

## 1. Propagazione del suono in campo libero

La condizione di *campo acustico libero* presuppone:

- l'assenza di superfici riflettenti ed ostruenti (ostacoli) che possano interferire con la propagazione del fronte d'onda,
- e/oppure la presenza di superfici altamente assorbenti.

Questa condizione è ottenibile approssimativamente in ambiente esterno, lontano da qualsiasi superficie che non sia totalmente assorbente, oppure, più rigorosamente, in camera anecoica.

In generale le altre condizioni possibili sono quelle di:

- campo sonoro *semi-riverberante*, che si verifica quando in uno spazio totalmente o parzialmente confinato sono contemporaneamente presenti onde sonore provenienti direttamente dalla sorgente ed onde riflesse;
- campo sonoro *riverberante* o diffuso, che si riscontra in ambienti chiusi in cui è dominante l'energia sonora riflessa dalle superfici di confine ed in ogni punto le onde sonore provengono da tutte le direzioni. Quest'ultima condizione è ottenuta nelle camere riverberanti

Nello studio della propagazione sonora in campo libero è particolarmente importante la definizione del tipo di sorgente sonora che genera il campo acustico.

Si definiscono in particolare tre tipi di sorgenti sonore cui corrispondono altrettanti tipi di attenuazione dovuta alla distanza dal ricevitore:

- a) sorgente puntiforme,
- b) sorgente lineare,
- c) sorgente piana.

Il campo sonoro considerato in questa sede è sempre quello lontano, che si riscontra ad una distanza dalla sorgente maggiore o uguale ad 1,6 volte la lunghezza d'onda ( $d \geq 1,6 \cdot \lambda$ ).

A far sì che una sorgente sia considerata puntiforme, lineare o piana non è solo la sua forma ma anche la distanza dal ricevitore o meglio: le sue dimensioni in rapporto a tale distanza.

### 1.1 Sorgente puntiforme

Una sorgente può essere considerata puntiforme quando le sue dimensioni sono piccole rispetto alla sua distanza dal ricevitore.

Una sorgente di questo tipo in campo libero produce onde sonore sferiche. Nel campo sonoro lontano l'intensità sonora alla distanza  $r$  da una sorgente puntiforme omnidirezionale è così calcolabile:

$$(1) \quad I = \frac{W}{S} = \frac{W}{4 \cdot \pi \cdot r^2} \quad [\text{W/m}^2]$$

dove  $W$  è la potenza sonora emessa dalla sorgente. [W] ed  $S$  la superficie sferica [ $\text{m}^2$ ] su cui tale potenza è distribuita alla distanza  $r$ .

In questa sede, a differenza che nella trattazione del campo sonoro riverberante o semi-riverberante, può essere

preferibile considerare la grandezza intensità sonora, anziché la pressione efficace o la densità sonora, dal momento che c'è una direzione di propagazione del suono identificabile..

Il livello di intensità sonora alla distanza  $r$  dalla sorgente sarà:

$$L_I = 10 \cdot \log \frac{I}{I_0} = 10 \cdot \log \left( \frac{W}{4 \cdot \pi \cdot r^2} \cdot \frac{1}{W_0} \right) = 10 \cdot \log \left( \frac{W}{W_0} \cdot \frac{1}{4 \cdot \pi \cdot r^2} \right) = L_W - 10 \cdot \log(4 \cdot \pi) - 10 \cdot \log r^2 \text{ dB}$$

quindi:

$$(2) L_I = L_W - 11 - 20 \cdot \log r \text{ dB}$$

in campo libero ed in condizioni di campo sonoro lontano, intensità e pressione sonora efficace sono legate dalla relazione:

$$I = \frac{p_{eff}^2}{\rho_0 c} \text{ [W/m}^2\text{]} \quad \text{quindi: } \rho_0 c = \frac{p_{eff}^2}{I} \quad \text{e} \quad p_{eff}^2 = I \cdot \rho_0 c$$

dove  $\rho_0$  è la densità dell'aria (in condizioni di quiete) e  $c$  la velocità del suono nella stessa,

