposizione di una funzione periodica in quattro armoniche.

1. Acustica fisica

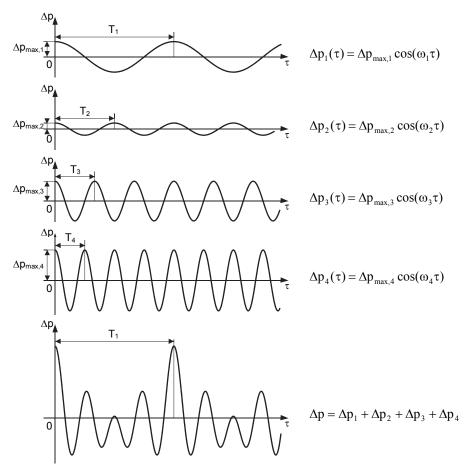


Figura 1.10 - Scomposizione di una funzione periodica in quattro armoniche.

Le componenti armoniche di un suono complesso risultano individuate dalla conoscenza della frequenza fondamentale  $f_0$  e delle ampiezze  $\Delta p_{max,i}$  delle singole armoniche, ovvero delle relative pressioni efficaci  $p_{e,i}$  o dei livelli di pressione sonora  $L_{p,i}$ . È utile rappresentare un suono complesso mediante un diagramma a barre, detto *spettro acustico*, in cui in ascissa sono riportate le frequenze delle differenti armoniche, mentre in ordinata i quadrati delle relative pressioni efficaci, ovvero i corrispondenti livelli di pressione sonora. In Figura 1.11a è rappresentato lo spettro acustico di un suono puro ed in Figura 1.11b è rappresentato lo spettro acustico del suono complesso di Figura 1.10.

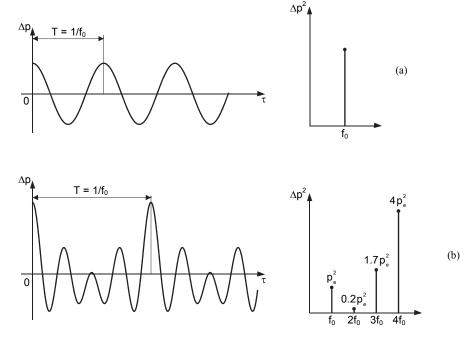


Figura 1.11 - Spettro acustico: suono puro (a) e suono complesso (b).

I suoni prodotti dagli strumenti musicali sono complessi, ovvero sono dati generalmente dalla sovrapposizione di un tono puro e di altri toni puri ad esso armonicamente correlati. Le principali caratteristiche di un suono complesso sono le seguenti.

• *Altezza tonale*: parametro legato alla frequenza fondamentale (Figura 1.12). Le note alte sono caratterizzate da frequenza elevata (suoni acuti), le note basse da frequenza bassa (suoni gravi).

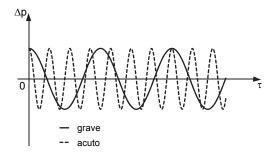


Figura 1.12 - Altezza tonale: due suoni puri di eguale intensità e differente altezza.

• *Intensità*: parametro legato all'ampiezza dell'oscillazione (Figura 1.13). Distingue i suoni deboli da quelli forti.

1. Acustica fisica

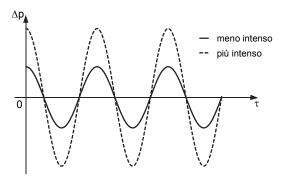


Figura 1.13 - Intensità: due suoni puri di eguale altezza, ma con differente intensità.

• *Timbro*: parametro legato alla forma d'onda (Figura 1.14). È un attributo caratteristico della sorgente sonora. Gli strumenti musicali si differenziano per la purezza o meno della forma d'onda riprodotta. Uno strumento a fiato (ad es. la tromba) o l'arpa producono un suono puro. Il pianoforte, a differenza dell'arpa, genera una nota che è caratterizzata non solo dalla lunghezza d'onda della corda che viene premuta, ma anche dalla risposta meccanica della cassa in cui la corda è inserita. La voce umana è costituita dalla sovrapposizione di un suono puro (prodotto dalla corda vocale) e da suoni spuri (prodotti dalla cavità orale, polmoni...).

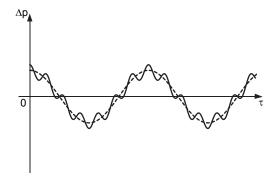


Figura 1.14 - Timbro: due suoni di eguale altezza e intensità, ma timbro diverso.

#### 1.11 Rumori

Quando il suono è percepito come disturbo, si parla di *rumore*; la pressione sonora presenta un andamento casuale nel tempo (Figura 1.15). Dal momento che è possibile considerare qualunque funzione irregolare e non periodica come una funzione periodica di periodo infinito, ovvero di frequenza infinitesima, lo *spettro acustico* di un rumore è continuo rispetto alla frequenza, nel senso che i diversi tratti verticali, corrispondenti alle diverse frequenze, risulterebbero infinitamente vicini l'uno all'altro.

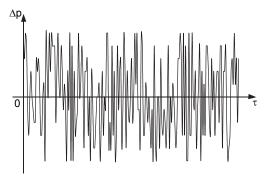


Figura 1.15 - Rumore: perturbazione casuale nel tempo.

Per un'onda di tipo casuale non si rappresenta l'intensità a ciascuna distinta frequenza f, ma piuttosto l'intensità contenuta in una *banda di frequenza*.

Il rumore è quindi rappresentato mediante uno spettro acustico che associa a ciascuna banda un valore di livello sonoro equivalente all'energia contenuta nell'intervallo di frequenza della banda stessa. Il grafico che riporta lo spettro acustico può essere del tipo a barre (Figura 1.16a) o a linee (Figura 1.16b).

