

## 5 PROPAGAZIONE DEL SUONO IN AMBIENTE ESTERNO

Il livello di pressione sonora nel punto di ricezione conseguente all'immissione nell'ambiente di potenza sonora da parte di una sorgente, dipende da molteplici fattori legati sia alla tipologia di sorgente sonora che a fenomeni connessi alla propagazione del suono nel mezzo di propagazione.

Tali fenomeni vanno valutati attentamente per pervenire a corrette valutazioni del campo sonoro.

### 5.1 Campo acustico libero

Uno spazio in cui il suono generato da una sorgente si propaghi in modo illimitato senza discontinuità ed ostacoli è definito *campo libero*.

Il campo acustico prodotto da una sorgente in condizioni di campo libero può essere diviso in due regioni: il *campo vicino* ed il *campo lontano*.

Nella regione di campo vicino l'intensità sonora può avere un andamento complicato, dipendente dal tipo di sorgente e dalle sue dimensioni. In questa regione gli andamenti della pressione e della velocità delle particelle possono essere sfasati tra loro e l'impedenza acustica specifica assume un'espressione nel campo complesso; in questa regione inoltre le caratteristiche di direzionalità della sorgente vanno valutate con estrema cautela.

Nella regione di campo lontano la pressione e la velocità delle particelle sono in fase, l'impedenza acustica specifica assume valore reale e la direttività della sorgente è definita in modo univoco.

La condizione di campo lontano si realizza a distanze dalla sorgente che dipendono dalla lunghezza d'onda del suono; un punto posto ad una prefissata distanza dalla sorgente può allora trovarsi in una determinata frequenza in condizioni di campo vicino ed in altre frequenze in condizioni di campo lontano.

In generale le condizioni di campo lontano si realizzano quando sono contemporaneamente verificate le seguenti condizioni:

$$r \gg \frac{\lambda}{2\pi}, \quad r \gg L \quad (5.1)$$

in cui  $r$  è la distanza dalla sorgente,  $\lambda$  la lunghezza d'onda del suono ed  $L$  la più grande dimensione lineare della sorgente.

In condizioni di campo lontano le espressioni che consentono di determinare il campo sonoro assumono forme più semplici. Nel caso di propagazione in aria, in condizioni standard, è inoltre possibile trovare una importante relazione tra livello di intensità e livello di pressione acustica.

A tal fine si ipotizzi di esprimere l'intensità acustica media nella direzione di propagazione dell'onda in condizioni di campo lontano, utilizzando la relazione già vista in precedenza (vedi Acustica fisica, Intensità acustica):

$$I = \frac{p_{eff}^2}{\rho_0 c} \quad (5.2)$$

Dividendo ambo i membri per la quantità:

$$I_0 p_0^2$$

in cui  $I_0 = 10^{-12} \text{ W/m}^2$  è l'intensità di riferimento e  $p_0 = 20 \mu\text{Pa}$  è la pressione di riferimento, si ottiene:

$$\frac{I}{I_0 p_0^2} = \frac{p_{eff}^2}{I_0 p_0^2 \rho_0 c} \quad (5.3)$$

Passando quindi ai logaritmi si ha:

$$10 \log_{10} \left( \frac{I}{I_0} \right) = 10 \log_{10} \left( \frac{p_{eff}^2}{p_0^2} \right) + 10 \log_{10} \left( \frac{p_0^2}{I_0 \rho_0 c} \right) \quad (5.4)$$

e, dalla definizione di livello di intensità e di livello di pressione:

$$L_I = L_p + 10 \log_{10} \left( \frac{p_0^2}{I_0 \rho_0 c} \right) \quad (5.5)$$

In condizioni standard ( $p = 1,013 \times 10^5 \text{ Pa}$ ;  $t = 20^\circ \text{C}$ ) si ha però che:

$$\frac{p_0^2}{I_0 \rho_0 c} = \frac{(20 \times 10^{-12} \text{ Pa})^2}{10^{-12} \text{ W/m}^2 400 \text{ rayl}} \approx 1 \quad (5.6)$$

per cui l'espressione (5.5) si semplifica nella seguente:

$$L_I = L_p \quad (5.7)$$

Per propagazione in aria in condizioni standard si ha allora che il livello di intensità acustica coincide con il livello di pressione acustica.

### 5.1.1 Propagazione piana

In generale il livello di pressione sonora prodotta da una sorgente di potenza acustica nota, ad una prefissata distanza dalla sorgente, dipende dalla tipologia di propagazione.

Per determinare la relazione che lega il livello di intensità acustica con il livello di potenza acustica, per una propagazione per onde piane, si faccia riferimento ad una sorgente piana che emetta fronti d'onda piani nella direzione di propagazione del suono quale, ad esempio, quella riportata in Figura 5.1.

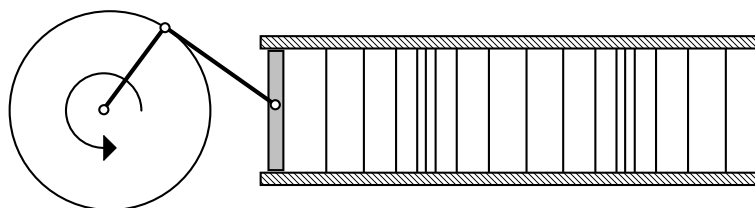


Figura 5.1. Esempio di sistema con propagazione per onde piane.

In generale è possibile esprimere l'intensità acustica con la relazione:

$$I = \frac{W}{S} \quad (5.8)$$

in cui  $W$  è la potenza acustica della sorgente ed  $S$  è la superficie attraverso la quale avviene la propagazione sonora.

Dividendo ambo i membri per l'intensità di riferimento  $I_0 = 10^{-12} \text{ W/m}^2$  si ottiene:

$$\frac{I}{I_0} = \frac{W}{S I_0} \quad (5.9)$$

Esprimendo quindi l'intensità di riferimento come rapporto tra la potenza di riferimento,  $W_0=10^{-12}$  W, e la superficie unitaria,  $S_0=1$  m<sup>2</sup>, si ha:

$$\frac{I}{I_0} = \frac{W S_0}{S W_0} \quad (5.10)$$

A questo punto, passando ai logaritmi, si ottiene

$$10 \log_{10} \left( \frac{I}{I_0} \right) = 10 \log_{10} \left( \frac{W}{W_0} \right) + 10 \log_{10} \left( \frac{S_0}{S} \right) \quad (5.11)$$

e, dalla definizione di livello:

$$L_I = L_W - 10 \log_{10} S \quad (5.12)$$

Ricordando infine la relazione (5.7), si ottiene:

$$L_p = L_W - 10 \log_{10} S \quad (5.13)$$

Dall'esame della precedente relazione si ricava che il livello di pressione sonora prodotto da una sorgente piana di noto livello di potenza acustica è indipendente dalla distanza.

### 5.1.2 Propagazione sferica

Si ipotizzi di essere in presenza di una sfera pulsante, cioè una sorgente sonora avente forma di una sfera che periodicamente modifica il proprio raggio espandendosi e contraendosi, senza tuttavia modificare la sua forma sferica; un tale tipo di sorgente acustica emette uniformemente nell'ambiente circostante secondo fronti d'onda sferici (Figura 5.2).

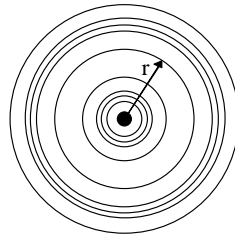


Figura 5.2. Fronti d'onda prodotti da una sfera pulsante.