esprimendo la pressione sonora efficace in funzione dell'intensità, con l'ultima delle espressioni sopra riportate, il suo livello sarà:

$$L_p = 10 \cdot \log \frac{p_{eff}^2}{p_{0eff}^2} = 10 \cdot \log \frac{I \cdot \rho_0 c}{I_0 \cdot 400} = 10 \cdot \log \left( \frac{W}{4 \cdot \pi \cdot r^2} \cdot \frac{1}{W_0} \cdot \frac{\rho_0 c}{400} \right) = 10 \cdot \log \left( \frac{W}{W_0} \cdot \frac{1}{4 \cdot \pi \cdot r^2} \cdot \frac{\rho_0 c}{400} \right)$$

$$L_p = L_W + 10 \cdot \log \left( \frac{\rho_0 c}{400} \right) - 10 \cdot \log(4 \cdot \pi) - 10 \cdot \log r^2$$

dunque:

$$(3) L_p = L_W + 10 \log \left( \frac{\rho_0 c}{400} \right) - 11 - 20 \cdot \log r \text{ dB}$$

il valore numerico '400' che compare accanto all'intensità sonora di riferimento, è il valore dell'impedenza acustica  $\rho_0 c$  relativo ai valori di riferimento, in corrispondenza del quale si può scrivere:

$$I_0 = \frac{p_{0eff}^2}{\rho_0 c} \text{ [W/m}^2\text{]}$$

dunque:

$$\rho_0 c = \frac{P_{0eff}^2}{I_0} = \frac{(2 \cdot 10^{-5})^2 [Pa^2]}{10^{-12} [W/m^2]} = 400 \left[ \frac{\left( \frac{kg \cdot m}{m^2 \cdot s^2} \right)^2}{\frac{kg \cdot \frac{m}{s^2} \cdot m}{s \cdot m^2}} \right] = \frac{kg}{s \cdot m^2}$$

i livelli di intensità e di pressione sonora efficace assumono pertanto lo stesso valore numerico quando il prodotto  $\rho_0 c$ , che rappresenta l'impedenza acustica del mezzo, assume il valore 400 [kg/(m<sup>2</sup>s) o Rayls], condizione che si riscontra con aria secca a 39° ed a pressione atmosferica.

In condizioni normali di pressione e temperatura il termine  $\rho_0 c$  assume comunque valori prossimi a 400, per cui il termine  $\frac{\rho_0 c}{400}$  assume valori prossimi all'unità, ed il suo logaritmo tende a zero. Pertanto il termine  $10 \log \frac{\rho_0 c}{400}$  viene di solito trascurato ed i livelli di intensità e di pressione si calcolano allo stesso modo.

Come si può facilmente osservare i livelli di intensità e pressione sonora diminuiscono di 6 dB (ovvero di 20 log 2) ad ogni raddoppio della distanza  $r$ . Infatti, volendo calcolare il  $L_p$ , avremo:

$$(L_p)_{2r} = L_W + 10 \log \frac{\rho_0 c}{400} - 11 - 20 \cdot \log(2 \cdot r) = (L_p)_r - 20 \cdot \log(2) = (L_p)_r - 6 \quad \text{dB}$$

Una volta calcolato il livello, di pressione o di intensità, relativo ad una data distanza sorgente-ricevitore  $r_1$  la variazione di livello rispetto ad un'altra distanza  $r_2$  è facilmente calcolabile con la seguente formula:

$$(4) \quad \Delta L = 20 \log \frac{r_1}{r_2} \quad \text{dB}$$

anche qui se  $r_2 = 2 r_1$  avremo:

$$\Delta L = 20 \log \frac{r_1}{2 \cdot r_1} = -20 \log 2 = -6 \quad \text{dB}$$

## 1.2 Sorgente lineare

Un esempio di sorgente lineare può essere costituito da un tubo percorso da un fluido in moto turbolento, oppure, a scala maggiore, da un convoglio ferroviario sufficientemente lungo o una strada percorsa da un flusso continuo di veicoli.

