

Giuseppe Luvrano, Biagio Vurro

L'inquinamento acustico

**Regole e procedure per la gestione del rumore
Manuale operativo per tecnici competenti,
funzionari e giuristi**

*Nel Cd Rom allegato la legislazione essenziale, le massime giurisprudenziali,
la modulistica direttamente utilizzabile, estratti di perizie di CTU e fogli
di calcolo utili ai primi approcci valutativi (rumore da traffico, decadimento
del rumore, verifica dei limiti ecc.)*

*A Simona, Federica, Roberta, Sofia, Matilde e Giacomo.
Il loro "silenzio" e pazienza hanno contribuito
alla realizzazione di questo libro.*

INDICE GENERALE

Struttura del testo	11
Introduzione	13

CAPITOLO 1

PRINCIPI FISICI E DEFINIZIONI

1.1	Il suono	15
1.2	Parametri fisici	17
1.3	Propagazione del suono.....	23
1.4	Percezione uditiva	37
1.5	Il rumore e i suoi effetti	39
1.6	La valutazione strumentale	43

CAPITOLO 2

LA LEGISLAZIONE

2.1	Lo svolgimento normativo	55
2.2	Considerazioni sulla normativa statale	60
2.3	Classificazione e pianificazione acustica del territorio	67

CAPITOLO 3**PROCEDURE E PROBLEMATICHE
NEL CONTROLLO****DELL'INQUINAMENTO ACUSTICO75**

3.1	Premessa	75
3.2	L'attività di controllo	77
3.3	L'attività preventiva del Comune	78
3.4	La richiesta di intervento all'ARPA	80
3.5	L'eventuale sopralluogo preliminare dell'ARPA.....	83
3.6	I rilievi tecnici	84
3.6.1	<i>L'intervento "a sorpresa"</i>	85
3.6.2	<i>Prospettive tecnico-giuridiche delle modalità di misura</i>	87
3.6.3	<i>L'incertezza di misura</i>	94
3.6.4	<i>Gli impianti a ciclo continuo</i>	97
3.7	Il rapporto di indagine dell'ARPA	100
3.8	Le sanzioni	100
3.9	I problemi di coordinamento tra le norme	103
3.9.1	<i>L'attività di polizia giudiziaria e i provvedimenti del giudice penale</i>	112
3.10	I provvedimenti del Comune.....	114
3.10.1	<i>Le novità introdotte dal "pacchetto sicurezza"</i>	122
3.11	La bonifica acustica	124
3.12	Il tecnico competente in acustica	129
3.13	La verifica delle prescrizioni	132
3.14	La valutazione dell'impatto acustico	133
3.15	La previsione del clima acustico.....	136
3.15.1	<i>Le norme tecniche</i>	138
3.16	I piani di risanamento acustico	142

CAPITOLO 4**GESTIONE DELLE PROBLEMATICHE**

SPECIFICHE	149
4.1 Il traffico stradale.....	149
4.2 Le sorgenti affini al rumore stradale	160
4.2.1 <i>Parcheggi</i>	160
4.2.2 <i>Distributori di carburante</i>	160
4.2.3 <i>Servizio di raccolta rifiuti</i>	160
4.2.4 <i>Sistemi di allarme antifurto e segnalazioni acustiche dei veicoli</i>	161
4.3 Il traffico ferroviario	163
4.4 Il traffico aeroportuale	167
4.5 Il contenimento del rumore nelle infrastrutture di trasporto.....	171
4.6 Le attività motoristiche	175
4.7 Il rumore nelle abitazioni	176
4.7.1 <i>Normativa tecnica per collaudi e calcoli previsionali acustici in edilizia</i>	196
4.8 Le forme civilistiche di tutela dal rumore	198
4.8.1 <i>Il dilemma "tollerabilità/accettabilità"</i>	209
4.9 Musica e rumore	216
4.9.1 <i>L'impatto acustico della musica diffusa</i>	225
4.10 Attività temporanee e dispositivi funzionanti all'aperto	227
4.11 Le manifestazioni di culto	230
4.12 Il disturbo acustico prodotto dagli animali	233
4.13 Caccia e altre attività con armi da sparo	234

CAPITOLO 5

LA GESTIONE COMUNITARIA

DEL RUMORE AMBIENTALE 239

5.1	Generalità e obiettivi	239
5.2	Lo studio delle criticità acustiche.....	240
5.3	Il recepimento della direttiva: l'impatto nazionale	242
5.4	Gli interventi: piani di azione e piani di risanamento	250
5.4.1	<i>Il rapporto tra piani d'azione e piani di risanamento</i>	253
5.5	Sanzioni e informazione	255
5.6	Il piano di monitoraggio ambientale	256

CAPITOLO 6

IL RUMORE NEI LUOGHI DI LAVORO

(GENERALITÀ) 261

CAPITOLO 7

LE VIBRAZIONI

(CENNI) 269

APPENDICE 1

LEGISLAZIONE ESSENZIALE..... 275

■	Decreto del Presidente del Consiglio dei Ministri 1 marzo 1991	276
■	Legge 26 Ottobre 1995, n. 447	284
■	Decreto del Presidente del Consiglio dei Ministri 14 novembre 1997.....	298

■ Decreto ministeriale 16 marzo 1998	304
■ Decreto Legislativo 19 agosto 2005, n.194	313
■ TOSCANA - Legge Regionale n. 89 del 1/12/1998.....	329
■ EMILIA ROMAGNA - Legge Regionale 9 maggio 2001, n. 15.....	339
■ LOMBARDIA - Legge Regionale 10 agosto 2001, n. 13	347

APPENDICE 2

GIURISPRUDENZA..... 359

■ Massime penali	359
■ Massime civili.....	366
■ Massime amministrative.....	370

APPENDICE 3

MODULISTICA

E SISTEMI OPERATIVI..... 381

■ Esposto al Comune per presunto inquinamento acustico.....	382
■ Relazione A.R.P.A.....	384
■ Notizia di reato	386
■ Ordinanza comunale.....	388
■ Irrogazione sanzione amministrativa	390
■ Valutazione previsionale di impatto acustico	392
■ Valutazione previsionale di impatto acustico	395
■ Valutazione previsionale di impatto acustico	399
■ Richiesta di autorizzazione in deroga ai limiti di rumorosità per manifestazioni temporanee	403

■	Richiesta di autorizzazione in deroga ai limiti di rumorosità per cantieri	406
■	Tracce per una Consulenza Tecnica d'Ufficio	409
■	Tracce per una Valutazione previsionale di impatto acustico	429
■	Misura in opera dei requisiti acustici passivi	435
■	Valutazione dei requisiti acustici passivi: Casi pratici.....	443
	Una nota conclusiva	459
	Bibliografia	460
	Come utilizzare il CD Rom allegato	463

STRUTTURA DEL TESTO

La normativa in tema di inquinamento acustico coinvolge gli enti locali e soprattutto il Comune, chiamandoli a svolgere un ruolo di primissimo piano. Questo è il presupposto di base del presente manuale il quale, piuttosto che illustrare puntualmente la legislazione, intende innanzitutto fornire un quadro schematico, ma al contempo esauriente, dei sistemi per il controllo dell'inquinamento acustico, finalizzato a costituire un documento pratico di supporto per tecnici competenti in acustica, giuristi e operatori pubblici che a diverso titolo sono chiamati a cimentarsi con le norme e le procedure per la gestione della problematica "rumore".

Peraltro, grazie alla divulgativa esposizione, il manuale è destinato ad essere utilizzato anche dal cittadino, primo soggetto coinvolto soprattutto dagli effetti del rumore.