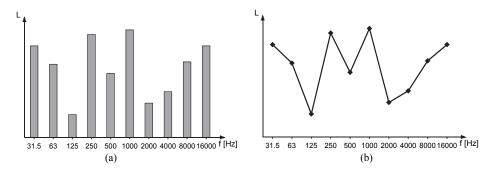


Figura 1.16 - Spettro acustico di un rumore: grafico a barre (a) e grafico a linee (b).

#### 1.12 Bande di frequenza

Per l'analisi in frequenza dei rumori si possono utilizzare due tipologie di *analisi* spettrale.

- Analisi spettrale a bande strette di ampiezza costante: consente un rilevamento dettagliato delle caratteristiche spettrali del rumore. Si utilizza nell'analisi di suoni caratterizzati da spettri acustici discreti o per evidenziare l'eventuale presenza di toni puri in rumori a spettro continuo.
- Analisi spettrale a *bande di ampiezza relativa costante*: è comunemente usata nella fonometria tecnica per l'analisi dei rumori a spettro continuo.

Le bande ad ampiezza relativa costante più utilizzate sono le *bande normalizzate* d'ottava e di terzi d'ottava, in accordo con la norma internazionale UNI EN ISO 266:1998 "Acustica - Frequenze preferibili".

I comuni fonometri sono dotati di *filtri* a banda di ottava e di terzi d'ottava. Un filtro passa-banda è un dispositivo che lascia passare la gamma di frequenze comprese nel suo intervallo caratteristico, mentre esclude quelle al di sotto ed al di sopra di tale intervallo, permettendo in questo modo la scomposizione in frequenza del segnale.

Ogni banda è caratterizzata da una *frequenza centrale*  $f_c$  ed è delimitata dalle *frequenze di taglio superiore e inferiore*  $f_1$  e  $f_2$ . Inoltre è identificata mediante una *frequenza nominale*  $f_n$  che è praticamente coincidente, salvo minimi arrotondamenti, con la frequenza centrale  $f_c$ .

#### 1.12.1 Bande d'ottava

Viene detta banda d'ottava l'intervallo compreso tra due frequenze di taglio  $f_1$  e  $f_2$  tali che:

$$f_2 = 2f_1 \tag{1.29}$$

Ad esempio, nell'acustica musicale l'intervallo di frequenza compreso tra due DO successivi è un'ottava.

La frequenza centrale di banda f<sub>c</sub> risulta pari alla media geometrica delle frequenze di taglio:

$$f_c = \sqrt{f_1 f_2} = f_1 \sqrt{2} = \frac{f_2}{\sqrt{2}}$$
 (1.30)

Ne segue che per ogni ottava è costante il rapporto tra l'ampiezza di banda  $\Delta f = f_2 - f_1$  e la frequenza centrale di banda  $f_c$ :

$$\frac{\Delta f}{f_c} = \frac{f_2 - f_1}{\sqrt{f_1 f_2}} = \frac{2f_1 - f_1}{\sqrt{2f_1^2}} = \frac{f_1}{f_1 \sqrt{2}} = \frac{1}{\sqrt{2}}$$
(1.31)

In base alla norma UNI EN ISO 266:1998 le frequenze centrali sono fissate in base alla seguente relazione:

$$f_{c} = 10^{3n/10} \tag{1.32}$$

con n =  $5 \div 14$ , numero naturale.

Le bande di ottava normalizzate sono identificate mediante le seguenti frequenze nominali: 31.5, 63, 125, 250, 500, 1000, 2000, 4000, 8000, 16000.

L'intero campo di udibilità risulta pertanto suddiviso in 10 bande di ottava, così come rappresentato in Figura 1.17.

Per ottenere una rappresentazione grafica che contragga il dominio della frequenza, sull'asse delle frequenze, si utilizza la scala logaritmica: ciò comporta che le bande appaiano visualizzate con larghezza costante (per questo sono dette bande di ampiezza relativa costante); se fosse stata impiegata una scala lineare, esse sarebbero apparse con larghezza crescente.

38

Parte I - Acustica di base

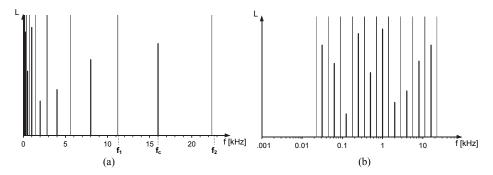


Figura 1.17 - Spettro acustico di un rumore in bande d'ottava: scala lineare (a) e scala logaritmica (b).

#### 1.12.2 Bande di terzi d'ottava

Viene detta banda di terzi d'ottava l'intervallo compreso tra due frequenze di taglio  $f_1$  e  $f_2$  tale che:

$$f_2 = \sqrt[3]{2} f_1 \tag{1.33}$$

La frequenza centrale di banda f<sub>c</sub> risulta pari alla media geometrica delle frequenze di taglio:

$$f_c = \sqrt{f_1 f_2} = f_1^6 \sqrt{2} = \frac{f_2}{6\sqrt{2}}$$
 (1.34)

Ne segue che per ogni terzo d'ottava è costante il rapporto tra l'ampiezza di banda  $\Delta f = f_2 - f_1$  e la frequenza centrale di banda  $f_c$ :

$$\frac{\Delta f}{f_c} = \frac{f_2 - f_1}{\sqrt{f_1 f_2}} = \frac{\sqrt[3]{2} f_1 - f_1}{\sqrt[3]{2} f_1^2} = \frac{f_1(\sqrt[3]{2} - 1)}{f_1 \sqrt[6]{2}} = \frac{1}{3\sqrt{2}}$$
(1.35)

In base alla norma UNI EN ISO 266:1998 le frequenze centrali sono fissate in base alla seguente relazione:

$$f_c = 10^{n/10} (1.36)$$

con n =  $14 \div 43$ , numero naturale.