Anche in questo caso sarà possibile esprimere l'intensità acustica con la relazione:

$$I = \frac{W}{S} \quad (5.14)$$

e, poiché i fronti d'onda si propagano attraverso superfici sferiche, alla distanza  $r$  dalla sorgente si avrà:

$$I = \frac{W}{4\pi r^2} \quad (5.15)$$

Dividendo ambo i membri per l'intensità di riferimento  $I_0=10^{-12}$  W/m<sup>2</sup> si ottiene:

$$\frac{I}{I_0} = \frac{W}{4\pi r^2 I_0} \quad (5.16)$$

Esprimendo quindi l'intensità di riferimento,  $I_0=10^{-12}$  W/m<sup>2</sup>, come rapporto tra la potenza di riferimento,  $W_0=10^{-12}$  W, e la superficie unitaria,  $S_0=1$  m<sup>2</sup>, si ha:

$$\frac{I}{I_0} = \frac{W S_0}{4\pi r^2 W_0} \quad (5.17)$$

e, passando ai logaritmi, si ottiene:

$$10 \log_{10} \left( \frac{I}{I_0} \right) = 10 \log_{10} \left( \frac{W}{W_0} \right) + 10 \log_{10} \left( \frac{S_0}{4\pi r^2} \right) \quad (5.18)$$

Infine, dalla definizione di livello, si ha:

$$L_I = L_w + 10 \log_{10} S_0 - 10 \log_{10} r^2 - 10 \log_{10} (4\pi) \quad (5.19)$$

che può essere riscritta nella forma:

$$L_I = L_w - 20 \log_{10} r - 11 \quad (5.20)$$

Nell'ipotesi di trovarsi a sufficiente distanza dalla sorgente, in campo lontano, è possibile esprimere l'intensità di energia in funzione della pressione efficace, con la relazione (5.2), valida nelle condizioni di propagazione per onde piane; se ci si trova in condizioni standard ( $\rho = 1,013 \times 10^5 \text{ Pa}$ ;  $t = 20^\circ\text{C}$ ) è possibile inoltre utilizzare la relazione (5.7).

Sotto queste ipotesi è allora possibile esprimere il livello di pressione efficace con la:

$$L_p = L_w - 20 \log_{10} r - 11 \quad (5.21)$$

Dall'esame della precedente relazione si ricava che il livello di pressione sonora prodotto da una sorgente sferica di noto livello di potenza acustica si attenua con la distanza; in particolare si può ricavare che l'attenuazione è pari a 6 dB per ogni raddoppio della distanza.

### 5.1.3 Propagazione cilindrica

Si ipotizzi di essere in presenza di un cilindro pulsante, cioè una sorgente sonora avente forma di un cilindro che periodicamente modifica il proprio raggio espandendosi e contraendosi, senza tuttavia modificare la sua forma; un tale tipo di sorgente acustica può essere assimilata ad una sorgente lineare che emette uniformemente nell'ambiente circostante secondo fronti d'onda cilindrici (Figura 5.2).

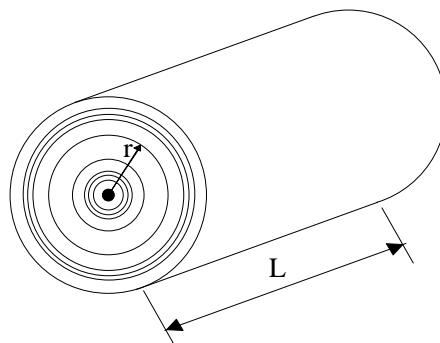


Figura 5.3. Fronti d'onda prodotti da un cilindro pulsante.

A partire dall'intensità acustica, espressa con la relazione:

$$I = \frac{W}{S} \quad (5.22)$$

poiché i fronti d'onda si propagano attraverso superfici cilindriche, alla distanza  $r$  dalla sorgente si avrà:

$$I = \frac{W}{2\pi rL} \quad (5.23)$$

Dividendo ambo i membri per l'intensità di riferimento  $I_0=10^{-12} \text{ W/m}^2$  si ottiene:

$$\frac{I}{I_0} = \frac{W}{2\pi rLI_0} \quad (5.24)$$

Esprimendo quindi l'intensità di riferimento come rapporto tra la potenza di riferimento,  $W_0=10^{-12} \text{ W}$ , e la superficie unitaria,  $S_0=1 \text{ m}^2$ , si ha:

$$\frac{I}{I_0} = \frac{W S_0}{2\pi rLW_0} \quad (5.25)$$

Passando ai logaritmi, si ottiene allora:

$$10\log_{10}\left(\frac{I}{I_0}\right) = 10\log_{10}\left(\frac{W}{W_0L}\right) + 10\log_{10}\left(\frac{S_0}{2\pi r}\right) \quad (5.26)$$

e, dalla definizione di livello:

$$L_I = L_{W,L} + 10\log_{10} S_0 - 10\log_{10} r - 10\log_{10} (2\pi) \quad (5.27)$$

che può essere riscritta nella forma:

$$L_I = L_{W,L} - 10\log_{10} r - 8 \quad (5.28)$$

in cui  $L_{W,L}$  è la potenza acustica per unità di lunghezza.

Nell'ipotesi di trovarsi a sufficiente distanza dalla sorgente, in campo lontano, è possibile esprimere l'intensità di energia in funzione della pressione efficace, con la relazione (5.2), valida nelle condizioni di propagazione per onde piane; se ci si trova inoltre in condizioni standard ( $p=1,013 \times 10^5 \text{ Pa}$ ;  $t=20^\circ\text{C}$ ) è possibile inoltre utilizzare la relazione (5.7).

Sotto queste ipotesi è allora possibile esprimere il livello di pressione efficace con la:

$$L_p = L_{W,L} - 10\log_{10} r - 8 \quad (5.29)$$

Dall'esame della precedente relazione risulta che il livello di pressione sonora prodotto da una sorgente lineare di noto livello di potenza acustica si attenua con la distanza, con un'attenuazione pari a 3 dB per ogni raddoppio della distanza.

## 5.2 Direttività di una sorgente

Fino al momento sono state prese in considerazione sorgenti acustiche che emettono uniformemente nello spazio circostante. Tali sorgenti sono dette omnidirezionali. Tuttavia spesso ci si trova in presenza di sorgenti acustiche direttive, per le quali vi sono alcune direzioni in cui l'emissione è maggiore rispetto ad altre.

Per quantificare analiticamente la caratteristiche di direzionalità di una sorgente ci si riferisce ad un parametro detto direttività,  $Q$ , definito come il rapporto tra il quadrato della pressione efficace prodotta dalla sorgente reale in un punto ed il quadrato della pressione efficace che si avrebbe nello stesso punto se la sorgente fosse non direttiva:

$$Q = \frac{p_{eff}^2}{p_{eff,ND}^2} \quad (5.30)$$

La direttività può anche essere espressa in termini di intensità con la seguente equazione:

$$Q = \frac{I}{I_{ND}} \quad (5.31)$$

Inoltre, poiché si ha:

$$L_p = 10 \log_{10} \frac{p_{eff}^2}{p_0^2} \quad e \quad L_{p,ND} = 10 \log_{10} \frac{p_{eff,ND}^2}{p_0^2} \quad (5.32)$$

è possibile ricavare le quantità:

$$\frac{p_{eff}^2}{p_0^2} = 10^{\frac{L_p}{10}} \quad e \quad \frac{p_{eff,ND}^2}{p_0^2} = 10^{\frac{L_{p,ND}}{10}} \quad (5.33)$$

Dal loro rapporto si ottiene quindi:

$$\frac{p_{eff}^2}{p_0^2} \frac{p_0^2}{p_{eff,ND}^2} = \frac{10^{\frac{L_p}{10}}}{10^{\frac{L_{p,ND}}{10}}} \quad (5.34)$$

da cui si ricava un'altra definizione della direttività, espressa in termini di livelli acustici:

$$Q = 10^{\frac{L_p - L_{p,ND}}{10}} \quad (5.35)$$

Dalla direttività si ricava l'indice di direttività,  $DI$ , con la relazione:

$$DI = 10 \log_{10} Q = 10 \log_{10} 10^{\frac{L_p - L_{p,ND}}{10}} = L_p - L_{p,ND} \quad (5.36)$$

Dalla definizione di indice di direttività si ricava inoltre la seguente relazione:

$$L_p = L_{p,ND} + DI \quad (5.37)$$

Il livello di una sorgente sonora direttiva in un punto è dato dal livello che si avrebbe se la sorgente fosse stata non direttiva sommato all'indice di direttività nella direzione che unisce la sorgente con il ricevitore.