Considerato che i procedimenti in tema di inquinamento acustico possono interessare diversi ambiti disciplinari, oltre che diverse amministrazioni, nella trattazione degli argomenti si è cercato di assimilare e integrare in un unico tema espositivo i diversi approcci che caratterizzano la materia; infatti, la procedura amministrativa, mediante un linguaggio essenziale, è integrata sia da notizie tecniche che da considerazioni giuridiche, indispensabili per evidenziare le logiche sottese ai procedimenti. Inoltre, traendo spunto dall'esperienza personale degli autori, diversi temi sono stati trattati riferendosi alla prassi prevalente che si riscontra presso gli organi preposti al controllo; ciò per semplificare ulteriormente la trattazione di un argomento che molto spesso, proprio a causa della sua complessità, incontra serie difficoltà di gestione.

Il testo avvia l'esposizione illustrando concetti di acustica di base, anche dal punto di vista pratico del loro utilizzo (*capitolo 1*). Dopo un'essenziale discussione dei principi contenuti nelle disposizioni legislative fondamentali (*capitolo 2*), su tale sfondo normativo, avendo sempre come riferimento il disturbo ambientale, gli aspetti della questione rumore sono trattati illustrando prima le procedure generali di gestione dei problemi di inquinamento acustico (*capitolo 3*), poi esaminando, nel *capitolo 4*, le numerose questioni tipiche (traffico, esercizi pubblici, edifici abitativi ed altro).

La normativa che viene approfondita, oltre ad essere di fonte statale, si riferisce in particolare anche alla legislazione della Regione Lombardia. Tuttavia, considerato che la sostanziale uniformità normativa delle regioni italiane, ha condotto ad una corrispondente omogeneità delle regole procedurali, i sistemi analizzati nel testo possono essere assunti come un riferimento che prescinde dall'origine geografica delle leggi.

A completamento del quadro normativo, nel *capitolo 5* viene esaminata l'ultima fonte legislativa nazionale (il D.Lgs. 194/05) che ha attuato la Direttiva comunitaria 2002/49/CE in tema di gestione del rumore ambientale e che introduce nuovi criteri e parametri tecnici di valutazione, chiamando altresì gli enti locali ad ulteriori impegni nella tutela dall'inquinamento acustico.

In considerazione del fatto che spesso sono soprattutto i lavoratori i primi soggetti esposti al rumore in ragione della loro attività, abbiamo ritenuto opportuno fornire anche un quadro generale ma esauriente della disciplina prevista dal D.Lgs. 81/08 (*capitolo 6*), che ha recepito le Direttive CE in materia.

Infine, crediamo di aver fatto cosa utile (*capitolo 7*) nel riportare anche cenni e considerazioni sulla problematica delle vibrazioni, spesso associata a quella del rumore, soprattutto per quanto concerne il disturbo da basse frequenze.

Oltre ad alcune annotazioni e rimandi, con un carattere *corsivo* e di minori dimensioni, sono stati inseriti nel corpo del testo diversi aspetti di approfondimento tecnico-operativo o giuridico (volti principalmente all'attenzione degli addetti ai lavori).

Alla fine della trattazione tipica, sono state collocate tre *Appendici* i cui contenuti sono riportati anche sul CD rom allegato al volume. La prima, *legislativa*, riporta le fonti nazionali essenziali e le leggi regionali di Toscana, Emilia Romagna e Lombardia che disciplinano in generale l'inquinamento acustico; la seconda raccoglie *massime giurisprudenziali*, divise per ambiti giurisdizionali, ritenute maggiormente significative; infine, un'appendice *Operativa*, oltre a contenere schemi di modulistica, tratta fondamentali problematiche con riferimento a casi pratici a cui gli operatori, in primo luogo i tecnici competenti in acustica, a vario titolo, possono riferirsi. Il CD rom allegato contiene anche alcuni semplici fogli di calcolo utili per l'attività pratica del tecnico competente in acustica

INTRODUZIONE

I suoni hanno caratterizzato l'esistenza di ogni generazione ma il rumore, inteso come disturbo alla quiete, è divenuto negli ultimi tempi uno dei principali e dannosi protagonisti della civiltà. Basti pensare che qualche anno fa, l'Organizzazione Mondiale della Sanità ha stimato che circa 150 milioni di persone sono esposte a seri rischi per la salute prodotti dal rumore; mentre uno studio più recente della stessa OMS, ha evidenziato che in Europa, ogni anno muoiono 210 mila persone a causa di un infarto o un *ictus* provocati dal rumore, e moltissime altre riportano danni di varia entità.

Secondo l'Istat, invece, in Italia, anche se dal 2000 il numero di reclami è diminuito dello 0,2 per cento, quasi una famiglia su due riferisce di essere disturbata dal rumore; i campani risultano essere i più rumorosi (nella regione si lamenta il 50,8% delle famiglie), mentre in Puglia la percentuale scende al 45,9 per cento e nel Lazio al 44,6 per cento. I più virtuosi risultano i trentini, con Trento al 21 e Bolzano al 24,8 per cento.

La causa di questo "nuovo" pericolo socio-ambientale è tutt'altro che insolita e, proprio per questo, foriera di fondati timori. Infatti, ogni occasione di inquinamento acustico è riconducibile essenzialmente ad uno sviluppo del progresso difficilmente gestibile in quanto soprattutto non adeguatamente programmato.

A nostro avviso il motivo di questa sproporzione ha il suo primo fondamento nella mancanza di cultura sull'argomento; basti pensare che in Italia, solo nel 1991 si è tentato di fornire una regolamentazione per il controllo dell'inquinamento acustico e, successivamente, nel 1995, dopo aver preso atto della sostanziale disapplicazione dei dettami della precedente regolamentazione, il legislatore ha finalmente previsto una disciplina organica di tutela.

Peraltro, la carenza di attenzione rispetto al problema dell'inquinamento acustico deriva anche da un atteggiamento comportamentale; infatti, mediante i meccanismi di protezione fisiologica dell'orecchio, l'uomo ha sviluppato la capacità di ignorare i rumori, fino a determinare una sorta di assuefazione ad essi.

Le sorgenti sonore oggi ritenute moleste sono numerosissime; vanno dal traffico alle attività industriali e artigianali, agli esercizi pubblici, agli schiamazzi, per non parlare del rumore originato dagli aeroporti. Ma anche i rumori prodotti all'interno degli edifici costituiscono seri problemi di disturbo acustico.

Quali possono essere le soluzioni contro l'inquinamento acustico? Come si è detto prima, è innanzitutto la sensibilità di ogni individuo verso il problema che deve essere sviluppata. Ma questo presupposto deve anche costituire il punto di partenza per una nuova azione da parte dell'amministrazione pubblica, sia relativamente al controllo ma, soprattutto, attraverso un'efficace opera di prevenzione. Infatti, la difesa dal rumore dovrebbe principalmente concretizzarsi partendo da un'oculata pianificazione territoriale fino a pervenire ad un'adeguata progettazione architettonica degli ambienti di vita, finalizzata al massimo comfort acustico possibile.

Purtroppo in moltissime situazioni lo stato di fatto del tessuto urbano non permette l'agevole applicazione di questi principi, ma non bisogna per questo cadere in pericolosi fatalismi del tipo "quel che è fatto è fatto", perché esistono ancora ampi spazi di manovra sia per la prevenzione che per il controllo.

Per realizzare un'efficace protezione dall'inquinamento acustico molti strumenti sono stati creati, mentre si sta lavorando per realizzarne altri. Crediamo, però, che solo partendo da una rinnovata sensibilità verso il problema, si possano raggiungere risultati concreti. E si spera, ovviamente, che questa sensibilità si manifesti soprattutto tra le pubbliche istituzioni. In sostanza, quello che manca è una svolta culturale, giacché nessuna norma può efficacemente combattere il rumore se il rispetto acustico non entra a far parte delle comuni abitudini di tutti.