Una sorgente lineare in campo acustico libero produce onde cilindriche. Pertanto, considerando un tratto di lunghezza unitaria di sorgente lineare, l'intensità sonora in direzione normale ad esso ad una distanza  $r$  sarà data dalla potenza sonora emessa dalla sorgente nel tratto unitario  $W$  divisa per la superficie cilindrica di lunghezza unitaria  $S$  del fronte d'onda, dunque:

$$(5) \quad I = \frac{W}{S} = \frac{W}{2 \cdot \pi \cdot r \cdot 1} \quad [W/m^2]$$

I corrispondenti livelli di intensità e di pressione si ottengono dalle:

$$L_I = 10 \cdot \log \frac{I}{I_0} = 10 \cdot \log \left( \frac{W}{2 \cdot \pi \cdot r} \cdot \frac{1}{I_0} \right) = 10 \cdot \log \left( \frac{W}{W_0} \cdot \frac{1}{2 \cdot \pi \cdot r} \right) = L_W - 10 \cdot \log(2 \cdot \pi) - 10 \cdot \log r \quad \text{dB}$$

quindi:

$$(6) \quad L_I = L_W - 8 - 10 \cdot \log r \quad \text{dB}$$

$$(7) \quad L_I = L_W + 10 \log \frac{\rho_0 c}{400} - 8 - 10 \cdot \log r \quad \text{dB}$$

anche in questo caso i livelli delle due grandezze assumono lo stesso valore numerico quando l'impedenza acustica del mezzo ( $\rho_0 c$ ) assume valore pari a 400 Rayls,

In questo caso i livelli di intensità e pressione sonora diminuiscono di 3 dB (ovvero di  $10 \log 2$ ) ad ogni raddoppio della distanza  $r$ .

L'attenuazione da divergenza cilindrica può essere calcolata per qualsiasi variazione della distanza da un valore  $r_1$ , per il quale il livello è noto, ad un valore  $r_2$  con la seguente formula:

$$(8) \quad \Delta L = 10 \log \frac{r_1}{r_2} \quad \text{dB}$$

### 1.2.1 Sorgenti parzialmente lineari

Una serie di veicoli in movimento lungo una strada può costituire una sorgente lineare, anche se approssimata da tante sorgenti puntiformi, ciascuna caratterizzata da un livello di potenza sonora  $L_W$ .

Il livello di pressione della sorgente-strada sarà:

$$L_p = L_W + 10 \cdot \log \left( \frac{\alpha_n - \alpha_1}{r_0 \cdot b} \right) + \Delta L - 8 \quad \text{dB}$$

il fattore correttivo  $\Delta L$  è  $< 1$  se il numero delle sorgenti puntiformi  $n$  è  $\geq 3$  e se la distanza tra di esse è relativamente piccola rispetto ad  $r_0$  ovvero se:

$$\frac{r_0}{b \cdot \cos \alpha_1} \geq \frac{1}{\pi}$$

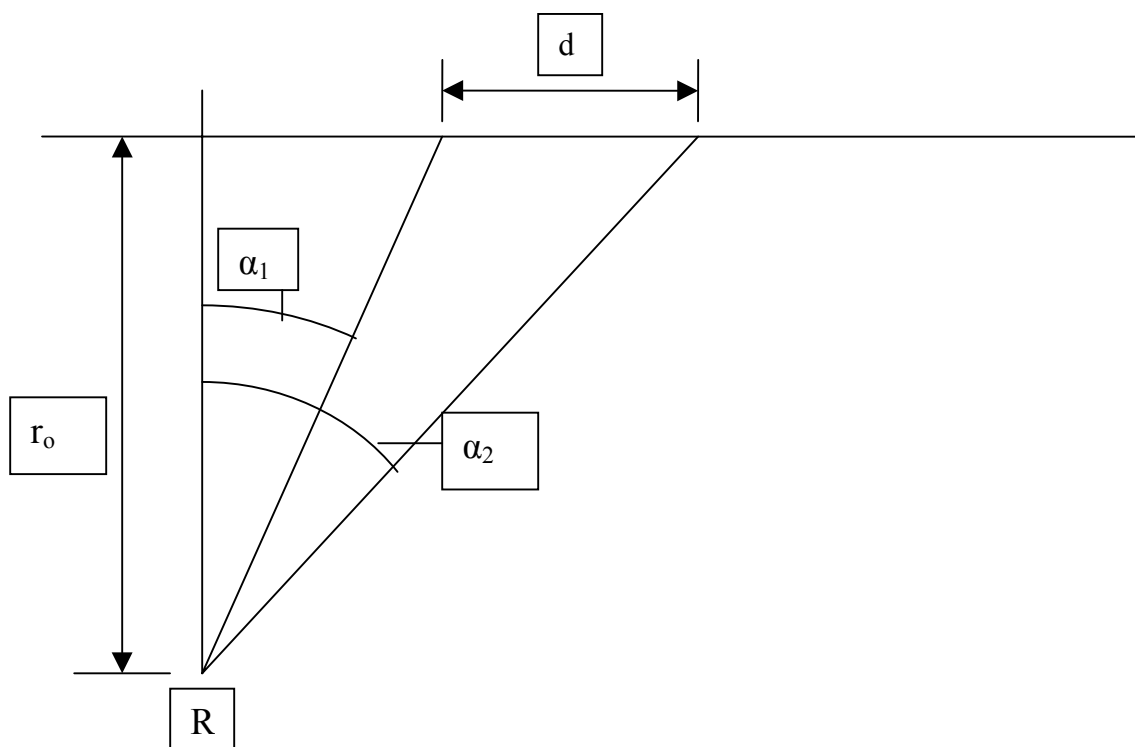
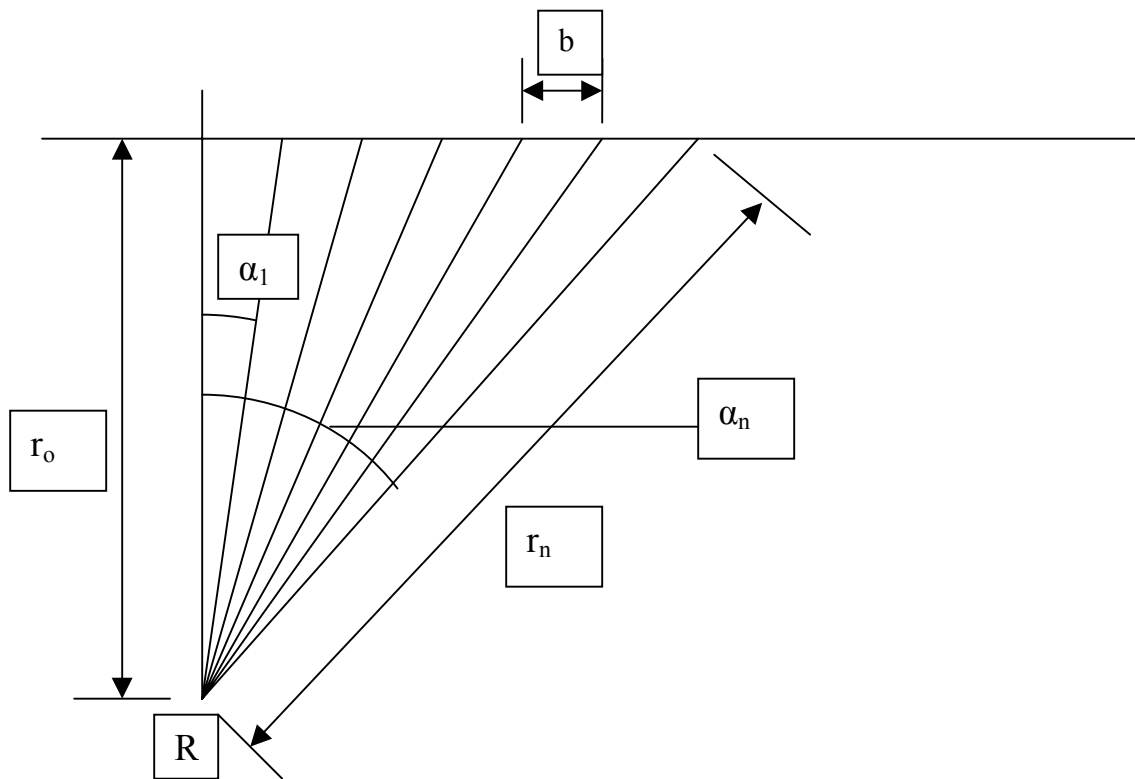
solo se sono soddisfatte tali condizioni la sorgente più vicina all'ascoltatore non prevale sulle altre.