La direttività di una sorgente dipende dalla direzione ed è funzione della frequenza; in generale, le sorgenti sonore possono essere considerate non direttive alle basse frequenze, fino a che le loro dimensioni sono piccole rispetto alla lunghezza d'onda del suono emesso, mentre diventano direttive all'aumentare della frequenza.

### 5.3 Presenza di superfici riflettenti

La direttività di una sorgente omnidirezionale in campo libero vale 1. Tuttavia la presenza di superfici riflettenti modifica la direttività delle sorgenti, perché esse sono costrette ad emettere in uno spazio limitato anziché nell'intero spazio circostante.

Ad esempio nel caso di una sorgente omnidirezionale posta su una superficie piana riflettente (Figura 5.4), dalla relazione (5.31) si ha:

$$Q = \frac{I}{I_{ND}} = \frac{\frac{W}{A}}{\frac{W}{A_{ND}}} \quad (5.38)$$

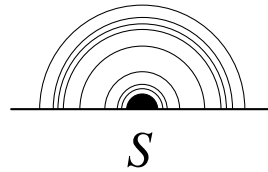


Figura 5.4. Sorgente omnidirezionale su superficie piana riflettente.

Ma lo spazio verso cui una sorgente posta su una superficie piana può emettere è il semispazio libero; quindi si avrà:

$$A = 2\pi r^2 \quad A_{ND} = 4\pi r^2 \quad (5.39)$$

Di conseguenza la direttività risulterà:

$$Q = \frac{W}{A} \frac{A_{ND}}{W} = \frac{W \cdot 4\pi r^2}{W_{nd} \cdot 2\pi r^2} = 2 \quad (5.40)$$

e l'indice di direttività sarà:

$$DI = 10\log_{10} Q = 10\log_{10} 2 = 3 \quad (5.41)$$

In maniera analoga, se la sorgente si trova all'intersezione di due superfici piane riflettenti (Figura 5.5), si avrà:

$$Q = \frac{W}{A} \frac{A_{ND}}{W} = \frac{W \cdot 4\pi r^2}{W_{nd} \cdot \pi r^2} = 4 \quad (5.42)$$

e l'indice di direttività sarà:

$$DI = 10\log_{10} Q = 10\log_{10} 4 = 6 \quad (5.43)$$

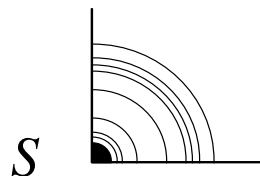


Figura 5.5. Sorgente omnidirezionale all'intersezione di due superfici piane riflettenti.

Infine, per una sorgente posta all'intersezione di tre superfici riflettenti (Figura 5.6), si avrà:

$$Q = \frac{W}{A} \frac{A_{ND}}{W} = \frac{W \cdot 4\pi r^2}{W_{nd} \cdot \frac{\pi r^2}{2}} = 8 \quad (5.44)$$

e:

$$DI = 10\log_{10} Q = 10\log_{10} 8 = 9 \quad (5.45)$$

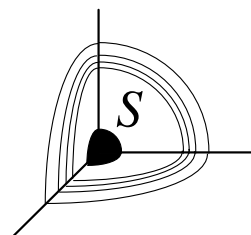


Figura 5.6. Sorgente omnidirezionale all'intersezione di tre superfici piane riflettenti.

## 5.4 Casi particolari di propagazione acustica

Oltre ai casi di propagazione acustica visti in precedenza possono verificarsi condizioni particolari in presenza di superfici riflettenti, di sorgenti in movimento, di sorgenti di lunghezza finita. Può anche verificarsi che per una stessa sorgente debbano essere utilizzate relazioni di propagazione differenti, in relazione alle dimensioni della sorgente rispetto alla distanza sorgente ricevitore. Nel seguito verranno allora illustrate alcune di queste particolari condizioni di propagazione e verranno ricavate delle specifiche relazioni per la determinazione dei livelli.

### 5.4.1 Propagazione semisferica e semicilindrica

Facendo riferimento a quanto ricavato al paragrafo 5.3, è possibile scrivere alcune relazioni valide per una sorgente puntiforme o per una sorgente lineare poste su una vasta superficie piana.

Nel primo caso, detto di propagazione semisferica, facendo riferimento alle relazioni (5.21) e (5.37) e ricordando che, per una sorgente su superficie piana riflettente, l'indice di direttività vale 3 dB, si ha:

$$L_p = L_w - 20 \log_{10} r - 11 + DI \quad (5.46)$$

$$L_p = L_w - 20 \log_{10} r - 8 \quad (5.47)$$

Nel secondo caso, detto di propagazione semicilindrica, si ha invece:

$$L_p = L_w - 10 \log_{10} r - 8 + DI \quad (5.48)$$

$$L_p = L_w - 10 \log_{10} r - 5 \quad (5.49)$$

### 5.4.2 Distribuzione lineare, discreta, di sorgenti puntiformi fisse

Si ipotizzi di essere in presenza di una distribuzione lineare, discreta, di sorgenti puntiformi fisse, come quella rappresentata in Figura 5.7; si ipotizzi inoltre che le sorgenti emettano con la stessa potenza acustica,  $W$ .

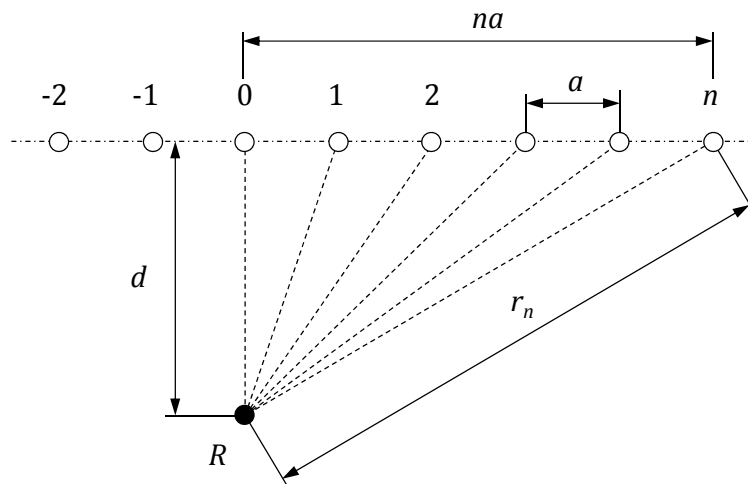


Figura 5.7. Distribuzione lineare, discreta, di sorgenti puntiformi fisse.

La  $n$ -esima sorgente acustica produrrà al ricevitore  $R$  una perturbazione acustica con intensità pari a:

$$I_n = \frac{W}{4\pi r_n^2} \quad (5.50)$$

in cui  $r_n$  è la distanza tra la sorgente  $n$ -esima ed il ricevitore.



L'intensità totale prodotta al ricevitore da tutte le sorgenti acustiche sarà:

$$I_T = \sum_{-\infty}^{+\infty} I_n = \sum_{-\infty}^{+\infty} \frac{W}{4\pi r_n^2} \quad (5.51)$$

e poiché:

$$r_n^2 = d^2 + n^2 a^2 \quad (5.52)$$

si avrà:

$$I_T = \frac{W}{4\pi} \sum_{-\infty}^{+\infty} \frac{1}{d^2 + n^2 a^2} \quad (5.53)$$

La (5.53) converge alla seguente equazione:

$$I_T = \frac{W}{4ad} \coth \frac{\pi d}{a} \quad (5.54)$$

che esprime pertanto l'intensità acustica complessiva prodotta da tutte le sorgenti puntiformi.

Facendo riferimento all'equazione generale (5.54), si possono verificare due casi estremi, in relazione al rapporto a/d.

Infatti nel caso in cui  $a \ll d$  si ha:

$$\coth \frac{\pi d}{a} \rightarrow 1 \quad (5.55)$$

e quindi:

$$I_T = \frac{W}{4ad} \quad (5.56)$$

che, in termini di livelli acustici, diventa:

$$L_I = L_W - 10 \log_{10} d - 10 \log_{10} 4a \quad (5.57)$$

In questo caso la propagazione può essere ipotizzata di tipo cilindrico.

