



Università degli studi di  
Padova



## LA PROPAGAZIONE DEL SUONO ALL'APERTO

Corso di Acustica applicata

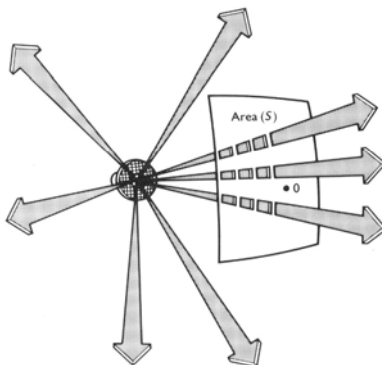
Renato Lazzarin

Filippo Busato

Dipartimento di Tecnica e Gestione dei  
Sistemi industriali

Se non incontrano ostacoli, le onde sonore si propagano a distanza dalla sorgente. Se la sorgente è puntiforme l'irradiazione avviene per superfici sferiche, per cui:

$$I = \frac{W}{4\pi r^2}$$



La relazione si può esprimere utilmente in termini di livelli:

$$L_p = 20 \log \frac{p}{p_o} \approx 10 \log \frac{I}{I_o} = 10 \log \frac{W}{4\pi r^2 I_o} = 10 \log \frac{W \times 1 \text{ m}^2}{4\pi r^2 I_o \times 1 \text{ m}^2}$$

$$L_p = 10 \log \frac{W}{W_o} - 10 \log 4\pi r^2 \approx L_W - 20 \log r - 11 \quad (r \text{ in metri})$$

Un raddoppio della distanza in campo libero riduce il livello di pressione sonora di circa 6 dB (effetto di divergenza).

Frequentemente la sorgente ha caratteristiche direzionali e quindi non vi è uniformità nel campo sonoro anche libero a distanza.

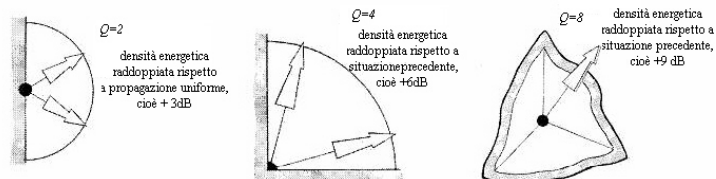
Viene definito il fattore di direzionalità  $Q$ , rapporto fra l'intensità sonora in un punto qualsiasi a distanza dalla sorgente e l'intensità che si sarebbe avuta nello stesso punto nel caso di irradiazione uniforme.

L'intensità sonora è allora data da:

$$I = \frac{WQ}{4\pi r^2}$$

$$L_p = L_W + 10 \log Q - 10 \log 4\pi r^2$$

Una sorgente uniforme posta su di una superficie uniforme presenta un importante effetto di direzionalità:



Ad esempio, se  $Q=2$  (sorgente a poca distanza da un piano riflettente):

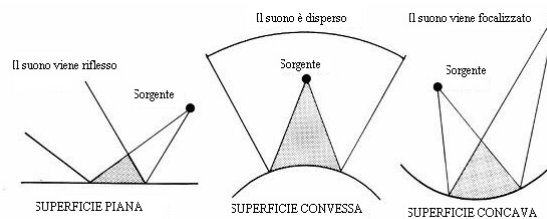
$$L_p = L_W - 20 \log r - 8$$

Le relazioni espresse sono utili, oltre che per valutare il valore di  $L_W$  da rilievi in campo libero, a stimare il livello  $L_p$  una volta noto il valore ad una distanza prefissata  $r_{rif}$ :

$$L_p = L_{prif} - 20 \log \frac{r}{r_{rif}}$$

Si tratta di una relazione valida anche per sorgente direzionale, purché i due punti siano nella stessa direzione dalla sorgente e a sufficiente distanza da essa.

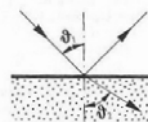
Se l'onda sonora incontra una superficie rigida si può avere una riflessione di tipo geometrico. Nel caso di superficie concava o convessa si può avere concentrazione o dispersione del suono. Le superfici rigide sono generalmente ottimi riflettori sonori.



Esiste anche il fenomeno della rifrazione quando si ha incidenza obliqua sulla superficie di separazione di due mezzi.