Infine, non bisogna dimenticare che la gestione del problema presenta anche sacrifici economici tutt'altro che trascurabili: secondo l'OMS, costa dieci volte di meno progettare in modo attento che cercare di correre ai ripari dopo. In Italia, nel 2004 l'Eurispes ha stimato che i danni da inquinamento acustico ammontano a 20 miliardi e che a causa delle conseguenze del rumore, sono state perse 35 milioni di giornate lavorative.

CAPITOLO 1

PRINCIPI FISICI E DEFINIZIONI

Prima di affrontare il problema dell'inquinamento acustico dal punto di vista normativo-procedurale, è opportuno richiamare alcuni concetti teorici utili ad inquadrare il fenomeno dal punto di vista fisico, quantomeno per conoscere il significato dei termini su cui va ad innestarsi il discorso sia normativo che procedurale.

Convinti di giovare soprattutto a coloro che si accingono per la prima volta ad affrontare le problematiche legate al rumore, di seguito verranno fornite alcune definizioni e relazioni matematiche relative ai parametri acustici più significativi.

1.1 Il suono

Il suono è una perturbazione meccanica di carattere oscillatorio che si propaga in un mezzo elastico (gas, liquido, solido), senza trasporto di materia.

Una sorgente sonora può essere costituita da qualsiasi oggetto, dispositivo, macchina o essere vivente atto a produrre emissioni sonore.

Il corpo elastico, messo in vibrazione, crea una serie di compressioni e rarefazioni delle molecole dell'aria, che a loro volta trasmettono la perturbazione a quelle adiacenti e così via, producendo l'onda sonora.

La perturbazione consiste quindi in un susseguirsi di pressioni e depressioni, cioè in un'oscillazione di ogni particella attorno ad una sua posizione media fissa. Quindi, una vibrazione completa, cioè una compressione e rarefazione, produce l'onda sonora. Ed è quest'ultima che determina, mediata dall'orecchio, la sensazione uditiva nel nostro cervello.

Senza un mezzo elastico il suono non può propagarsi; infatti, nel vuoto, dove non c'è alcun mezzo, non può esistere il suono.

Il movimento delle particelle d'aria che consentono la propagazione del suono può seguire tre moti diversi: si distinguono onde *circolari*, onde *trasversali* e onde *longitudinali* (si veda l'illustrazione seguente).

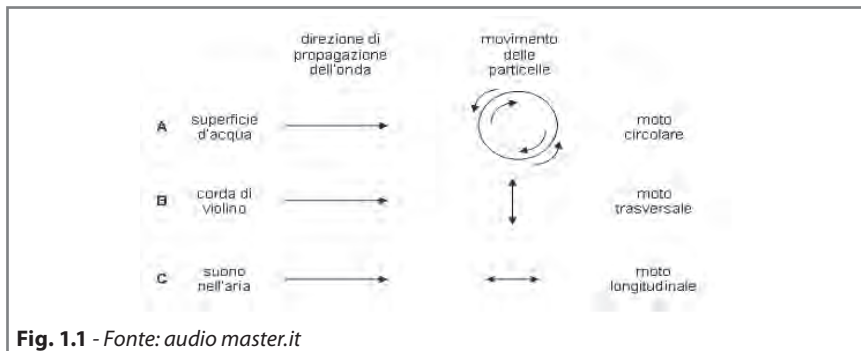


Fig. 1.1 - Fonte: audio master.it

Possiamo illustrare quanto sopra detto nella figura seguente, in cui la propagazione dell'onda sonora viene rappresentata graficamente mediante un'onda sinusoidale:

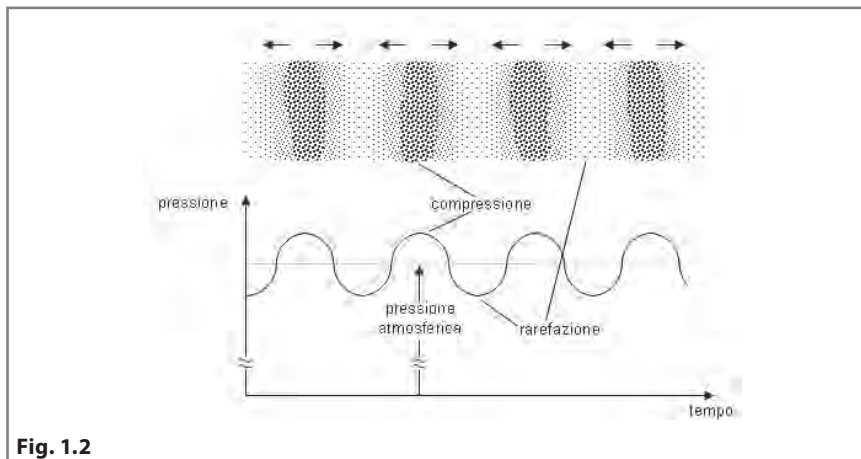


Fig. 1.2

I "picchi" al di sopra del punto di equilibrio corrispondono a compressioni; le "valli" al di sotto di tale punto corrispondono a rarefazioni.

1.2 Parametri fisici

Nella porzione di spazio interessata dalle variazioni di pressione, la **lunghezza d'onda (λ)** esprime la distanza (misurata con sottomultipli del metro) tra una compressione (o rarefazione) e quella successiva. Una serie completa di variazioni di pressione viene definita **ciclo**. Tale grandezza è legata alla frequenza ed al periodo, ovvero alla velocità (c) di propagazione dell'onda nel mezzo di trasmissione ($\lambda = c T (m)$).

Il **periodo (T)** rappresenta il l'intervallo temporale necessario per compiere un'oscillazione completa. In effetti, in questo intervallo sono compresi i due istanti consecutivi nei quali si ha un massimo e un minimo della pressione, ossia l'inverso della frequenza ($1/f$).

La **velocità (c)** equivale alla velocità di propagazione; è proporzionale alla densità del mezzo attraversato dall'onda sonora e viene espressa in metri al secondo (nell'aria la velocità del suono a 20° C è pari a 343 m/s). In sostanza, a determinare la velocità sono le proprietà elastiche e la massa del mezzo di trasmissione.

La lunghezza d'onda dipende proprio dalla velocità, oltre che dalla frequenza, secondo la relazione:

$$\lambda = \frac{c_0}{f} (m).$$

Dalla suddetta relazione si evince che all'aumentare della frequenza si riduce la lunghezza d'onda della perturbazione sonora.

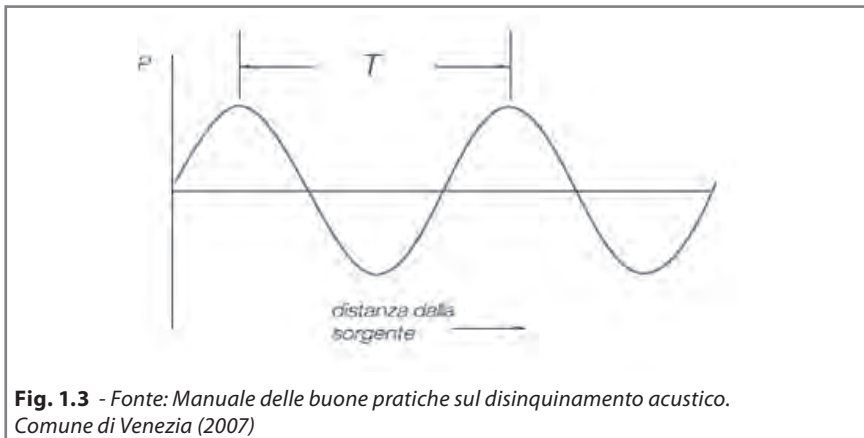


Fig. 1.3 - Fonte: *Manuale delle buone pratiche sul inquinamento acustico. Comune di Venezia (2007)*

Il numero di vibrazioni (o fluttuazioni) complete che avvengono in un secondo esprime la **frequenza (f)** del suono, che si misura in Hertz (Hz). Il campo di udibilità dell'orecchio umano è compreso tra 20 e 20000 Hz. Sotto tali valori ritroviamo gli infrasuoni, mentre i suoni caratterizzati da valori superiori ai 20 KHz, rappresentano gli ultrasuoni; in entrambi i casi le onde sonore non sono percepibili⁽¹⁾.