Nel caso opposto in cui  $a \gg d$  si ha invece:

$$\coth \frac{\pi d}{a} \rightarrow \frac{a}{\pi d} \quad (5.58)$$

e quindi:

$$I_T = \frac{W}{4\pi d^2} \quad (5.59)$$

che, in termini di livelli acustici, diventa:

$$L_I = L_W - 20 \log_{10} d - 11 \quad (5.60)$$

In questo caso si ha pertanto una propagazione di tipo sferico.

### 5.4.3 Sorgente puntiforme, in movimento

Si consideri una sorgente sonora puntiforme, di potenza acustica  $W$ , che si muova di moto rettilineo con velocità costante,  $v$  (Figura 5.8).

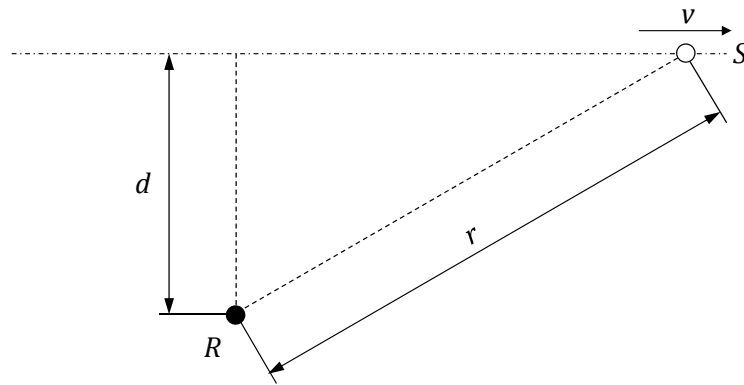


Figura 5.8. Sorgente puntiforme, in movimento.

In un istante generico il livello di intensità al ricevitore sarà pari a:

$$L_I = L_w - 10 \log_{10} r^2 - 11 \quad (5.61)$$

e potrà essere anche scritto come:

$$L_I(t) = L_w - 10 \log_{10} (d^2 + v^2 t^2) - 11 \quad (5.62)$$

È possibile ricavare un'altra espressione in funzione del livello massimo, che si registra quando la sorgente si trova alla minima distanza dal ricevitore, al tempo  $t=0$ . Si avrà:

$$L_{\max} = L_w - 10 \log_{10} d^2 - 11 \quad (5.63)$$

Dalla precedente equazione si può ricavare il livello di potenza acustica della sorgente:

$$L_w = L_{\max} + 10 \log_{10} d^2 + 11 \quad (5.64)$$

e sostituirlo nell'eq. (5.62):

$$L_I = L_{\max} + 10 \log_{10} d^2 + 11 - 10 \log_{10} (d^2 + v^2 t^2) - 11 \quad (5.65)$$

ottenendo l'andamento del livello nel tempo in relazione al livello massimo:

$$L_I(t) = L_{\max} - 10 \log_{10} \left( \frac{d^2 + v^2 t^2}{d^2} \right) \quad (5.66)$$

#### 5.4.4 Sorgente lineare, continua, finita, fissa

Si consideri una sorgente acustica lineare, continua, finita, fissa, disposta come riportato in Figura 5.9.

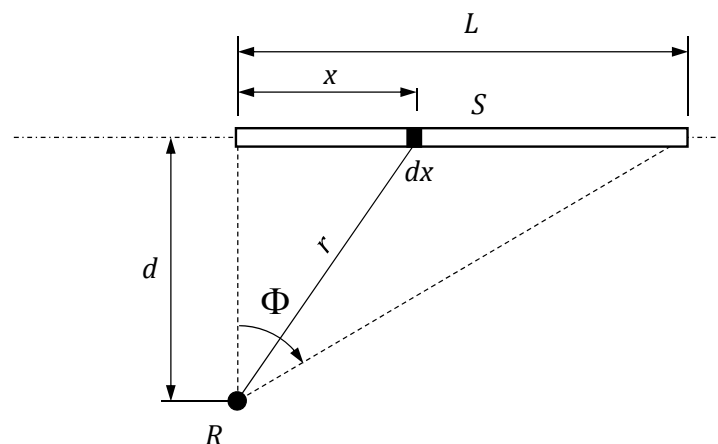


Figura 5.9. Sorgente lineare, continua, finita, fissa.

È possibile esprimere la potenza acustica di un elemento infinitesimo appartenente alla sorgente con la relazione:

$$dW = \frac{W}{L} dx \quad (5.67)$$

e, nell'ipotesi che esso possa considerarsi come una sorgente puntiforme, esprimere l'intensità infinitesima con la:

$$dI = \frac{dW}{A} = \frac{W}{L} \times \frac{1}{4\pi r^2} dx = \frac{W}{4\pi r^2 L} \times \frac{dx}{d^2 + x^2} \quad (5.68)$$

L'intensità totale si otterrà integrando, su tutta la lunghezza della sorgente, l'intensità infinitesima:

$$I = \int_0^L dI = \int_0^L \frac{W}{4\pi r^2 L} \times \frac{dx}{d^2 + x^2} = \frac{W}{4\pi L} \int_0^L \frac{dx}{d^2 + x^2} \quad (5.69)$$

Si ottiene:

$$I = \frac{W}{4\pi L d} \arctan \frac{L}{d} = \frac{W}{4\pi L d} \Phi \quad (5.70)$$

e, in termini di livello:

$$L_I = L_{W,L} + 10 \log_{10} \frac{\Phi}{d} - 11 \quad (5.71)$$

Facendo riferimento all'equazione generale (5.70), si possono verificare due casi estremi, in relazione al rapporto L/d.

Nel caso in cui  $L \gg d$  si ha:

$$\Phi \rightarrow \frac{\pi}{2} \quad (5.72)$$

e quindi:

$$I = \frac{W}{8Ld} \quad (5.73)$$

che, in termini di livelli acustici, diventa:

$$L_I = L_{W,L} - 10 \log_{10} d - 9 \quad (5.74)$$

In questo caso la propagazione può essere ipotizzata di tipo cilindrico.

Nel caso opposto, in cui  $L \ll d$ , si ha invece:

$$\Phi \rightarrow \frac{L}{d} \quad (5.75)$$

e quindi:

$$I = \frac{W}{4\pi d^2} \quad (5.76)$$

che, in termini di livelli acustici, diventa:

$$L_I = L_W - 20 \log_{10} d - 11 \quad (5.77)$$

In questo caso si ha invece una propagazione di tipo sferico.

La relazione (5.70) può anche essere utilizzata per una sorgente lineare disposta come in Figura 5.10.

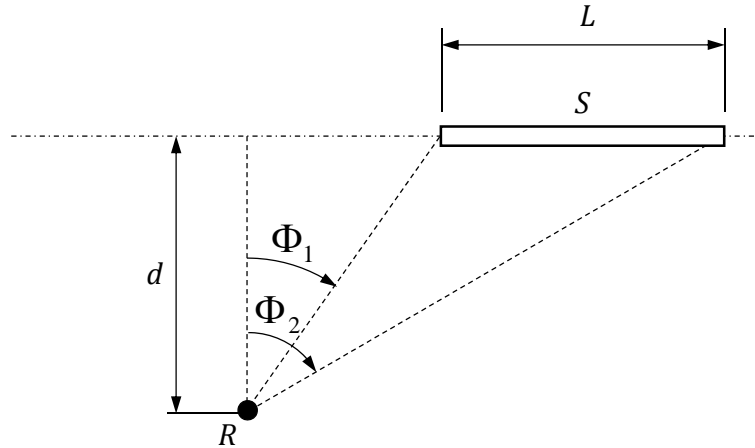


Figura 5.10. Sorgente lineare, continua, finita, fissa.