Anche qui si possono applicare le leggi dell'ottica geometrica:

$$\frac{\sin \theta_1}{\sin \theta_2} = \frac{c_1}{c_2}$$



Si ha riflessione totale quando l'angolo di incidenza sia superiore a:

$$\arcsin\left(\frac{c_1}{c_2}\right)$$

In tal caso si avrebbe infatti  $\theta_2=90^\circ$ .

Il fenomeno non è altrettanto netto che per la luce. Può comunque produrre ombre acustiche nel passaggio fra zone d'aria a diversa temperatura. Ad esempio se un'onda sonora proveniente da una zona a  $20^\circ\text{C}$  deve passare ad una zona a  $40^\circ\text{C}$ , si ha riflessione totale per un angolo di incidenza di  $75^\circ$ .

**L'attenuazione in eccesso**

In campo libero, oltre all'attenuazione per divergenza, si ha una serie di ulteriori attenuazioni, che vengono considerate in eccesso a questa.

Le cause sono essenzialmente:

- (a) assorbimento atmosferico;
- (b) precipitazioni o nebbie;
- (c) presenza di vegetazione;
- (d) fluttuazioni dovute al vento, o a gradienti di temperatura;

Si ha allora:

$$L_p = L_{pdiv} - \sum A_{ei}$$

**L'assorbimento atmosferico** è dovuto a perdita meccanica di energia sonora dovuta all'azione combinata della diffusività termica, della viscosità cinematica e dall'effetto dei moti vibratori e rotazionali dell'O<sub>2</sub> nell'aria. Il primo meccanismo è attivo a frequenza piuttosto elevate, il secondo risente molto di temperatura ed umidità.

Ad una temperatura di 20°C una relazione utilizzabile è la seguente ( $\phi$  è l'umidità relativa in %):

$$A_{e1} = 7,4 \frac{f^2 r}{\phi} \times 10^{-8} \text{ dB}$$

L'influenza della temperatura è riconoscibile dalla seguente relazione:

$$A_{e1}(t, 50\%) = \frac{A_{e1}(20^\circ \text{C}, 50\%)}{1 + 4 \times 10^{-6} (t - 20) f}$$

L'attenuazione può essere tangibile a forte distanza dalla sorgente e per le alte frequenze: in tal caso viene modificato lo spettro del rumore.

L'effetto può essere di rilievo anche in un ambiente riverberante dove le riflessioni sonore sono molteplici ed i percorsi possono essere molto lunghi. In questo caso la densità sonora viene attenuata da un fattore  $e^{-mx}$  dove  $x$  è lo spazio percorso ed  $m$  assume un valore dato a 20° e  $\phi=50\%$  pari a 0,0096 a 2000 Hz, 0,0244 a 4000 e 0,086 a 8000.

**Precipitazioni o nebbie**

Si è constatato che non esiste un effetto diretto (mentre ne può esistere uno indiretto dovuto a gradienti di temperatura o vento).

La riduzione del rumore di fondo dovuta ad un minore traffico veicolare o a una limitazione delle attività può dare la sensazione di minori attenuazioni. Non viene quindi attribuita alcuna attenuazione in eccesso.

**Presenza di vegetazione**

La natura del terreno, l'esistenza di asperità, prati, cespugli, alberi, influenzano la riflessione, rifrazione ed assorbimento sonori.

Si possono avere interferenze distruttive nel caso di suono radente.

Dati sperimentali relativi ad un terreno coperto di fitta vegetazione forniscono:

$$A_{e3} = (0,18 \log f - 0,31)r$$

Non si può comunque confidare su attenuazioni superiori a 25-30 dB.

Se si hanno interposti alberi con buona densità, a patto che non siano privi di fogliame, si può usare la seguente relazione:

$$A_{e3} = 0,01 f^{\frac{1}{3}} r$$

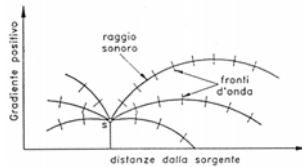
L'effetto è apprezzabile per distanze superiori ad alcune decine di metri e per frequenze sopra i 500 Hz.

**Disomogeneità, fluttuazioni**

Anzitutto va considerata l'influenza della temperatura. In presenza di un gradiente di temperatura varia la velocità del suono e quindi il fronte d'onda tenderà a piegarsi.



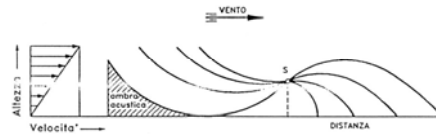
Quando, come capita normalmente, la temperatura diminuisce con la quota, il raggio sonoro si incurva verso l'alto e può creare delle ombre acustiche.