Nelle indagini di inquinamento acustico, spesso si riscontra che gli indici singoli (come il LAeq, di cui si parlerà più avanti), non rappresentano pienamente le caratteristiche del rumore. Se la sorgente genera rumore con frequenze distinte (rumore tonale), è necessario misurare il contenuto della frequenza in ottava, in 1/n (frazioni) d'ottava o in bande più strette (sistema che si basa su l'analisi di Fourier: FTT- Fast Fourier Transform⁽²⁾).

*Graficamente, l'analisi in frequenza esprime uno **spettro del suono** (c.d. "analisi spettrale"); il grafico viene costruito ponendo sulle ordinate il livello del segnale, normalmente in decibel, ed in ascissa la frequenza. Se prendiamo ad esempio un suono costituito da un "tono puro" (una sinusoidale perfetta), osserveremo sullo spettro una singola componente ad un certo livello e ad una frequenza pari a quella della sinusoidale. Quindi, in tal caso tutta l'energia del suono è concentrata su una sola frequenza (è ciò che avviene col diapason).*

Tuttavia, la maggior parte dei suoni che udiamo è costituito da un tono puro di base e da "toni armonici", che sono i multipli interi della frequenza di base (e che determinano il c.d. timbro" del suono). Quindi, in massima parte i suoni sono composti da un grande numero di componenti di ampiezza continuamente variabile nel tempo e in frequenza (frequenze disarmoniche che non sono tra loro in rapporto intero).

Poiché di un suono reale interessa soprattutto l'aspetto energetico, normalmente l'analisi in frequenza viene fatta con uno spettro a bande di ampiezza finita: le cosiddette bande d'analisi in frequenza.

Ciascuna banda è caratterizzata dalla frequenza di taglio superiore f_s , da quella di taglio inferiore f_i e dalla frequenza nominale (di centro banda).

-
1. In genere, si può affermare che un suono a bassa frequenza è un suono "grave"; con l'aumentare della frequenza, esso diventa "acuto".
 2. Il teorema di Fourier afferma che un qualsiasi segnale periodico, sotto alcune condizioni matematiche (sempre verificate per i segnali fisici), può essere ottenuto mediante la somma di un termine costante e di infinite funzioni sinusoidali, le cui frequenze sono multipli interi di quella del segnale (ovvero le cui pulsazioni sono multipli interi di quella del segnale).

Se $\Delta f = f_s - f_i$ è costante si ottiene una analisi a bande di ampiezza costante o banda stretta (per esempio 1 Hz, 10 Hz, ecc). Solitamente, questo tipo di descrizione dei segnali sonori, benché utilizzata per analisi approfondite della composizione in frequenza, è più in uso tuttavia nel campo delle vibrazioni.

Invece, nell'acustica ambientale è molto usata l'analisi in bande di ampiezza percentuale costante da 1/1 ottava o 1/3 di ottava. In questo caso la larghezza di banda Δf è una percentuale costante del valore della frequenza nominale che caratterizza la banda stessa, ovvero

$$\frac{\Delta f}{f_c} \text{ è costante.}$$

Le bande d'analisi base sono dette bande d'ottava, ed equivalgono a raddoppio del valore sulla scala delle frequenze. Il termine "ottava" è stato preso in prestito dalla musica. In tale ambito un'ottava rappresenta l'intervallo tra una nota musicale ed un'altra, con lo stesso nome, la cui frequenza è doppia.

L'intero spettro udibile è coperto da dieci bande d'ottava con le seguenti frequenze di centro banda:

Fc1	Fc2	Fc3	Fc4	Fc5	Fc6	Fc7	Fc8	Fc9	Fc10
31,5Hz	63Hz	125Hz	250Hz	500Hz	1KHz	2KHz	4KHz	8KHz	16KHz

Per descrivere con maggior precisione i suoni, si deve operare un suddivisione della banda. Per esempio, con la suddivisione di una banda d'ottava in 3 sottobande otteniamo il frazionamento delle frequenze in bande di 1/3 d'ottava, nel quale la banda superiore ha un valore doppio rispetto alla banda inferiore.

A compendio di ciò che si è detto a proposito dell'analisi spettrale, si riportano i grafici seguenti:

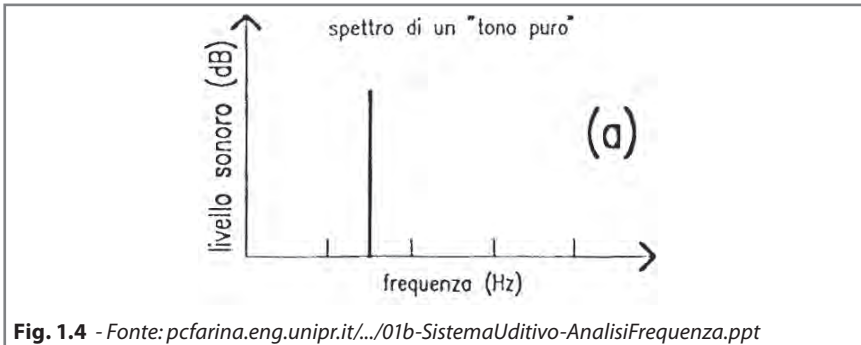


Fig. 1.4 - Fonte: pcfarina.eng.unipr.it/.../01b-SistemaUditivo-AnalisiFrequenza.ppt

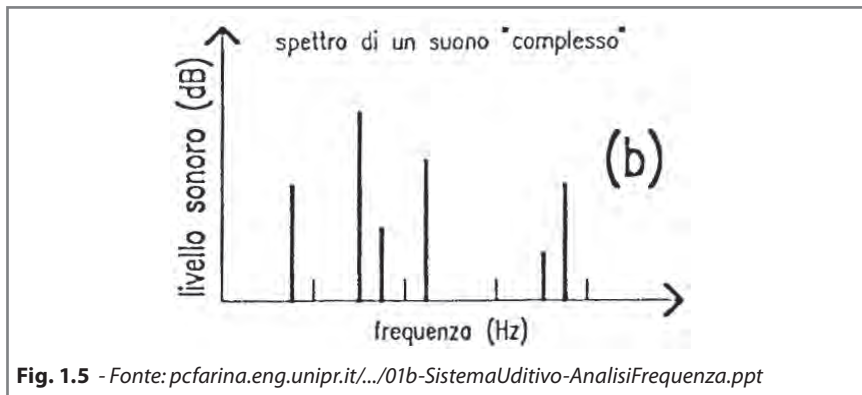


Fig. 1.5 - Fonte: pcfarina.eng.unipr.it/.../01b-SistemaUditivo-AnalisiFrequenza.ppt