In questo caso si avrà:

$$I = \frac{W}{4\pi Ld} (\Phi_2 - \Phi_1) \quad (5.78)$$

e, in termini di livello:

$$L_I = L_{W,L} + 10 \log_{10} \frac{\Phi_2 - \Phi_1}{d} - 11 \quad (5.79)$$

#### 5.4.5 Sorgente lineare, continua, finita, in movimento

Si consideri la sorgente lineare, finita riportata in e si ipotizzi che sia in movimento con velocità  $v$ .

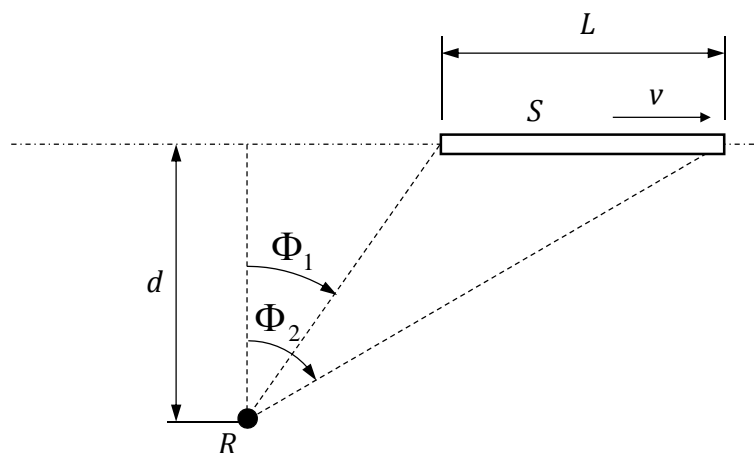


Figura 5.11. Sorgente lineare, continua, finita, in movimento.

Utilizzando la relazione (5.79) ed esprimendo i due angoli con le relazioni:

$$\Phi_1 = \arctan \frac{vt}{d}; \quad \Phi_2 = \arctan \frac{vt + L}{d} \quad (5.80)$$

si otterrà:

$$I = \frac{W}{4\pi Ld} (\Phi_2 - \Phi_1) = \frac{W}{4\pi Ld} \left( \arctan \frac{vt+L}{d} - \arctan \frac{vt}{d} \right) \quad (5.81)$$

L'intensità massima si avrà al tempo  $t=0$  in cui sarà:

$$I = \frac{W}{4\pi Ld} \arctan \frac{L}{d} \quad (5.82)$$

e si attenuerà allo scorrere del tempo fino ad annullarsi per  $t \rightarrow \infty$  in cui si verificherà:

$$\arctan \frac{vt+L}{d} \cong \arctan \frac{vt}{d} \quad (5.83)$$

## 5.5 Attenuazioni acustiche

In campo libero all'attenuazione che si produce all'aumentare della distanza tra sorgente e ricevitore, dovuta alla divergenza geometrica delle onde, si aggiungono ulteriori attenuazioni dovute a molteplici condizioni ambientali.

Nel caso più generale è possibile esprimere il livello di pressione con la relazione:

$$L_p = L_w + DI - \sum A_i \quad (5.84)$$

in cui:

- $L_w$  è il livello di potenza acustica della sorgente;
- $DI$  è l'indice di direttività della sorgente;
- $A_i$  è il termine dovuto all' $i$ -esima attenuazione.

Oltre all'attenuazione dovuta alla divergenza geometrica, le principali attenuazioni che si possono verificare in campo esterno sono dovute a:

- impedenza acustica dell'aria;
- assorbimento atmosferico;
- condizioni meteorologiche;
- effetto suolo;
- presenza di ostacoli.

Poiché in generale le attenuazioni dipendono dalla frequenza, il livello di pressione sonora dovrà essere calcolato almeno per le otto bande di ottava con frequenze centrali comprese tra 63 Hz e 8 kHz. Il livello complessivo ponderato  $A$ , sarà poi ottenuto con la relazione:

$$L_{Ap} = \sum_{i=1}^8 10^{0,1(L_i+P_i)} \quad (5.85)$$

in cui:

- $L_i$  è il livello di pressione valutato nell' $i$ -esima banda di frequenza;
- $P_i$  è il valore di ponderazione.

### 5.5.1 Divergenza geometrica

Come già visto in precedenza, l'attenuazione dovuta alla divergenza geometrica dipende dal tipo di propagazione. Ad esempio, nel caso di propagazione sferica, si ha:

$$A_{div} = 20 \log_{10} r + 11 \quad (5.86)$$

con  $r$  distanza sorgente-ricevitore.

Viceversa nel caso di propagazione cilindrica si ha:

$$A_{div} = 10 \log_{10} r + 8 \quad (5.87)$$

### 5.5.2 Impedenza acustica dell'aria

Si è visto con l'eq. (5.5) la relazione tra livello di intensità e livello di pressione:

$$L_I = L_p + 10 \log_{10} \left( \frac{p_0^2}{I_0 \rho_0 c} \right) \quad (5.88)$$

In condizioni standard ( $p = 1,013 \times 10^5$  Pa;  $t = 20^\circ\text{C}$ ) il termine:

$$10 \log_{10} \left( \frac{p_0^2}{I_0 \rho_0 c} \right)$$

può essere trascurato, ma in condizioni di pressione e temperatura dell'aria diverse può assumere valori significativi, per cui andrà valutata una correzione dovuta all'impedenza acustica dell'aria che può essere considerata come un'attenuazione:

$$A_{imp} = 10 \log_{10} \left( \frac{p_0^2}{I_0 \rho_0 c} \right) \quad (5.89)$$

### 5.5.3 Assorbimento atmosferico

Le onde acustiche, propagandosi nel mezzo, cedono parte della loro energia in misura tanto maggiore quanto più grande è la distanza percorsa e più alta è la frequenza del suono.

L'attenuazione dovuta all'assorbimento atmosferico è ricavabile dall'equazione:

$$A_{atm} = \frac{\alpha r}{1000} \quad (5.90)$$

dove  $\alpha$  è il coefficiente di assorbimento atmosferico, in decibel al chilometro, alla frequenza centrale di ciascuna banda di ottava ed  $r$  è la distanza tra sorgente e ricevitore, in metri. Alcuni valori del coefficiente di assorbimento atmosferico sono riportati in Tabella 5.1 e in Tabella 5.2.

Tabella 5.1. Coefficiente di assorbimento atmosferico in dB/km, per bande di ottava da 63 a 8000 Hz.

Temperatura °C	Umidità relativa %	Frequenza centrale Hz							
		63	125	250	500	1000	2000	4000	8000
10	70	0,1	0,4	1,0	1,9	3,7	9,7	32,8	117,0
20	70	0,1	0,3	1,1	2,8	5,0	9,0	22,9	76,6
30	70	0,1	0,3	1,0	3,1	7,4	12,7	23,1	59,3
15	20	0,3	0,6	1,2	2,7	8,2	28,2	88,8	202,0
15	50	0,1	0,5	1,2	2,2	4,2	10,8	36,2	129,0
15	80	0,1	0,3	1,1	2,4	4,1	8,3	23,7	82,8

Tabella 5.2. Coefficiente di assorbimento atmosferico in dB/km, per bande di ottava da 125 a 4000 Hz.