Talvolta si può avere inversione termica, ad esempio dopo una notte serena che raffredda bruscamente il suolo e solo indirettamente l'aria o al di sopra di una superficie ghiacciata.

In questo caso si creano condizioni molto favorevoli al rinforzo del suono, dato che il raggio sonoro tende ad incurvarsi verso il basso. E' sotto queste condizioni che capita di poter udire una normale conversazione anche a distanza di 1 km sopra un lago ghiacciato.

L'influenza del vento è molto simile: la sua velocità aumenta con la quota e la velocità di propagazione del suono si somma a quella del vento.

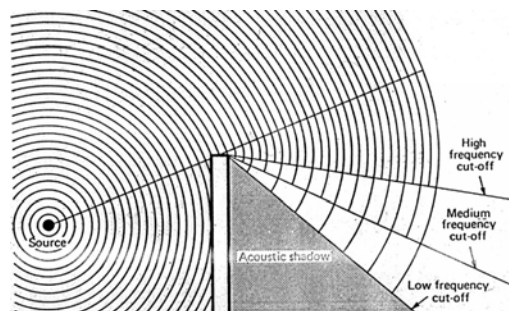


Sottovento il fronte d'onda si incurva verso l'alto e crea ombra acustica, sopravvento verso il basso e crea rinforzo.

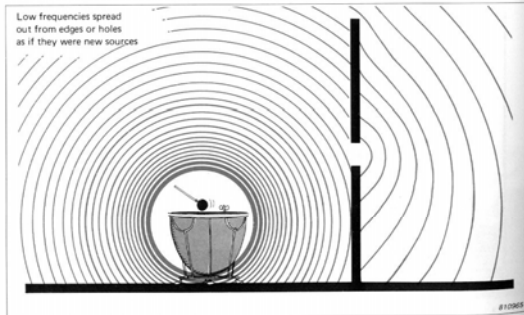
### Barriere acustiche

Una barriera acustica è costituita da un ostacolo di dimensioni grandi rispetto alla lunghezza d'onda del suono incidente: essa intercetta la linea di vista tra sorgente e ricevitore. Deve essere trascurabile il suono trasmesso direttamente attraverso di essa.

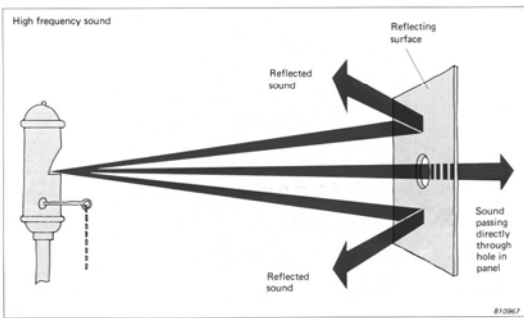
La barriera risulta particolarmente efficace in campo libero, mentre in campo riverberante il suo effetto può essere vanificato dalle riflessioni. A causa della diffrazione non vi è una schermatura netta nei confronti del suono, soprattutto per bassi valori della frequenza.



Il suono di bassa frequenza riesce ad aggirare le estremità di un ostacolo e a diffondersi attraverso forature senza perdere intensità e reirradiando di lì come una nuova sorgente in tutte le direzioni.



Un suono di alta frequenza viene riflesso da una superficie rigida come la luce da uno specchio e passa attraverso i fori come un raggio, senza diffusioni. Una barriera è efficace nei suoi confronti.



L'analisi teorica fornisce la seguente attenuazione:

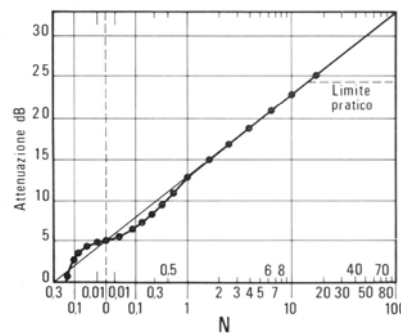
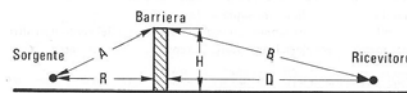
$$A_{barriera} = 20 \log \frac{\sqrt{2\pi N}}{\text{tgh} \sqrt{2\pi N}} + 5 \text{ dB per } N > 0$$

$N$  è il numero di Fresnel:

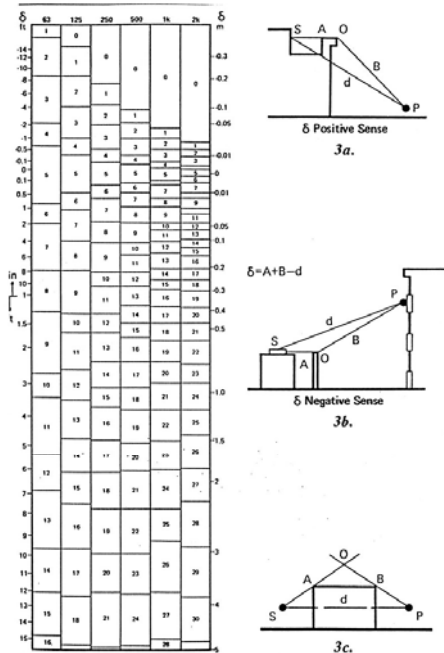
$$N = \frac{2}{\lambda} [(A + B) - (R + D)]$$

$A+B$  è il cammino più breve al di sopra della barriera, mentre  $R+D$  è la distanza in linea d'aria fra sorgente e osservatore.

Per  $-0,2 < N < 0$  nella relazione precedente si considera  $|N|$  ed anziché la tgh si considera la tangente trigonometrica.

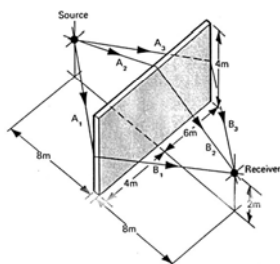


Il numero  $N$  ha segno negativo se l'osservatore è in grado di vedere la sorgente.  
 In tal caso l'attenuazione ottenibile è molto modesta.  
 All'attenuazione così calcolata va posto un limite pratico di 24 dB, difficile comunque da conseguire.  
 L'effetto di diffrazione si può ridurre con l'impiego di materiale fonoassorbente sulla superficie rivolta verso la sorgente e soprattutto verso la sommità della barriera.



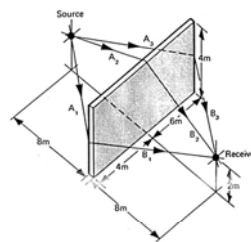
Qualora la barriera non si possa considerare uno schermo seminfinito, bisogna tener conto anche dei contributi laterali. Il trattamento fonoassorbente è particolarmente importante in ambiente semiriverberante.

La capacità fonoisolante della barriera dovrebbe essere superiore almeno di 5 dB all'attenuazione prevista. Questo corrisponde come minimo ad un foglio di compensato di 1 cm di spessore.  
 Più che essere molto pesante la barriera deve essere in grado se va posta all'aperto di resistere agli agenti atmosferici.



**Esempio numerico**

Una barriera  $4 \times 10 \text{ m}^2$  è posta a metà strada fra un osservatore e una piccola sorgente sonora distanti 16 m e a 2 m da terra, con la disposizione di figura. Si calcoli l'effetto schermante.



Percorso  $A_1+B_1=17,88 \text{ m}$

$A_2+B_2=16,49 \text{ m}$

$A_3+B_3=20 \text{ m}$        $\Delta_1=1,88 \text{ m}$      $\Delta_2=0,49 \text{ m}$      $\Delta_3=4 \text{ m}$

$A_1+B_1=$	17,88						
$A_2+B_2=$	16,49						
$A_3+B_3=$	20						
$R+D=$	16						
$f$	125	250	500	1000	2000	4000	Hz
$N_1$	1,38	2,74	5,51	11,03	22,05	44,11	
$A_1$	14,4	17,4	20,4	23,4	24,0	24,0	
$N_2$	0,36	0,72	1,44	2,87	5,75	11,50	
$A_2$	8,7	11,5	14,6	17,6	20,6	23,6	
$N_3$	2,93	5,87	11,73	23,46	46,92	93,84	
$A_3$	17,7	20,7	23,7	24,0	24,0	24,0	

Il calcolo dell'attenuazione possibile opera secondo il seguente schema:

$$A_1 = -10 \log \frac{I_1'}{I_1} \quad A_2 = -10 \log \frac{I_2'}{I_1} \quad \text{ecc.}$$

Ad esempio per  $A_1=14,4$  si ha  $I_1' = 10^{-1,44} = 0,036 I_1$

L'attenuazione totale è data da:

$$A_{tot} = -10 \log \frac{I_1' + I_2' + I_3'}{I_1} = -10 \log \left( 10^{-\frac{A_1}{10}} + 10^{-\frac{A_2}{10}} + 10^{-\frac{A_3}{10}} \right)$$