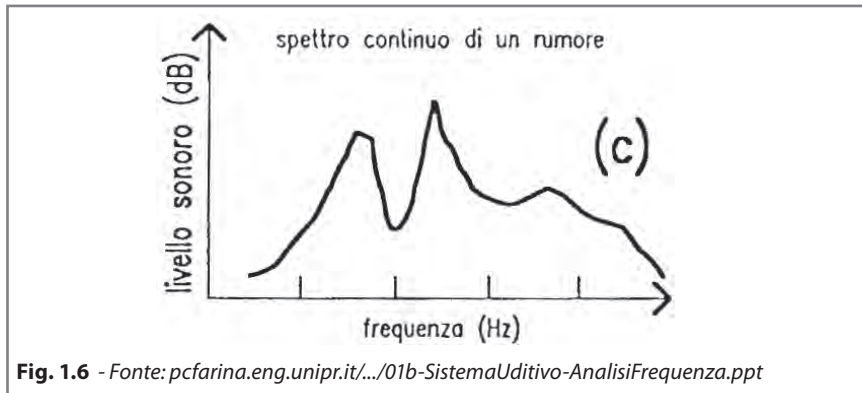


Fig. 1.6 - Fonte: pcfarina.eng.unipr.it/.../01b-SistemaUditivo-AnalisiFrequenza.ppt

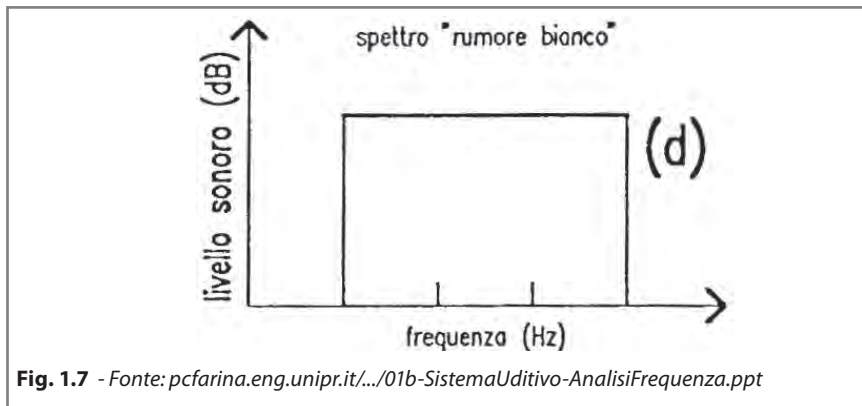
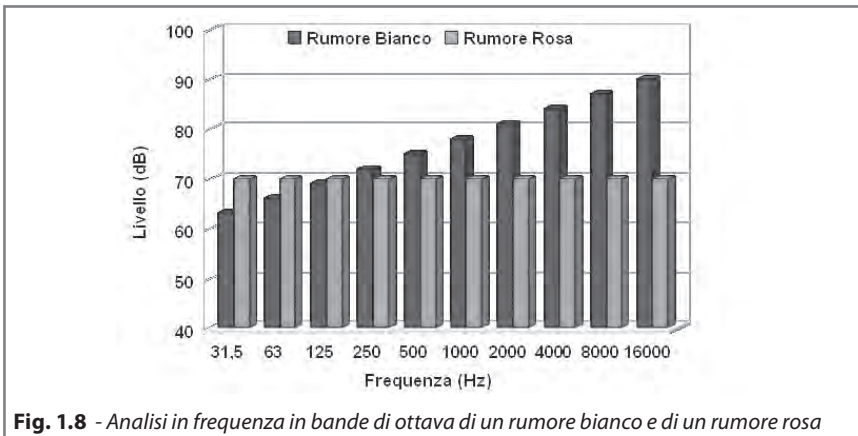


Fig. 1.7 - Fonte: pcfarina.eng.unipr.it/.../01b-SistemaUditivo-AnalisiFrequenza.ppt

La strumentazione che esegue le analisi in frequenza, oltre a fornire il contenuto di energia all'interno delle singole bande, computa anche l'energia totale nell'intero intervallo delle frequenze analizzate; questa lettura viene indicata con il simbolo Lin ed è espressa in dB. Essa corrisponde ovviamente alla somma dei livelli relativi alle singole bande di frequenza.

Se si effettua l'analisi in frequenza in bande di ampiezza percentuale costante di un rumore bianco, cioè di un rumore che ha lo stesso livello sonoro a tutte le frequenze, considerate queste in banda stretta, si ottiene uno spettro di rumore che cresce costantemente al crescere della frequenza di centro banda. Se l'analisi viene effettuata in bande di ottava, il livello cresce di 3 dB per ogni banda successiva mentre se viene effettuata in 1/3 di ottava il livello cresce di 1 dB per ogni banda successiva. Nella successiva figura è riportato l'andamento di una analisi in frequenza in bande di ottava di un rumore bianco avente livello sonoro in banda stretta di ampiezza 1 Hz pari a 50 dB. Nella stessa figura è riportata anche l'analisi in bande di ottava di un rumore rosa, cioè di un rumore la cui analisi in bande di ampiezza percentuale costante fornisce lo stesso livello in ogni banda. Il rumore rosa considerato in banda stretta ha un andamento decrescente all'aumentare della frequenza.



Considerato che l'**analisi in frequenza** (o analisi spettrale), serve per determinare il contenuto in frequenza di un suono, si deve evidenziare che essa rappresenta un sistema indispensabile soprattutto ai fini della bonifica acustica: infatti, per ogni tipo di suono, esistono in genere materiali che forniscono un certo grado di isolamento in base alla particolare frequenza del suono stesso.

I continui fenomeni di compressione ed espansione determinano una variazione della pressione ambiente e danno quindi origine alla **pressione acustica (p)**. Questo parametro dipende, oltre che dalla frequenza e dall'ampiezza del moto armonico della sorgente, anche dalle caratteristiche elastiche e dalla massa del mezzo acustico.

Il legame tra la velocità delle particelle del mezzo elastico (v') e la pressione acustica (p') vale:

$$\frac{p'}{v'} = \rho_0 \cdot c_0 \quad (\text{kg/m}^2 \text{ s}).$$

Il parametro ρ_0 è la densità del mezzo elastico ed il prodotto $\rho_0 \times c_0$ è detto **impedenza acustica (Z)** dell'onda piana ($\text{kg/m}^2 \text{ s}$)(rayl). Essa è una caratteristica del mezzo in cui l'onda si propaga e rappresenta sostanzialmente la resistenza che il mezzo oppone al fenomeno acustico. In particolare, maggiore è la densità del mezzo e maggiore è la resistenza.

Anche se nella stragrande maggioranza dei casi di controllo e verifica, il livello di pressione sonora è l'entità assunta in genere come riferimento (innanzitutto per specifiche disposizioni normative), per la trattazione di alcuni tipi di problematiche (come, per esempio, in tema di valutazioni di impatto acustico o di bonifica acustica) i tecnici sono chiamati a valutare il fenomeno acustico secondo ulteriori grandezze.

Spesso l'entità del rumore viene rappresentata dai parametri della potenza e dell'intensità sonora. La **potenza sonora** (espressa in Watt), esprimendo la capacità di emissione sonora di una sorgente, indica l'energia che la sorgente emette nell'unità di tempo. Descrivendo una quantità oggettiva, cioè indipendente dall'ambiente, essa è caratteristica di ogni singola sorgente sonora. Il livello di potenza sonora è espresso come segue: $L_w = 10 \log W/W_0$, ove W è la potenza sonora da misurare, mentre W_0 è quella di riferimento (pari a 10^{-12}). La potenza sonora viene indicata nelle caratteristiche tecniche delle macchine e degli impianti che tutti noi utilizziamo normalmente anche tutti i giorni (es. aspirapolvere, frullatori, compressori, motori dei mezzi d'opera, ecc.).

L'**intensità sonora** rappresenta la potenza sonora per unità di superficie in una determinata direzione ($I = W/S$) e viene espressa in W/m^2 . Quindi, essa viene definita come l'energia che nell'unità di tempo attraversa la superficie. Nell'equazione il parametro W è uguale alla potenza sonora trasportata dall'onda ed S indica l'unità di superficie in m^2 . Il livello di intensità sonora sarà quindi

uguale a: $Ll = 10 \log I/I_0$, ove “ I ” esprime l’intensità sonora da valutare, mentre “ I_0 ” rappresenta quella di riferimento (pari a 10^{-12}).