Temperatura °C	Umidità relativa %	Frequenza centrale Hz					
		125	250	500	1000	2000	4000
30	10	0.96	1.8	3.4	8.7	29	96
	20	0.73	1.9	3.4	6.0	15	47
	30	0.54	1.7	3.7	6.2	12	33
	50	0.35	1.3	3.6	7.0	12	25
	70	0.26	0.96	3.1	7.4	13	23
	90	0.20	0.78	2.7	7.3	14	24
20	10	0.78	1.6	4.3	14	45	109
	20	0.71	1.4	2.6	6.5	22	74
	30	0.62	1.4	2.5	5.0	14	49
	50	0.45	1.3	2.7	4.7	9.9	29
	70	0.34	1.1	2.8	5.0	9.0	23
	90	0.27	0.97	2.7	5.3	9.1	20
10	10	0.79	2.3	7.5	22	42	57
	20	0.58	1.2	3.3	11	36	92
	30	0.55	1.1	2.3	6.8	24	77
	50	0.49	1.1	1.9	4.3	13	47
	70	0.41	1.0	1.9	3.7	9.7	33
	90	0.35	1.0	2.0	3.5	8.1	26
0	10	1.3	4.0	9.3	14	17	19
	20	0.61	1.9	6.2	18	35	47
	30	0.47	1.2	3.7	13	36	69
	50	0.41	0.82	2.1	6.8	24	71
	70	0.39	0.76	1.6	4.6	16	56
	90	0.38	0.76	1.5	3.7	12	43

### 5.5.4 Effetto suolo

In generale si potrebbe assumere che la presenza di suolo rigido comporti un incremento del livello di pressione sonora. Infatti, facendo riferimento alla Figura 5.12, è possibile individuare un percorso che, partendo dalla sorgente, raggiunge direttamente il ricevitore ed un percorso che raggiunge il ricevitore dopo una riflessione sul suolo.

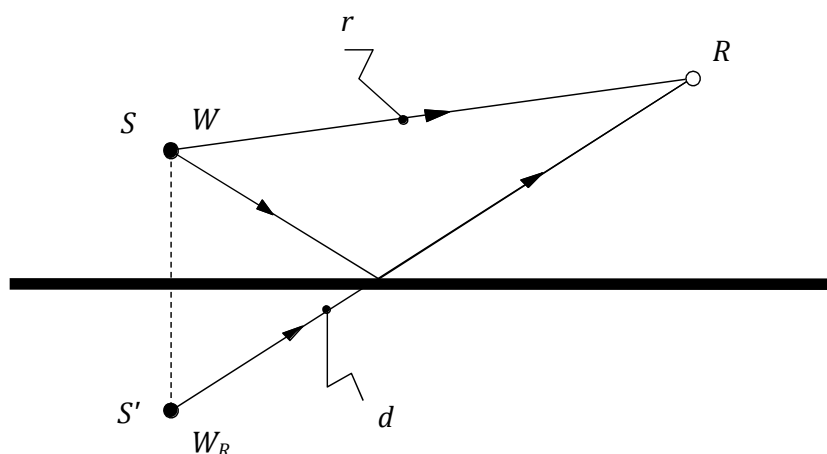


Figura 5.12. Percorsi acustici tra sorgente e ricevitore in presenza del suolo.

Utilizzando il metodo delle sorgenti immagine, il livello al ricevitore sarà dato dalla somma del contributo diretto, proveniente dalla sorgente con potenza acustica  $W$ ,

$$L_{p,D} = L_w - 20 \log_{10} r - 11 \quad (5.91)$$

e del contributo proveniente dalla sorgente immagine con potenza acustica  $\rho W$ , con  $\rho$  coefficiente di riflessione acustica del suolo:

$$L_{p,R} = L_w + 10 \log_{10} \rho - 20 \log_{10} d - 11 \quad (5.92)$$

Complessivamente si avrà:

$$L_p = 10 \log_{10} \left( 10^{0,1L_{p,D}} + 10^{0,1L_{p,R}} \right) \quad (5.93)$$

Si avrà allora che la presenza di suolo rigido ( $\rho=1$ ), comporterà un incremento del livello di pressione di circa 3 dB, mentre un terreno morbido ( $\rho=0$ ) non comporterà nessun effetto.

In realtà il fenomeno è molto più complesso ed è legato alla contemporanea presenza di un'onda diretta, di un'onda riflessa e di un'onda di terra, o di superficie, che dipende dall'impedenza acustica del suolo e dalla frequenza del suono. A grande distanza e/o alta frequenza le tre onde coesistono ed interferiscono tra loro in modo costruttivo o distruttivo in base all'angolo di incidenza sul suolo, alla differenza di cammino tra l'onda diretta e riflessa ed alla frequenza del suono.

Nel seguito viene presentato un metodo di calcolo dell'effetto suolo, tratto dalla UNI ISO 9613:2006, applicabile soltanto a terreni quasi piani, sia in orizzontale che con pendenza costante.

Per determinare l'effetto del suolo si individuano tre distinte zone (Figura 5.13), che dipendono dall'altezza della sorgente,  $h_s$ , dall'altezza del ricevitore,  $h_r$ , e dalla distanza tra sorgente e ricevitore in proiezione sul piano del suolo,  $d_p$ .

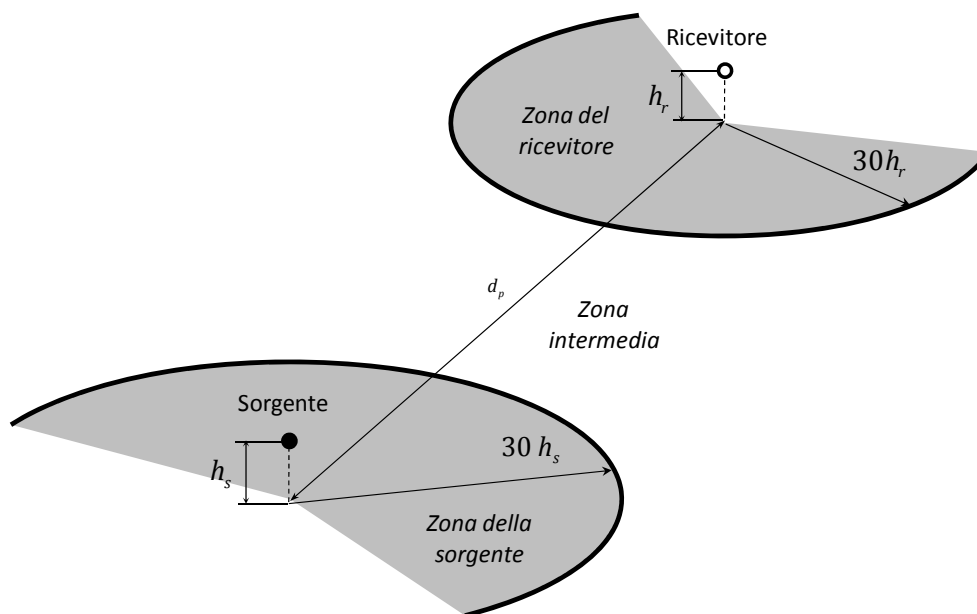


Figura 5.13. Individuazione delle zone ai fini della determinazione dell'attenuazione dovuta al suolo

Le tre zone sono:

- la zona della sorgente, che si estende fino alla distanza  $30 h_s$ , dalla sorgente verso il ricevitore, con distanza massima  $d_p$ ;
- la zona del ricevitore, che si estende fino alla distanza  $30 h_r$ , dal ricevitore alla sorgente con distanza massima  $d_p$ ;
- la zona intermedia, che si estende tra la zona della sorgente e quella del ricevitore.

Se  $d_p < (30 h_s + 30 h_r)$ , le zone della sorgente e del ricevitore si sovrappongono e non esiste la zona intermedia.



Le proprietà acustiche del suolo di ciascuna zona vengono quantificate per mezzo del fattore suolo,  $G$ , che assume i seguenti valori in dipendenza al tipo di terreno:

- a)  $G=0$  per terreno rigido, costituito da pavimentazioni, acqua, ghiaccio, calcestruzzo e tutte le altre superfici del suolo aventi bassa porosità;
- b)  $G=1$  per terreno poroso, costituito da terreno erboso, alberato, con vegetazione e ogni superficie del suolo adatta alla crescita di vegetazione.
- c)  $0 < G < 1$  per terreno misto, nel caso in cui la superficie consta sia di terreno rigido sia di terreno poroso; in questo caso  $G$  rappresenta la frazione di terreno poroso.

Per calcolare l'attenuazione sonora per una data banda di ottava, si calcolano le componenti di attenuazione per la zona della sorgente,  $A_s$ , per la zona del ricettore,  $A_r$ , e per la zona intermedia,  $A_m$ , usando le espressioni riportate in Tabella 5.3.