Si ricava infine la seguente attenuazione:

$f$	125	250	500	1000	2000	4000	Hz
$A_{tot}$	7,3	10,1	13,1	15,8	17,8	19,1	

Calcolare il livello della pressione sonora per un aereo di linea che vola a 1500 metri di distanza dall'osservatore ed il cui spettro in banda di ottava a 250 m è il seguente:

$f$	125	250	500	1000	2000	4000
$L_p$ dB	101	97	99	100	103	100

Si consideri aria alla temperatura di 0°C ed umidità relativa del 50%

Si esegue il calcolo alla frequenza di 1000 Hz.

L'attenuazione dovuta alla divergenza è data da:

$$A_{div} = 20 \log \frac{1500}{250} = 15,6 \text{ dB}$$

L'attenuazione per assorbimento atmosferico si calcola da:

$$A_{e1}(20^\circ\text{C}, 50\%) = 7,4 \frac{1000^2 \times 1500}{50} \times 10^{-8} = 2,22 \text{ dB} \quad \text{che poi va corretta da:}$$

$$A_{e1}(0^\circ\text{C}, 50\%) = \frac{2,22}{1 + 4 \times 10^{-6} (0 - 20) \times 1000} = 2,4 \text{ dB}$$

Il calcolo complessivo è fornito dalla tabella seguente:

$f$	125	250	500	1000	2000	4000	Hz
$L_p(250 \text{ m})$ dB	101	97	99	100	103	100	<b>108,2</b>
$A_{div}$	15,6	15,6	15,6	15,6	15,6	15,6	
$A_{e1}$	0,0	0,1	0,6	2,4	10,6	52,2	
$L_p(1500 \text{ m})$ dB solo div.	85,4	81,4	83,4	84,4	87,4	84,4	<b>92,6</b>
$L_p(1500 \text{ m})$ dB(A) solo div.	69,3	72,8	80,2	84,4	88,6	85,4	<b>91,7</b>
$L_p(1500 \text{ m})$ dB	85,4	81,3	82,9	82,0	76,9	32,2	<b>89,5</b>
pes. A	-16,1	-8,6	-3,2	0,0	1,2	1,0	
$L_p(1500 \text{ m})$ dB(A)	69,3	72,7	79,7	82,0	78,1	33,2	<b>85,4</b>

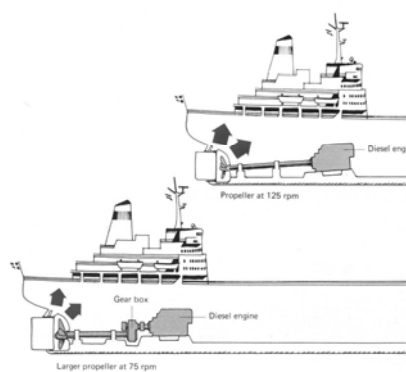
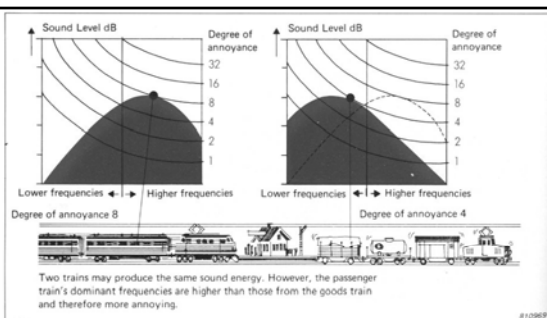
Da un livello  $L_p(250 \text{ m})=107,3 \text{ dB(A)}$  si passa a

$$L_p(1500 \text{ m})= 91,7 \text{ dB(A)} \text{ in assenza di attenuazione}$$

dovuta ad assorbimento atmosferico e a

$$L_p(1500 \text{ m})=85,3 \text{ dB(A)} \text{ in presenza.}$$

L'orecchio è più sensibile alle alte frequenze e in qualche caso è possibile ridurre il disturbo di un rumore proveniente da una sorgente vicina riconducendo l'energia sonora dominante alle basse frequenze.



Il rumore di alta frequenza viene molto attenuato dall'assorbimento nell'aria a differenza di quello di bassa frequenza. In qualche caso spostare la dominante del rumore sulle alte frequenze può risolvere problemi di immissioni rumorose nelle aree residenziali limitrofe ad aree industriali.