Le bande di terzi d'ottava normalizzate sono identificate mediante le seguenti frequenze nominali: 25, 31,5,40, 50, 63, 80, 100, 125, 160, 200, 250, 315, 400, 500, 630, 800, 1000, 1250, 1600, 2000, 2500, 3150, 4000, 5000, 6300, 8000, 10000, 12500, 16000, 20000.

L'intero campo di udibilità risulta pertanto suddiviso in 30 bande di terzi d'ottava. Ciascuna banda d'ottava risulta così suddivisa in tre bande di terzi d'ottava.

In Tabella 1.5 sono riportate per le bande normalizzate d'ottava (in grassetto) e di terzi d'ottava, ciascuna identificata mediante la sua frequenza nominale  $(f_n)$ , le frequenze centrali  $(f_c)$  e di taglio  $(f_1$  e  $f_2)$ .

Tabella 1.5 - Bande normalizzate d'ottava (in grassetto) e di terzi d'ottava.

$\mathbf{f_n}$	$\mathbf{f}_{\mathrm{c}}$	$\mathbf{f}_1$	$\mathbf{f}_2$
[Hz]	[Hz]	[Hz]	[Hz]
25	25.119	22.387	28.184
31.5	31.623	28.184	35.481
40	39.811	35.481	44.668
50	50.119	44.668	56.234
63	63.096	56.234	70.795
80	79.433	70.795	89.125
100	100.00	89.125	112.20
125	125.89	112.20	141.25
160	158.49	141.25	177.83
200	199.53	177.83	223.87
250	251.19	223.87	281.84
315	316.23	281.84	354.81
400	398.11	354.81	446.68
500	501.19	446.68	562.34
630	630.96	562.34	707.95
800	794.33	707.95	891.25
1000	1000.0	891.25	1122.0
1250	1258.9	1122.0	1412.5
1600	1584.9	1412.5	1778.3
2000	1995.3	1778.3	2238.7
2500	2511.9	2238.7	2818.4
3150	3162.3	2818.4	3548.1
4000	3981.1	3548.1	4466.8
5000	5011.9	4466.8	5623.4
6300	6309.6	5623.4	7079.5
8000	7943.3	7079.5	8912.5
10000	10000	8912.5	11220
12500	12589	11220	14125
16000	15849	14125	17783
20000	19953	17783	22387

Noti i livelli sonori per banda di terzi d'ottava  $L_{p1}$ ,  $L_{p2}$ ,  $L_{p3}$ , è possibile risalire al livello sonoro  $L_{p,oct}$  della corrispondente banda d'ottava applicando la seguente relazione:

$$L_{p,oct} = 10\log\left(10^{L_{p1}/10} + 10^{L_{p2}/10} + 10^{L_{p3}/10}\right)$$
 (1.37)

Ovviamente non è possibile l'operazione inversa, ossia, noto il livello sonoro in una banda d'ottava, risalire alla distribuzione nelle tre bande di terzi d'ottava che la compongono.

In generale, nota la distribuzione dei livelli di pressione sonora in un determinato intervallo di frequenza  $L_{pi}$ , è possibile risalire al livello di pressione sonora globale  $L_{p,tot}$  nello stesso intervallo:

$$L_{p,tot} = 10\log\left(\sum_{i=1}^{N} 10^{\frac{L_{pi}}{10}}\right)$$
 (1.38)

essendo N il numero di bande in cui è suddiviso l'intervallo di frequenza in analisi.

### 1.13 Rumore bianco e rumore rosa

Si definisce *bianco* un rumore caratterizzato da un livello spettrale indipendente dalla frequenza, ovvero tutte le frequenze della banda udibile vengono emesse con la stessa intensità (Figura 1.18a). Si definisce *rosa* un rumore caratterizzato da un livello spettrale decrescente di 3 dB per ottava (Figura 1.18b).

Quando si parla di livello spettrale  $L_s$  ci si riferisce ad una banda stretta di ampiezza costante pari  $\Delta f = 1$  Hz.

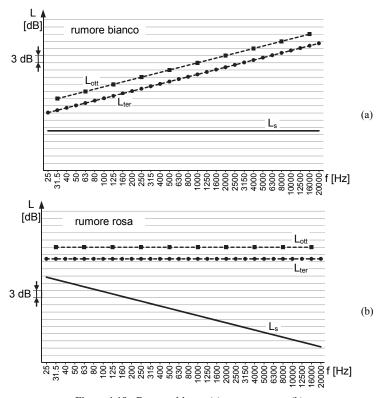


Figura 1.18 - Rumore bianco (a) e rumore rosa (b).

Se l'ampiezza di banda  $\Delta f$  è differente da 1 Hz, il livello sonoro che compete alla frequenza centrale che identifica la banda, detto *livello di banda*  $L_b$ , è legato al livello spettrale mediante la seguente relazione:

$$L_b = L_s + 10 \log \Delta f \tag{1.39}$$

Ne segue che:

- nel caso di rumore bianco il livello di banda è crescente di 3 dB per ogni banda d'ottava e di 1 dB per ogni banda di terzi d'ottava,
- nel caso di rumore rosa il livello di banda è costante sia per banda d'ottava che di terzi d'ottava.

Il rumore rosa è nettamente più utilizzato del rumore bianco in acustica edilizia per la sua capacità di enfatizzare le basse frequenze, alle quali è legata la maggior parte dei problemi acustici delle strutture.