Tabella 5.3. Espressioni per il calcolo dei contributi dell'attenuazione del suolo, per bande di ottava.

Frequenza centrale Hz	$A_s$ o $A_r$ dB	$A_m$ dB
63	-1,5	-3q
125	-1,5 + $G \times a'(h)$	-3q (1 - G)
250	-1,5 + $G \times b'(h)$	
500	-1,5 + $G \times c'(h)$	
1 000	-1,5 + $G \times d'(h)$	
2 000	1,5 (1 - G)	
4 000	1,5 (1 - G)	
8 000	1,5 (1 - G)	

$$a'(h) = 1,5 + 3,0e^{-0,12(h-5)^2} \left(1 - e^{-d_p/50}\right) + 5,7e^{-0,09h^2} - e^{-2,8 \times 10^{-6}d_p^2}$$

$$b'(h) = 1,5 + 8,6e^{-0,09h^2} \left(1 - e^{-d_p/50}\right)$$

$$c'(h) = 1,5 + 14,0e^{-0,46h^2} \left(1 - e^{-d_p/50}\right)$$

$$d'(h) = 1,5 + 5,0e^{-0,9h^2} \left(1 - e^{-d_p/50}\right)$$

$$q = \max \left\{ 1 - 30 \frac{h_s + h_r}{d_p}; 0 \right\}$$

L'attenuazione complessiva si ottiene quindi come somma delle attenuazioni nella zona della sorgente, nella zona del ricevitore e nella zona intermedia:

$$A_{gr} = A_s + A_r + A_m \tag{5.94}$$

### 5.5.5 Condizioni meteorologiche

Le condizioni meteorologiche possono influenzare la propagazione del suono. In presenza di gradienti verticali della temperatura si creano disuniformità nella velocità di propagazione del suono, il cui risultato è la progressiva curvatura dei raggi sonori.

Se la temperatura diminuisce con la quota (gradiente negativo), come succede normalmente di giorno, si creano zone d'ombra, in cui il suono risulta non udibile (Figura 5.14); viceversa, nel caso di inversione termica (gradiente positivo), i suoni risultano udibili anche a grande distanza dalla sorgente (Figura 5.15). In presenza di vento si creano zone d'ombra nella zona sopravvento, mentre nella zona sottovento il suono raggiunge distanze maggiori (Figura 5.16).

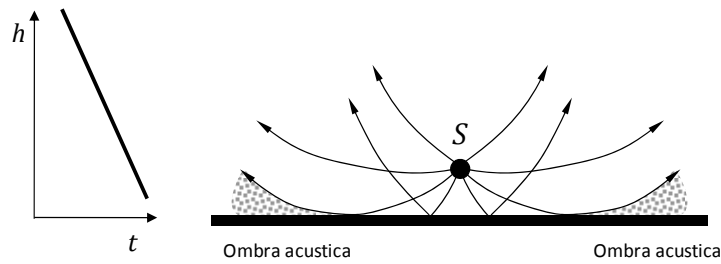


Figura 5.14. Deviazione delle onde acustiche in presenza di un gradiente negativo di temperatura.

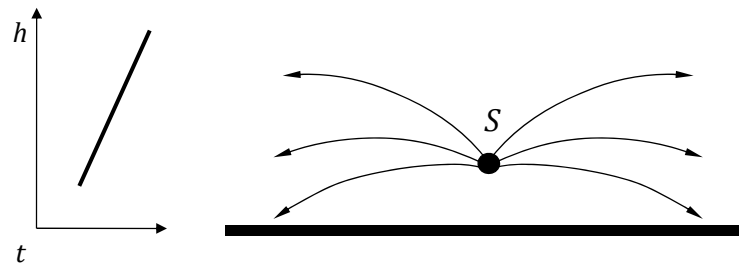


Figura 5.15. Deviazione delle onde acustiche in presenza di un gradiente positivo di temperatura.

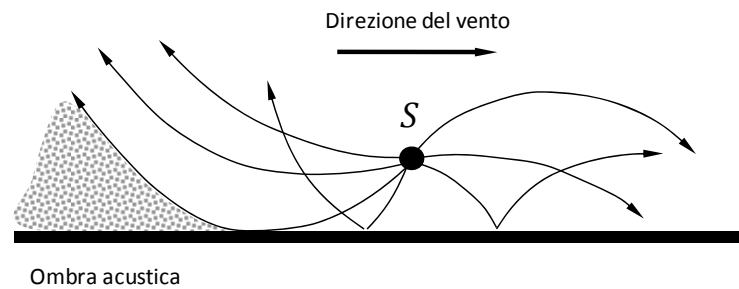


Figura 5.16. Deviazione delle onde acustiche per effetto del vento.

Quando si valuta il livello acustico per un lungo periodo, da alcuni mesi fino ad un anno, generalmente si verificano una varietà di condizioni meteorologiche a volte favorevoli, a volte sfavorevoli alla propagazione acustica dalla sorgente al ricettore.

In queste condizioni la norma UNI ISO 9613 prevede una correzione meteorologica,  $C_{met}$ , da sottrarre al livello acustico calcolato con l'equazione (5.84) e che, per una sorgente puntiforme con emissione costante nel tempo, risulta pari a:

$$C_{met} = C_0 \left( 1 - 10 \frac{h_s + h_r}{d_p} \right) \quad \text{per } d_p > 10(h_s + h_r) \quad (5.95)$$

$$C_{met} = 0 \quad \text{per } d_p \leq 10(h_s + h_r)$$

in cui  $h_s$  ed  $h_r$  sono rispettivamente l'altezza della sorgente e del ricevitore,  $d_p$  la loro distanza (Figura 5.13) e  $C_0$  un fattore dipendente dalle statistiche meteorologiche locali su velocità e direzione del vento e gradienti di temperatura.

Il valore di  $C_0$  varia da 0 a +5 dB, anche se valori superiori a 2 dB sono eccezionali. Ad esempio, se le condizioni meteorologiche favorevoli alla propagazione si presentano nel 50% del tempo e il livello durante il periodo restante è minore di 10 dB, allora l'energia sonora in condizioni meteorologiche sfavorevoli può essere trascurata e  $C_0$  sarà uguale a +3 dB.

### 5.5.6 Altri tipi di attenuazione

In campo esterno esistono altri tipi di attenuazione, non determinabili con i metodi generali di calcolo fin qui riportati, che si verificano:

- nella propagazione attraverso fogliame,  $A_{fol}$ ;
- nella propagazione attraverso insediamenti industriali,  $A_{site}$ ;
- nella propagazione attraverso complessi residenziali,  $A_{hous}$ .

Le fronde degli alberi e degli arbusti forniscono un contributo all'attenuazione se sono sufficientemente fitte da bloccare completamente la visuale lungo il percorso di propagazione, ossia quando risulta impossibile vedere, anche per un breve tratto, attraverso il fogliame.

L'attenuazione può essere dovuta a vegetazione vicina alla sorgente o vicina al ricettore o vicina ad entrambi e deve essere valutata su un percorso curvilineo di raggio 5 km che unisce sorgente e ricevitore, per i tratti in cui è effettivamente attraversata la vegetazione (Figura 5.17).