Per caratterizzare un suono risulta importante definire anche l’**ampiezza** delle sue oscillazioni. Questo è un parametro indicativo del “volume” del suono e può essere stimata in diversi modi, precisamente, mediante il valore di picco, il valore di picco-picco, il valore medio ed infine il valore efficace (RMS).

La modalità di misura dell’ampiezza è estremamente importante in quanto trova riscontro, come vedremo più avanti, sulle costanti di tempo dei fonometri.

Se la forma dell’onda è complessa, mentre da un lato diventa ambigua la definizione dell’ampiezza media del segnale, per altro verso l’utilizzo del valore istantaneo massimo non è rappresentativo della percezione umana. Per tali ragioni, si impiega il Valore Medio Efficace del segnale (**RMS**), che rappresenta meglio il contenuto energetico dell’onda. Posto che, per caratterizzare l’ampiezza, bisogna valutare le variazioni della pressione in funzione del tempo, esso è rappresentato dalla seguente relazione:

$$P_{eff} = \sqrt{\left(\frac{1}{T} \cdot \int_0^T [p(\tau)]^2 d\tau \right)}$$

1.3 Propagazione del suono

In genere, quando lungo il percorso dell’onda sonora non vi sono ostacoli, questa si propaga nell’aria per onde piane o sferiche. Infatti, in una situazione di campo libero, una sorgente puntiforme (cioè, di dimensioni ridotte rispetto alla distanza di osservazione, come, per esempio, può essere l’emissione sonora prodotta da un impianto di trattamento dell’aria) emette energia sonora distribuendola su superfici sferiche di area crescente all’aumentare della distanza dalla sorgente. Di conseguenza l’energia che possiede il fronte d’onda si distribuisce su tutta la superficie, per cui su una singola unità di superficie avremo un’energia che decresce proporzionalmente al quadrato della distanza. Siccome l’energia è proporzionale all’intensità sonora, possiamo dire che quest’ultima decresce con il quadrato della distanza.

Volendo esprimere in decibel questa variazione, in linea di principio diremo che raddoppiando la distanza, l’intensità sonora decresce di 6 dB, e decuplicando la distanza, l’intensità sonora decresce di 20 dB.

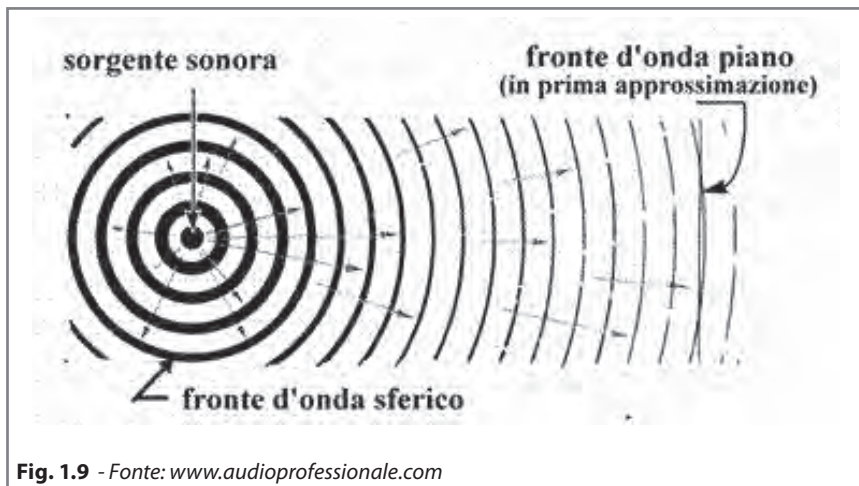


Fig. 1.9 - Fonte: www.audioprofessionale.com

Considerato che nella propagazione del suono, la lunghezza d'onda assume importanza fondamentale, di seguito riportiamo una tabella che mostra la lunghezza d'onda in aria libera, per alcune frequenze udibili.

Tab. 1.1

(Hz)	(λ) IN METRI
20	17
30	11,3
50	6,8
100	3,4
250	1,36
800	0,425
2.000	0,17
5.000	0,068
10.000	0,034
20.000	0,017

Possiamo affermare che nello stesso mezzo, onde a maggior frequenza hanno lunghezza d'onda più piccola, e viceversa.

In pratica, però, non avremo mai una propagazione perfettamente sferica, in quanto l'onda sonora che si propaga all'aperto, oltre a risentire dell'incidenza geometrica a partire dalla sorgente, avverte anche l'incidenza di altri meccanismi, quali l'assorbimento di energia acustica per opera dell'aria, la presenza di vegetazione, le condizioni meteorologiche come vento e gradienti di temperatura, nonché la presenza di barriere naturali e artificiali.

*L'attenuazione dovuta all'assorbimento di energia acustica per opera dell'aria in cui le onde sonore si propagano, dipende dal fatto che essa viene gradualmente trasformata in energia termica, soprattutto attraverso meccanismi di vibrazione delle molecole di ossigeno, provocando il cosiddetto **assorbimento atmosferico**. L'assorbimento risulta tanto più elevato, se la frequenza del rumore si avvicina alla frequenza di rilassamento delle molecole, la quale dipende dalla temperatura e dall'umidità dell'aria (se il medium ha scarsa umidità relativa, il suono si diffonde meno facilmente) ed è proporzionale alla distanza che intercorre tra sorgente e ricevitore.*

*L'attenuazione dovuta alla presenza di **vegetazione** risulta tangibile quando sia la sorgente che il ricevitore si trovano a una distanza ridotta dal suolo. Alberi e vegetazione bassa determinano, infatti, un leggero affievolimento per effetto schermo. Per frequenze inferiori ai 1.000 Hz il loro contributo è dovuto prevalentemente all'effetto suolo, poiché le radici rendono il terreno più poroso.*

*Infine, fattori come vento, gradienti di temperatura e turbolenze atmosferiche possono influire in maniera rilevante a causa delle loro fluttuazioni. In particolare, la **velocità del vento** cresce normalmente con la quota e l'osservatore in direzione del vento riceve alti livelli sonori, mentre in caso contrario il rumore può subire un'attenuazione fino a 20 dB. I **gradienti di temperatura** influiscono in quanto la velocità del suono è una funzione crescente con la temperatura dell'aria (in genere si calcola un decremento di velocità del suono pari a 0,6 m/s per ogni grado in meno). La **turbolenza atmosferica** è, invece, spesso localizzata in prossimità dello strato di inversione termica e, combinata con questo, produce una rifrazione del raggio sonoro.*

La tabella 1.2 seguente fornisce un quadro della variazione della velocità del suono nell'aria al variare della temperatura ($\gamma = 1.4$).

Tab. 1.2

T (°C)	a (m/s)	ρ (kg/m ³)	Z (N·s/m ³)
-10	325,4	1341	436,5
-5	328,5	1316	432,4
0	331,5	1293	428,3
5	334,5	1269	424,5
+10	337,5	1247	420,7
+15	340,5	1225	417,0
+20	343,4	1204	413,5
+25	346,3	1184	410,0
+30	349,2	1164	406,6

Come detto prima, i fattori che possono determinare e influenzare la propagazione delle onde sonore in ambiente esterno sono legati ai diversi fenomeni atmosferici e alla presenza o meno di "barriere" (naturali e/o antropiche) presenti lungo il percorso di propagazione dell'onda sonora.

Gli eventi atmosferici che influenzano la propagazione del suono sono la temperatura e il vento.