### 1.14 Esercizi

#### Esercizio 1

In un punto, sede di propagazione di un'onda piana progressiva, si rileva un livello sonoro pari a 74 dB. Supponendo che le condizioni di temperatura e pressione siano quelle standard, ovvero 20 °C e 1 atm, calcolare in tale punto:

- la pressione efficace,
- l'ampiezza massima dell'oscillazione di pressione,
- · l'intensità sonora,
- la densità sonora.

Soluzione

$$L_p = 74 \text{ dB}$$
  
 $T = 20 \text{ }^{\circ}\text{C} = 293.15 \text{ K}$   
 $p_{atm} = 1 \text{ atm} = 101325 \text{ Pa}$ 

Dalla definizione di livello di pressione sonora (1.20), si ottiene:

$$\begin{split} L_p &= 20 log \frac{p}{p_{rif}} \qquad p_{rif} = 2 \cdot 10^{-5} \; Pa \\ 10^{L_p/20} &= \frac{p}{p_{rif}} \\ p &= p_{rif} 10^{L_p/20} = 2 \cdot 10^{-5} \cdot 10^{74/20} = 0.10 \; Pa \end{split}$$

Il legame tra la pressione efficace e l'ampiezza massima dell'oscillazione di pressione è dato dalla (1.12), per cui si ottiene:

$$p = \frac{p_{max}}{\sqrt{2}}$$

$$p_{max} = p\sqrt{2} = 0.10\sqrt{2} = 0.14 \text{ Pa}$$

Ipotizzando l'aria un gas perfetto ( $R_1 = 287 \text{ J/kgK}$ , k = 1.405), la velocità del suono e la densità valgono:

$$c = \sqrt{kR_1T} = \sqrt{1.405 \cdot 287 \cdot 293.15} = 344 \ \frac{m}{s}$$

$$\rho = \frac{p_{\text{atm}}}{R_1 T} = \frac{101325}{287 \cdot 293.15} = 1.20 \ \frac{kg}{m^3}$$

L'intensità sonora risulta dalla (1.15):

$$I = \frac{p^2}{\rho c} = \frac{0.10^2}{1.20 \cdot 344} = 2.4 \cdot 10^{-5} \frac{W}{m^2}$$

La densità sonora risulta dalla (1.16):

$$D = \frac{p^2}{\rho c^2} = \frac{0.10^2}{1.20 \cdot 344^2} = 7.0 \cdot 10^{-8} \ \frac{J}{m^3}$$

### Esercizio 2

Quale delle seguenti espressioni rappresenta in modo corretto la somma di due livelli di pressione sonora?

$$0 dB + 0 dB = 0 dB$$

$$0 dB + 0 dB = 2 dB$$

$$0 dB + 0 dB = 3 dB$$

Soluzione

$$L_{p1} = 0 dB$$

$$L_{p2} = 0 dB$$

La risposta corretta è la (c). Infatti, applicando la (1.24) si ottiene:

$$L_p = 10\log(10^{L_{p1}/10} + 10^{L_{p2}/10}) = 10\log(10^{0/10} + 10^{0/10}) = 10\log 2 = 3 \text{ dB}$$

Allo stesso risultato si perviene anche applicando la Tabella 1.4, relativa alla modalità di somma di due livelli di pressione sonora. Se i due livelli da sommare sono uguali, il livello complessivo si ottiene incrementando il livello di 3 dB.

Nulla di strano nel risultato: la somma di due rumori di soglia (0 dB corrisponde a  $p_{rif} = 2.10^{-5}$  Pa) fornisce un rumore sopra la soglia di udibilità.

## Esercizio 3

Due sorgenti sonore operano contemporaneamente. Misurando in un punto il livello di pressione sonora, si rileva che una produce da sola un livello sonoro pari a 83 dB, mentre l'altra un livello sonoro pari a 72 dB. Determinare il livello di pressione sonora quando le due sorgenti funzionano contemporaneamente.

Soluzione

$$L_{p1} = 83 \text{ dB}$$

$$L_{p2} = 72 \text{ dB}$$

Applicando la (1.24), si ottiene:

$$L_p = 10\log(10^{L_{p1}/10} + 10^{L_{p2}/10}) = 10\log(10^{83/10} + 10^{72/10}) = 83.3 \text{ dB}$$

Allo stesso risultato si perviene anche applicando la Tabella 1.4, relativa alla modalità di somma di due livelli di pressione sonora. Se i due livelli differiscono di più di 10 dB, il livello complessivo è pari al livello più elevato ed il contributo del livello inferiore è trascurabile.

### Esercizio 4

Durante la misura del rumore prodotto da una sorgente disturbante, in una stanza si rileva un livello sonoro pari a 65 dB. In assenza della sorgente disturbante si rileva un rumore residuo pari a 58 dB. Determinare il livello del rumore immesso nella stanza dalla sorgente disturbante.

### Soluzione

$$L_{p1} = 65 \text{ dB}$$
  
 $L_{p2} = 58 \text{ dB}$ 

Applicando la (1.26), si ottiene:

$$L_p = 10\log(10^{L_{p1}/10} - 10^{L_{p2}/10}) = 10\log(10^{65/10} - 10^{58/10}) = 64.0 \text{ dB}$$

Allo stesso risultato si perviene anche applicando la Tabella 1.4, relativa alla modalità di somma di due livelli di pressione sonora. Se i due livelli differiscono di 7 dB, si applica una correzione al livello maggiore di 1 dB:

$$L_p = L_{p1} - 1 = 65 - 1 = 64 \text{ dB}$$

### Esercizio 5

Un rumore presenta il seguente spettro in banda di terzi d'ottava tra le frequenze di 100 Hz e 2500 Hz:

f [Hz]	100	125	160	200	250	315	400	500	630	800	1000	1250	1600	2000	2500
Lp [dB]	62.1	63.2	63.5	66.2	68.5	70.0	71.7	73.1	73.8	73.5	73.8	73.3	73.1	73.0	72.4

Determinare il corrispondente spettro in banda d'ottava ed il livello complessivo nell'intervallo di frequenza considerato.