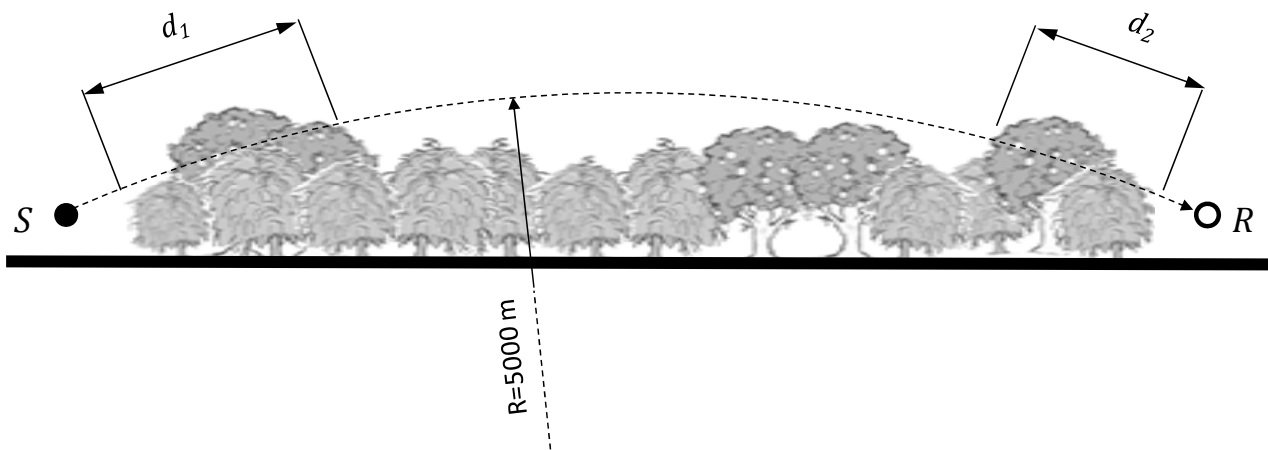


Figura 5.17. Distanza di propagazione attraverso la vegetazione.

In queste condizioni i valori di attenuazione sono riportati in Tabella 5.4: la prima riga vale per percorsi attraverso il fogliame compresi tra 10 e 20 m ed è in valore assoluto; la seconda riga riporta invece i valori di attenuazione per percorsi attraverso il fogliame compresi tra 20 e 200 m e, essendo espressa per unità di lunghezza, va moltiplicata per la lunghezza complessiva dello strato di fogliame attraversato.

Tabella 5.4. Attenuazione del rumore per effetto di propagazione attraverso fogliame fitto, per banda di ottava.

Distanza di propagazione m	Frequenza centrale Hz							
	63	125	250	500	1000	2000	4000	8000
	Attenuazione, dB							
10-20	0	0	1	1	1	1	2	3
	Attenuazione, dB/m							
20-200	0,02	0,03	0,04	0,05	0,06	0,08	0,09	0,12

Negli insediamenti industriali può verificarsi un'attenuazione per effetto di una diffusione del suono da parte delle installazioni. L'attenuazione aumenta in proporzione diretta con la lunghezza del percorso attraverso gli insediamenti che, come nel caso della vegetazione, deve essere valutato su un percorso curvilineo di raggio 5 km che unisce sorgente e ricevitore (Figura 5.18).

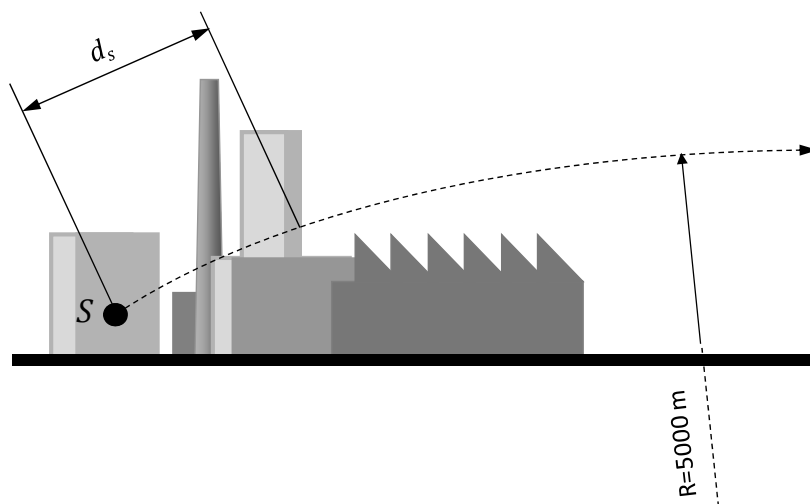


Figura 5.18. Distanza di propagazione attraverso insediamenti industriali.

Per una stima di massima si possono utilizzare i valori riportati in Tabella 5.5, che vanno moltiplicati per la lunghezza complessiva del percorso attraverso gli insediamenti. Il valore massimo di attenuazione ipotizzabile è di 10 dB.

Tabella 5.5. Attenuazione del rumore per effetto di propagazione attraverso insediamenti industriali, per banda di ottava.

Frequenza centrale Hz							
63	125	250	500	1000	2000	4000	8000
Attenuazione, dB/m							
0	0,015	0,025	0,025	0,02	0,02	0,015	0,015

Quando la sorgente o il ricevitore o entrambi sono situati in una zona densamente edificata, si verificherà un'attenuazione dovuta alla schermatura da parte degli edifici, anche se questo effetto può essere largamente compensato dalla propagazione tra edifici e dalle riflessioni da altri edifici situati nelle vicinanze.

Un valore approssimato per l'attenuazione,  $A_{hous}$ , che al massimo potrà essere di 10 dB, può essere stimato come somma di due contributi:

$$A_{hous} = A_{hous,1} + A_{hous,2} \quad (5.96)$$

Il primo contributo,  $A_{hous,1}$ , può essere valutato con l'equazione:

$$A_{hous,1} = 0,1 B d_b \quad (5.97)$$

in cui B è la densità degli edifici lungo il percorso, pari all'area totale del complesso degli edifici divisa per l'area totale della zona, e  $d_b = d_1 + d_2$  è la lunghezza, in metri, del percorso del suono attraverso la zona edificata, calcolata in modo analogo a quanto previsto nel caso della vegetazione (Figura 5.19).

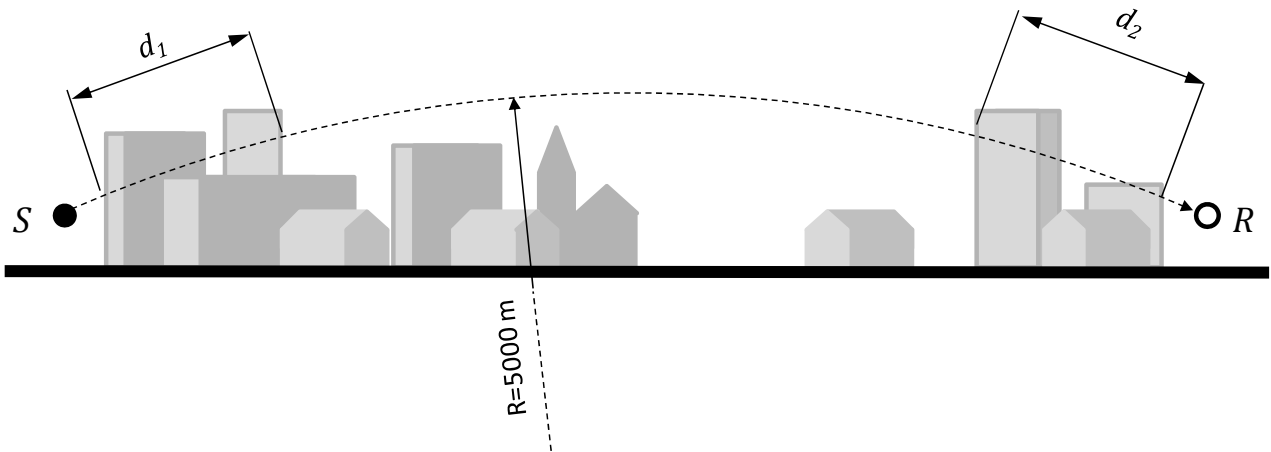


Figura 5.19. Distanza di propagazione attraverso complessi residenziali.

Il secondo contributo,  $A_{\text{house2}}$ , viene considerato solo se gli edifici sono disposti in file ben definite lungo una strada, una ferrovia o un altro corridoio e solo se il valore che si ottiene risulta minore della perdita per inserzione nella stessa posizione di un ostacolo con altezza uguale a quella media degli edifici.

La relazione che si utilizza è:

$$A_{\text{hous},2} = -10 \log_{10} \left( 1 - \frac{p}{100} \right) \quad (5.98)$$

dove  $p$  è la percentuale della lunghezza delle facciate rispetto alla lunghezza totale della strada o della ferrovia. Il valore di  $p$  deve essere  $<90\%$ .