Temperatura

Sappiamo che la temperatura varia in funzione dell'altezza dal suolo: come conseguenza avremo che il fronte sonoro non si propagherà linearmente ma tenderà ad incurvarsi. Prendendo ad esame una sorgente puntiforme avremo:

- 1) andamento normale

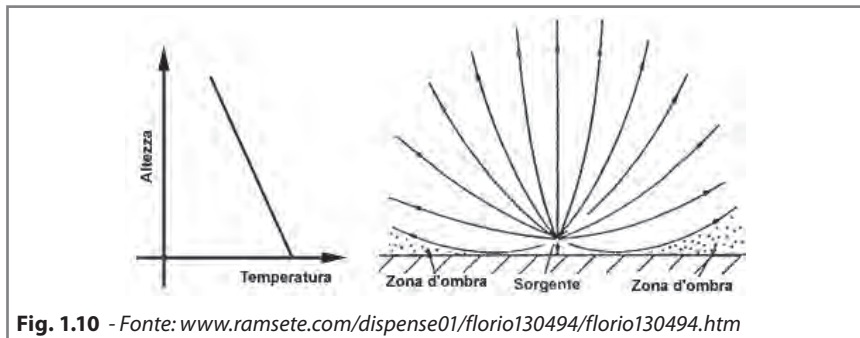


Fig. 1.10 - Fonte: www.ramsete.com/dispense01/florio130494/florio130494.htm

La temperatura dell'aria diminuisce con l'aumentare della distanza dalla superficie terrestre. Le onde sonore emesse dalla sorgente si "aprono" e si "incurvano" verso l'alto. Esiste una superficie limite teorica, tangente al terreno, sotto la quale non arriva nessun segnale sonoro: questa zona viene definita zona d'ombra sonora.

2) inversione termica

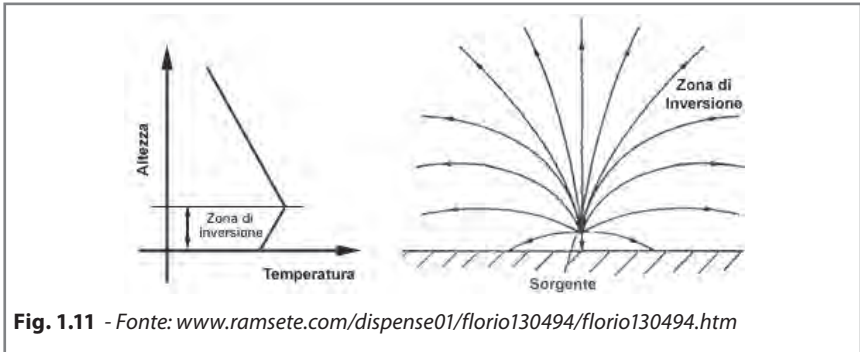


Fig. 1.11 - Fonte: www.ramsete.com/dispense01/florio130494/florio130494.htm

Assumiamo ad esempio la configurazione tipica delle grandi pianure, in cui il terreno si trova ad una temperatura inferiore rispetto a quella dell'aria circostante. La conseguenza, per valori di altezze dal suolo limitati, è una zona di temperature chiamata zona di inversione termica dove l'aria è più calda salendo di quota (caso inverso rispetto alla condizione normale). In questa zona i raggi sonori, come indicato in figura, sono curvati verso l'alto per cui non è possibile la presenza di una zona d'ombra. In compenso il suono può propagarsi in aree che non potrebbero essere raggiungibili dai fronti d'onda se questi avessero l'andamento consueto.

3) presenza di nebbia

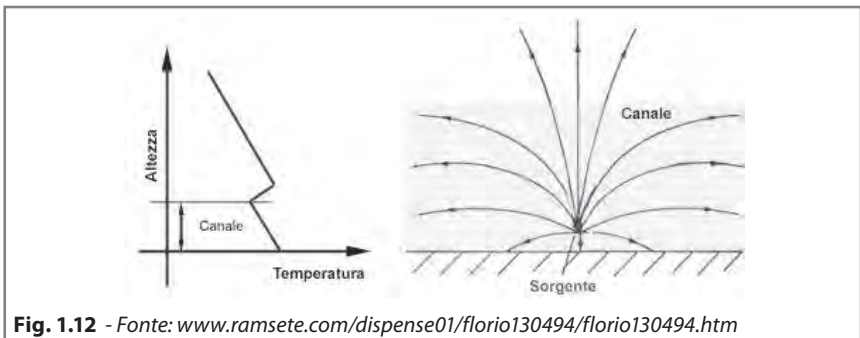


Fig. 1.12 - Fonte: www.ramsete.com/dispense01/florio130494/florio130494.htm

In condizioni di nebbia si forma un “canale sonoro” quando l’aria presenta uno strato a temperatura maggiore (o minore) rispetto gli strati circostanti. L’effetto è che le onde sonore tendono a seguire “percorsi forzati” all’interno del canale a temperatura diversa: il “percorso forzato” cessa quando l’aria torna nuovamente a variare la propria temperatura. Le onde sonore possono anche percorrere diversi chilometri prima di ricadere sul terreno.

Vento

La propagazione delle onde sonore viene condizionata dalla presenza di vento e, più precisamente, dalla velocità del vento. Infatti, le velocità del suono e del vento stesso si sommano vettorialmente.

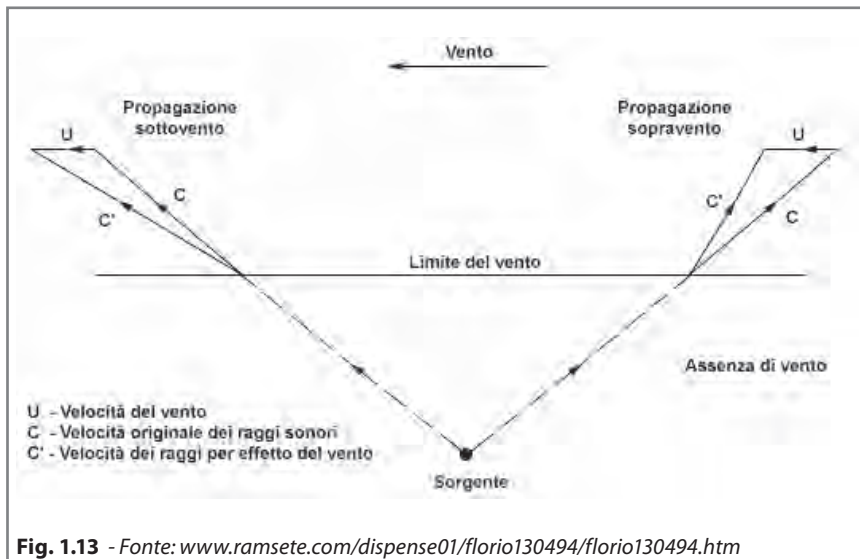


Fig. 1.13 - Fonte: www.ramsete.com/dispense01/florio130494/florio130494.htm

Per esempio, se un raggio sonoro transita da una zona priva di vento ad una ventilata, la velocità con cui il suono si propaga si somma alla velocità del vento.

La presenza di vento determina la curvatura dei raggi sonori. Infatti, a livello del suolo il vento presenta una velocità nulla; questa velocità assume invece un gradiente positivo al crescere dell’altezza.

Se il vento scorre con la stessa velocità della terra, i raggi non subiscono curvature, ma semplicemente l’effetto della composizione vettoriale tra le velocità

(vento + suono). Se invece il vento presenta un campo di velocità ridotto ma con forte gradiente (da nullo a terra a forte in quota), l'effetto netto è la curvatura dei raggi. Tale curvatura rende possibile la formazione di zone d'ombra sopravento, cioè al di sotto dell'ultimo raggio tangente con il suolo, e di zone in cui il suono sembra "cadere" dall'alto.