### Soluzione

Nell'intervallo di frequenza considerato sono presenti 5 bande d'ottava, ciascuna corrispondente a tre bande di terzi d'ottava:

Terzi d'ottava	100	125	160	200	250	315	400	500	630	800	1000	1250	1600	2000	2500
Ottava	125		250		500		1000				2000				

Applicando la (1.37), si ottiene:

$$\begin{split} &L_{p,125} = 10 log \Big(10^{62.1/10} + 10^{63.2/10} + 10^{63.5/10}\Big) = 67.7 \text{ dB} \\ &L_{p,250} = 10 log \Big(10^{66.2/10} + 10^{68.5/10} + 10^{70.0/10}\Big) = 73.3 \text{ dB} \\ &L_{p,500} = 10 log \Big(10^{71.7/10} + 10^{73.1/10} + 10^{73.8/10}\Big) = 77.7 \text{ dB} \\ &L_{p,1000} = 10 log \Big(10^{73.5/10} + 10^{73.8/10} + 10^{73.3/10}\Big) = 78.3 \text{ dB} \\ &L_{p,2000} = 10 log \Big(10^{73.1/10} + 10^{73.0/10} + 10^{72.4/10}\Big) = 77.6 \text{ dB} \end{split}$$

4 |

Parte I - Acustica di base

Lo spettro in banda d'ottava risulta quindi:

f [Hz]	125	250	500	1000	2000
L <sub>p</sub> [dB]	67.7	73.3	77.7	78.3	77.6

Il livello complessivo nell'intervallo di frequenza considerato si ottiene dalla (1.38):

$$\begin{split} L_{p,tot} &= 10 log \Biggl( \sum_{i=1}^{5} 10^{\frac{L_{pi}}{10}} \Biggr) = 10 log \Bigl( 10^{67.7/10} + 10^{73.3/10} + 10^{77.7/10} + 10^{78.3/10} + 10^{77.6/10} \Bigr) = \\ &= 83.2 \ dB \end{split}$$

# Capitolo 2

# ACUSTICA FISIOLOGICA E FONOMETRIA

### 2.1 L'orecchio umano

La percezione del suono, analogamente a quanto avviene per la luce, coinvolge sia aspetti fisici che psicofisici, dipendenti dalla fisiologia dell'orecchio.

L'*orecchio* svolge la funzione di trasduttore trasformando la variazione di pressione in impulsi che vengono inviati al cervello. Esso è costituito di tre parti, così come rappresentato in Figura 2.1.

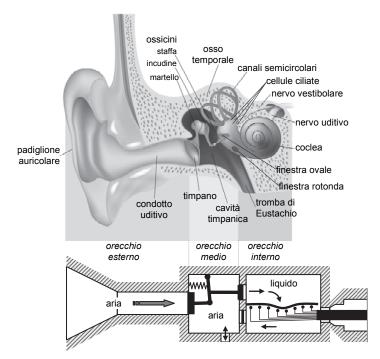


Figura 2.1 - Schema dell'orecchio umano e analogia meccanica.

L'orecchio esterno, costituito dal padiglione auricolare e dal condotto uditivo, ha il compito di captare le onde sonore, di amplificarle per risonanza grazie alla sua forma a tromba e di convogliarle alla membrana timpanica.

L'orecchio medio, costituito dal timpano e dagli ossicini (martello, incudine, staffa), ha il compito di trasmettere le vibrazioni indotte sul timpano alla membrana della finestra ovale. Gli ossicini fungono da catena di trasmissione meccanica, trasformando i grandi spostamenti del timpano in piccoli spostamenti della finestra ovale senza che venga persa energia. La tromba di Eustachio, canale che mette in comunicazione la cavità timpanica dell'orecchio medio con la faringe, bilancia la pressione tra le facce interna ed esterna della membrana timpanica.

L'orecchio interno, costituito dalla membrana della finestra ovale e dalla coclea, ha il compito di trasformare in percezione le vibrazioni trasmesse dalla catena di ossicini. I canali semicircolari sono responsabili dell'equilibrio. La coclea è un tubo a spirale pieno di liquido (endolinfa) al cui interno si trovano cellule ciliate, poste sulla membrana basale e sensibili alle variazioni di pressione. Quando la finestra ovale vibra, il liquido trasmette le vibrazioni alle cellule cigliate che, a loro volta, attraverso il nervo uditivo trasmettono al cervello lo stimolo nervoso. La percezione della frequenza (altezza) di un suono è legata al fatto che frequenze diverse eccitano differenti porzioni di cellule cigliate. La prima porzione della membrana basale è sensibile alle frequenze più elevate, mentre l'ultima alle basse frequenze.

# 2.2 Audiogramma normale

La risposta dell'orecchio umano ad uno stimolo sonoro è un fenomeno soggettivo dipendente da diversi fattori, in particolare dalla salute e dall'età. Ad esempio, il valore della massima frequenza udibile si riduce all'aumentare dell'età (presbiacusia), per cui una persona anziana spesso non sente i suoni ad alta frequenza, come ad esempio quelli emessi da apparecchiature elettroniche quali telefoni, sveglie, ecc.

In generale la *sensazione sonora* provocata da un suono dipende dal livello di pressione sonora, ovvero dall'intensità del suono, e dalla composizione in frequenza, ovvero dalla sua altezza.

Operando sperimentalmente su un numero elevato di soggetti sani, sono state ricavate le *curve isofoniche*, rappresentative dell'uguale sensazione sonora al variare della frequenza. L'insieme di tali curve costituisce l'*audiogramma normale*. In tal modo è possibile far corrispondere a dei parametri oggettivi, quali il livello di pressione sonora e la frequenza, una misura soggettiva della sensazione sonora.

Le prime curve isofoniche sono state determinate da Fletcher e Munson (1937) con un procedimento di ascolto binaurale alternato in cuffia: ad un soggetto venivano fatti ascoltare alternativamente un tono puro di frequenza 1000 Hz (tono di riferimento) con livello di pressione sonora prefissato ed un tono puro a frequenza diversa. L'ascoltatore regolava l'intensità del secondo suono fino a quando non giudicava equivalenti tra loro le sensazioni provate. Ripetendo il confronto a frequenze diverse ed interpolando i risultati, veniva costruita una curva di "isosensazione", detta appunto curva isofonica.

L'unità di misura del livello di sensazione sonora è il *phon* e coincide con il livello fisico di pressione sonora a 1000 Hz che provoca la stessa sensazione del suono in esame. Ad esempio, se il suono di riferimento è caratterizzato da un livello fisico di pressione sonora pari a 20 dB a 1000 Hz, i livelli di pressione sonora dei suoni puri che alle diverse frequenze producono la stessa sensazione sonora (20 phon) individuano l'isofonica 20 phon.

46

Ripetendo l'esperienza per i differenti livelli di pressione sonora compresi tra la soglia di udibilità e la soglia del dolore, sono state costruite le curve isofoniche dell'audiogramma normale, che descrive un comportamento medio dell'orecchio umano. In Figura 2.2 sono riportate le curve isofoniche adottate dalla normativa attuale, in base alla norma UNI ISO 226:2007 "Acustica - Curve normalizzate di egual livello di sensazione sonora", che costituisce l'ultimo aggiornamento dell'audiogramma normale sulla base dei risultati di recenti studi sperimentali compiuti su un numero significativo di persone otologicamente normali di età compresa tra 18 e 25 anni. Tali curve sono state ottenute nelle seguenti condizioni: il campo sonoro, in assenza di soggetto ricevente, consiste in un'onda piana libera progressiva; la sorgente sonora è posta di fronte al soggetto ricevente e i segnali sonori sono dei *toni puri*; il livello di pressione sonora è misurato nella posizione del centro della testa dell'ascoltatore in assenza del soggetto stesso; l'ascolto è binaurale.

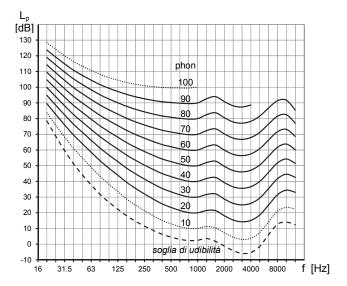


Figura 2.2 - Audiogramma normale secondo UNI ISO 226.

Le isofoniche sono graficamente abbastanza simili tra loro, ma non sono sovrapponibili; la loro forma mostra la non linearità che caratterizza l'udito umano. Le curve a puntini esprimono l'incertezza presente sulle prove sperimentali oltre i 100 phon e nel campo tra l'isofonica a 20 phon e la *soglia di udibilità*, ovvero il livello a cui un ascoltatore, in precise condizioni di prova, percepisce correttamente il 50% degli stimoli sonori.

La soglia del dolore, ovvero il massimo livello di pressione sonora che l'orecchio umano può sopportare, è indipendente dalla frequenza e si colloca tra 130 e 140 dB; il limite superiore di udibilità, anch'esso indipendente dalla frequenza, può essere stabilito in corrispondenza della soglia del fastidio intorno ai 120 dB.

Dall'esame dell'audiogramma normale si possono effettuare le seguenti considerazioni.

La sensazione sonora risulta minore alle basse frequenze, mentre è più elevata alle medie ed alte frequenze. In particolare si osserva un massimo di udibilità in corrispondenza della banda a 3150 Hz, frequenza prossima a quella tipica del parlato.

Ad esempio un suono puro di circa 60 dB alla frequenza di 125 Hz produce la stessa sensazione sonora di un suono puro di 40 dB alla frequenza di 1000 Hz. Alla frequenza di 3150 Hz sono sufficienti meno di 36 dB per provocare la stessa sensazione sonora. I tre punti sono collocati sull'isofonica a 40 phon.

Le isofoniche più basse presentano variazioni accentuate del livello sonoro con la frequenza, mentre le isofoniche superiori presentano un appiattimento sempre più marcato: ai bassi livelli di pressione sonora la sensazione sonora dipende in modo significativo dalla frequenza, mentre tale dipendenza è meno accentuata alle alte intensità.

A tale comportamento dell'orecchio umano è legato il fenomeno della *distorsione acustica*, che si verifica quando i rapporti tra le intensità sonore delle singole armoniche componenti un *suono complesso* vengono alterati. Si consideri ad esempio il caso di un suono caratterizzato da uno spettro acustico costante al variare della frequenza: una riduzione del livello sonoro del suono produce sull'ascoltatore un'alterazione della sensazione sonora, con un prevalere delle alte frequenze sulle basse.

In Figura 2.3 è riportato il caso in cui un suono a spettro costante passa da un livello di 90 dB ad un livello di 70 dB: a causa dell'aumento della pendenza delle curve isofoniche verso il basso, la sensazione prodotta dalla componente a più bassa frequenza diminuisce di più (da 60 a 30 phon) rispetto a quella della componente a più alta frequenza (da 90 a 70 phon).