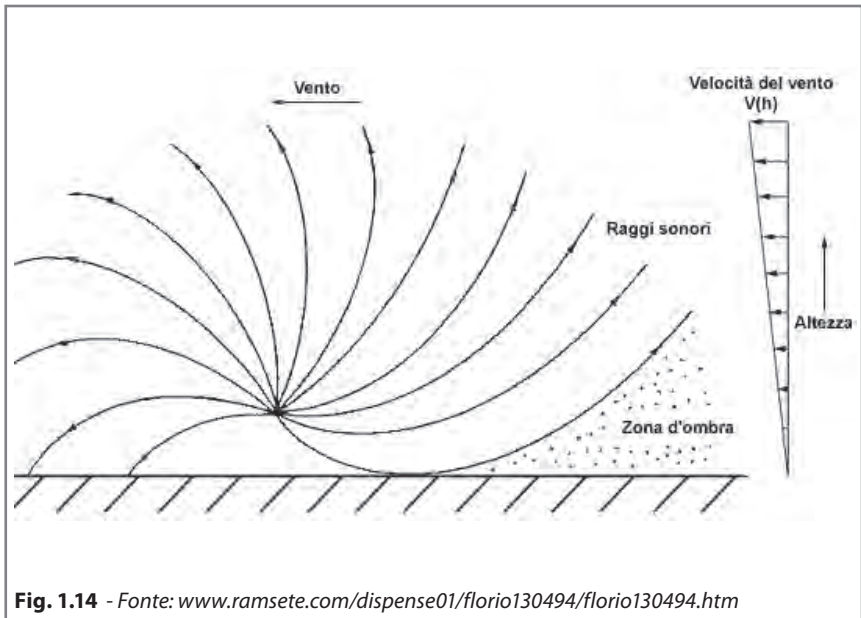


Fig. 1.14 - Fonte: www.ramsete.com/dispense01/florio130494/florio130494.htm

A favore di vento, il vento stesso curva i raggi verso l'alto. Se la velocità del vento varia linearmente con l'altezza, i raggi sonori vengono curvati verso la zona "sottovento". Per questo motivo che a favore di vento risulta più facile sentire il suono, in quanto la curvatura dei raggi permette al fronte sonoro di superare ostacoli che altrimenti ne bloccherebbero la propagazione.

Altro elemento naturale che influenza la propagazione delle onde sonore è l'effetto delle **riflessioni sul terreno**.

Il terreno, nei confronti della propagazione delle onde sonore, si comporta determinando fenomeni di riflessione e di assorbimento. L'onda riflessa dipende dalla superficie riflettente, dall'angolo formato tra il vettore di propagazione dell'onda stessa e la normale al piano di riflessione.

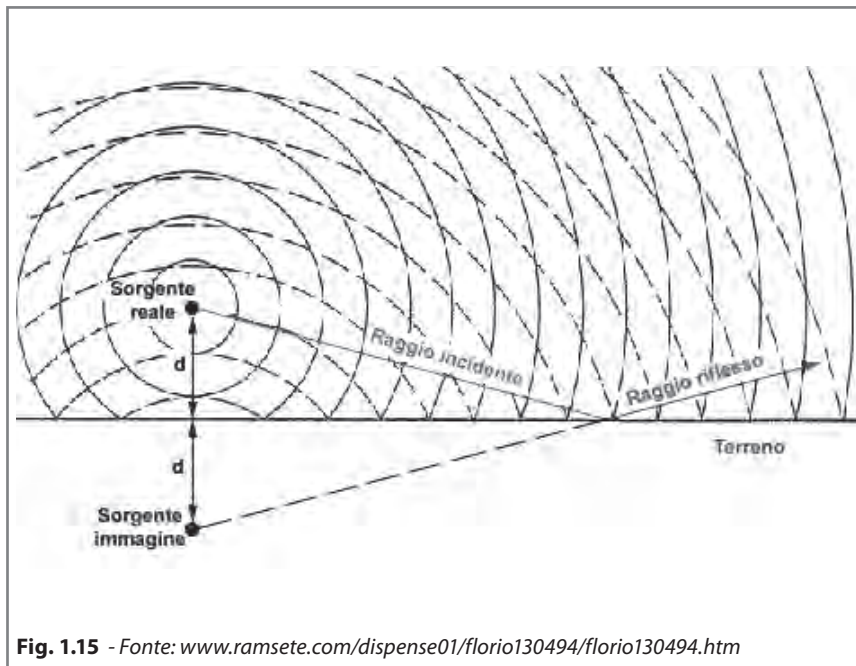
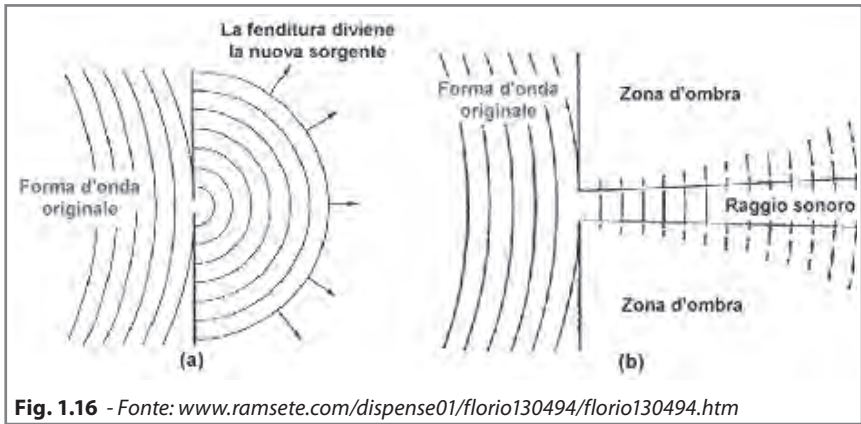


Fig. 1.15 - Fonte: www.ramsete.com/dispense01/florio130494/florio130494.htm

L'assorbimento dipende dalla porosità del terreno: è maggiore nei terreni naturali (per logica conseguenza della natura) e quasi nulla nelle zone antropizzate, dove l'asfalto e il cemento non consentono al terreno di mitigare la propagazione del suono.

Un altro aspetto di valutazione da tener presente nella propagazione delle onde sonore è la presenza di ostacoli e la conseguente diffrazione, ossia il fenomeno fisico che si verifica quando l'onda sonora incontra una "barriera" sulla sua direzione di propagazione. In questo caso le direzioni di propagazione delle onde sonore sono deformate dagli ostacoli stessi.

Se l'onda sonora presenta una lunghezza d'onda paragonabile ad una delle dimensioni fisiche dell'oggetto di ostacolo, allora l'effetto di diffrazione prevale sull'effetto di riflessione. Inoltre, anche la frequenza dell'onda sonora incidente influisce sul tipo di diffrazione che si genera; in particolare, ad alte frequenze avremo delle deformazioni dei fronti d'onda diverse da quelle osservabili a basse frequenze.



La Fig. 1.16 (a) mostra la diffrazione attraverso una fenditura di onde sonore a bassa frequenza, mentre la Fig. 1.16 (b) mostra la diffrazione di onde ad alta frequenza.

A basse frequenze, per diffrazione, la fenditura diventa essa stessa una sorgente di tipo puntiforme, cioè generante un'onda sferica che si propaga oltre l'ostacolo, mentre ad alte frequenze, il raggio sonoro che si forma all'uscita dal foro risulta essere tanto più collimato quanto maggiore è la frequenza dell'onda incidente.

Un altro esempio di diffrazione si presenta quando lungo la direzione di propagazione dell'onda sonora viene posta una barriera sottile.