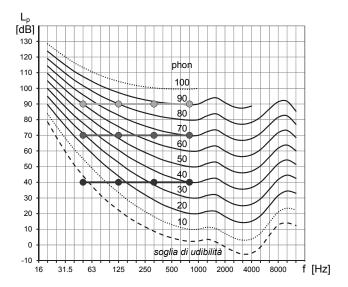


Figura 2.3 - Distorsione acustica.

Tale fenomeno è tanto più evidente quanto maggiore è la riduzione del livello sonoro. Se l'attenuazione è molto forte, alcune frequenze possono addirittura scomparire come effetto soggettivo poiché la loro intensità scende sotto la soglia di udibilità: è il caso di Figura 2.3 quando il suono viene portato ad un livello di 40 dB.

È per questo motivo che gli apparecchi per la riproduzione della musica e gli impianti di amplificazione, per i quali la potenza sonora può essere regolata dall'ascoltatore, prevedono la compensazione della distorsione acustica dovuta alla variazione di volume (equalizzazione).

# 2.3 Curve di ponderazione

Servendosi dell'audiogramma normale, si può attribuire un livello di sensazione sonora ad un tono puro. Nella realtà si ha sempre a che fare con suoni complessi e rumori.

Al fine di valutare la sensazione sonora derivante da un suono complesso o da un rumore si utilizza uno strumento di misura della pressione sonora, detto *fonometro*, che è in grado di ricostruire la risposta in frequenza dell'orecchio umano. La pressione sonora, rilevata tramite un microfono, viene trasformata in un segnale elettrico che subisce un'opportuna *pesatura* in base all'andamento delle curve isofoniche dell'audiogramma normale, per tenere conto della differente sensibilità dell'orecchio alle diverse frequenze.

Per le frequenze ove la sensibilità dell'orecchio è maggiore, i valori misurati saranno assoggettati ad una correzione positiva (l'importanza dei relativi contributi viene rafforzata), mentre per le frequenze ove la sensibilità dell'orecchio umano risulta minore la correzione è negativa (l'importanza dei relativi contributi viene indebolita). La pesatura è attuata nell'elettronica dello strumento mediante particolari filtri.

Inizialmente erano state normalizzate tre modalità diverse di pesatura, indicate con A, B e C ed ispirate rispettivamente alle curve isofoniche di 40, 70 e 100 phon dell'audiogramma normale. A seconda del livello sonoro da rilevare si doveva impiegare un filtro acustico diverso: la scala di ponderazione A per suoni a bassa intensità, la B per suoni di media intensità, la C per i suoni ad alta intensità. È stato anche introdotto il filtro D per il rumore aeroportuale. Le diverse *curve di pesatura* sono rappresentate in Figura 2.4.

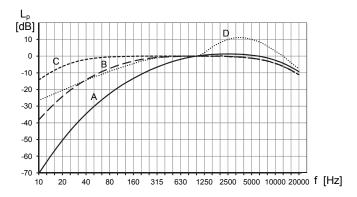


Figura 2.4 - Curve di ponderazione normalizzate.

Allo stato attuale nella pratica si utilizza quasi sempre la *scala A*, in quanto tale curva di ponderazione è risultata quella in media meglio correlata con la risposta soggettiva umana a rumori generici a banda larga. Il fonometro rileva il valore efficace della pressione sonora che viene tradotto in un corrispondente segnale elettrico e quindi pesato con il filtro di ponderazione indicato con la lettera A, ispirato alla curva isofonica di 40 phon dell'audiogramma normale. Si ricava così il *livello sonoro ponderato A*, espresso in dB(A).

Si può quindi operare la seguente importantissima distinzione: in dB si misura il livello sonoro del fenomeno fisico, in dB(A) si misura come un determinato rumore viene percepito e quindi il disturbo provocato; in generale maggiore è il valore del livello in dB(A), maggiore è il disturbo arrecato dal rumore.

In Figura 2.5 è riportata la modalità con cui viene ottenuta la curva di ponderazione A a partire dall'isofonica 40 phon: l'isofonica 40 phon viene normalizzata a 0 dB, quindi viene capovolta ed infine approssimata con una curva più semplice.

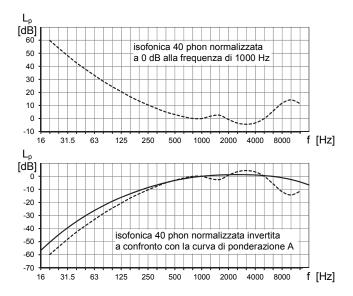


Figura 2.5 - Legame tra l'isofonica 40 phon e la curva di ponderazione A.

In Tabella 2.1 sono riportati i valori assunti dalla curve di ponderazione A e C per le frequenze nominali di centro banda delle bande di ottava e di terzi di ottava. Si osserva come l'uso della curva A comporti una significativa sottovalutazione del contenuto energetico di un rumore alle basse frequenze. Tra 1000 Hz e 5000 Hz vi è una lieve sopravalutazione, mentre a partire da 6300 Hz una sottovalutazione via via progressiva con la frequenza.

La scala C viene utilizzata per la misura del valore di picco di suoni impulsivi forti e brevi (fabbriche, esplosioni). È utilizzata per la determinazione dell'esposizione dei lavoratori al rischio del rumore in quanto, a causa degli elevati livelli di pressione sonora, l'uso esclusivo della curva di ponderazione A porterebbe ad una sottostima degli effetti delle basse frequenze.

Le scale B e D sono considerate obsolete ed i moderni fonometri non le rendono nemmeno più disponibili.

I normali fonometri consentono ovviamente anche la rilevazione del livello di pressione acustica non ponderato: la sigla comunemente utilizzata è dB(lin) o dB(L) (decibel lineari). In tal caso si parla anche di *scala* Z.

Tabella 2.1 - Curve di ponderazione A e C per le bande normalizzate d'ottava (in grassetto) e di terzi d'ottava.

f <sub>n</sub>	correzione	correzione
Hz]	curva A	curva C
[IIZ]	[dB]	[dB]
10	-70.4	-14.3
12.5	-63.4	-11.2
16	-56.7	-8.5
20	-50.5	-6.2
25	-44.7	-4.4
31.5	-39.4	-3.0
40	-34.6	-2.0
50	-30.2	-1.3
63	-26.2	-0.8
80	-22.5	-0.5
100	-19.1	-0.3
125	-16.1	-0.2
160	-13.4	-0.1
200	-10.9	0
250	-8.6	0
315	-6.6	0
400	-4.8	0

f <sub>n</sub>	correzione	correzione			
Hz]	curva A	curva C			
[IIZ]	[dB]	[dB]			
500	-3.2	0			
630	-1.9	0			
800	-0.8	0			
1000	0	0			
1250	+0.6	0			
1600	+1.0	-0.1			
2000	+1.2	0.2			
2500	+1.3	-0.3			
3150	+1.2	-0.5			
4000	+1.0	-0.8			
5000	+0.5	-1.3			
6300	-0.1	-2.0			
8000	-1.1	-3.0			
10000	-2.5	-4.4			
12500	-4.3	-6.2			
16000	-6.6	-8.5			
20000	-9.3	-11.2			

### Esempio

Si vuole calcolare il livello di pressione sonora complessivo in dB e in dB(A) del seguente rumore, di cui è noto lo spettro in banda d'ottava.

f [Hz]	31.5	63	125	250	500	1000	2000	4000	8000	16000
L <sub>p</sub> [dB]	72	78	79	66	64	62	46	47	48	36

### Soluzione

Il livello di pressione sonora complessivo in dB vale dalla (1.38):

$$\begin{split} L_{p,tot} &= 10 log \Biggl( \sum_{i} 10^{\frac{L_{p,i}}{10}} \Biggr) = \\ &= 10 log \Biggl( 10^{72/10} + 10^{78/10} + 10^{79/10} + 10^{66/10} + 10^{64/10} + \\ &+ 10^{62/10} + 10^{46/10} + 10^{47/10} + 10^{48/10} + 10^{36/10} \Biggr) = 82.2 \ dB \end{split}$$

Per determinare il livello sonoro ponderato A, ai valori del livello di pressione sonora in dB bisogna sommare algebricamente i corrispettivi fattori di ponderazione, riportati in Tabella 2.1.

Parte I - Acustica di base

f [Hz]	31.5	63	125	250	500	1000	2000	4000	8000	16000
L <sub>p</sub> [dB]	72	78	79	66	64	62	46	47	48	36
Correzione filtro A	-39.4	-26.2	-16.1	-8.6	-3.2	0	+1.2	+1.0	-1.1	-6.6
$L_{p,A} [dB(A)]$	32.6	51.8	62.9	57.4	60.8	62	47.2	48	46.9	29.4

Il livello di pressione sonora complessivo ponderato A è la somma logaritmica dei livelli in dB(A) relativi ad ogni banda:

$$\begin{split} L_{p,A,tot} &= 10 \, log \Biggl( \sum_{i} 10^{\frac{L_{p,A,i}}{10}} \Biggr) = \\ &= 10 \, log \Biggl( \frac{10^{32.6/10} + 10^{51.8/10} + 10^{62.9/10} + 10^{57.4/10} + 10^{60.8/10}}{10^{62/10} + 10^{62/10} + 10^{47.2/10} + 10^{48/10} + 10^{46.9/10} + 10^{29.4/10}} \Biggr) = 67.5 \ dB(A) \end{split}$$

Si noti come in questo esempio il livello sonoro complessivo in dB(A) sia significativamente inferiore a quello in dB, poiché con la curva di ponderazione A le basse frequenze vengono penalizzate in modo significativo.

# 2.4 Costanti di tempo

La pressione sonora è generalmente caratterizzata da rapide fluttuazioni temporali e i moderni strumenti dotati di convertitore analogico-digitale sono in grado di campionare il segnale con frequenze molto elevate: ad esempio la frequenza di campionamento del formato CD è pari a 44.1 kHz, il fonometro 2260 della Brüel & Kjær ha una frequenza di campionamento di 48 kHz e le schede audio dei PC di ultima generazione superano i 96 kHz. L'acquisizione di segnali con tali frequenze richiede ovviamente oltre che opportuni spazi di memoria anche strumenti di calcolo adeguati per la loro elaborazione. Il calcolo della pressione efficace (espressa dalla 1.11) non presenta pertanto problemi con i moderni strumenti, mentre più complessa era la sua determinazione quando si disponeva solo di strumenti di tipo analogico: per permettere la memorizzazione dei dati si utilizzavano dei circuiti mediatori RC (resistenza + condensatore), nei quali il condensatore C funge da smorzatore delle oscillazioni. Il prodotto RC (resistenza misurata in Ohm e capacità misurata in Farad) rappresenta la *costante di tempo*  $\tau_0$  (espressa in secondi) caratteristica del circuito.

Il livello di pressione sonora relativo al segnale uscente da tale circuito risulta essere:

$$L_{p,RC}(\tau) = 10 \log \frac{p^{2}(\tau)}{p_{rif}^{2}} = 10 \log \frac{\frac{1}{\tau_{0}} \int_{-\infty}^{\tau} e^{-\frac{\tau - t}{\tau_{0}}} p^{2}(t) dt}{p_{rif}^{2}}$$
(2.1)

dove il termine:

$$e^{-\frac{\tau - t}{\tau_0}} = W(\tau) \tag{2.2}$$

rappresenta il peso (weight) su cui viene mediato il segnale di pressione.