Se tali condizioni non sono soddisfatte  $\Delta L$  è di difficile valutazione.

Se invece si tratta di una sorgente lineare di lunghezza finita, ad esempio un convoglio ferroviario, allora si userà la formula:

$$L_p = L_W + 10 \cdot \log \left( \frac{\alpha_2 - \alpha_1}{r_0 \cdot d} \right) - 8 \quad \text{dB}$$

dove  $L_w$  è il livello di potenza dell'unità di lunghezza della sorgente lineare.  
In tutte le formule sopra riportate gli angoli sono espressi in radianti.



### 1.3 Sorgente piana

Queste sorgenti generano onde sonore piane, che non subiscono attenuazioni da divergenza. Si tratta di una situazione che non si verifica frequentemente nella pratica, nelle normali situazioni di misura.

Tipicamente onde piane possono essere ottenute all'interno di un tubo liscio entro cui si muove in modo oscillatorio un pistone.

Più frequentemente si possono ascrivere a questo tipo le sorgenti molto estese, lungo due dimensioni, rispetto alla distanza dal ricevitore, distanza misurata in senso normale alle due suddette dimensioni. È il caso delle pareti di grandi capannoni industriali, ma solo finché la distanza parete-ricevitore si mantiene piccola rispetto alle due dimensioni della parete e non in prossimità dei bordi della stessa.

In condizioni del genere l'intensità sonora si mantiene costante al variare della distanza sorgente-ricevitore.

### 2. Fattore di Direttività

In genere le sorgenti sonore non sono omnidirezionali, ed emettono con intensità diversa nelle varie direzioni.

A volte vi sono vincoli esterni alla sorgente che ne condizionano la direzionalità; ad esempio una sorgente anche omnidirezionale che sia appoggiata su un piano sarà costretta ad irradiare la sua potenza sonora solo in un semispazio.

Il **fattore di direttività Q** è definito come il rapporto tra l'intensità sonora in una data direzione e l'intensità sonora che si avrebbe nella stessa direzione se la sorgente fosse omnidirezionale:

$$(9) \quad Q = \frac{I_{\theta}}{I_0}$$

per sorgenti sferiche generiche l'intensità sonora in una data direzione sarà:

$$(10) \quad I = \frac{W \cdot Q}{4 \cdot \pi \cdot r^2} \quad [\text{W/m}^2]$$

Si definisce anche l'**indice di direttività D**:

$$(11) \quad D = 10 \log Q$$

Pertanto la (3) diventa

$$(12) \quad L_p = L_w + 10 \log \frac{\rho_0 c}{400} - 11 - 20 \cdot \log r + D \quad \text{dB}$$

Quest'ultima relazione è particolarmente importante perché consente, mediante la misura in camera anecoica del livello di pressione sonora in vari punti dello spazio, di determinare il fattore di direttività di una sorgente nelle varie direzioni, nonché il valore del livello di potenza sonora. La norma ISO 3745 [5] contiene le prescrizioni in merito.

Come prima accennato, il campo sonoro generato da una sorgente può essere modificato dalla presenza di vincoli fisici nelle sue vicinanze. Se **una sorgente puntiforme omnidirezionale è appoggiata su un piano riflettente** la potenza sonora da lei emessa sarà irradiata in un semispazio dunque la sua intensità sonora ad una data distanza  $r$  sarà data dalla potenza divisa per la superficie di una semisfera di raggio  $r$ .

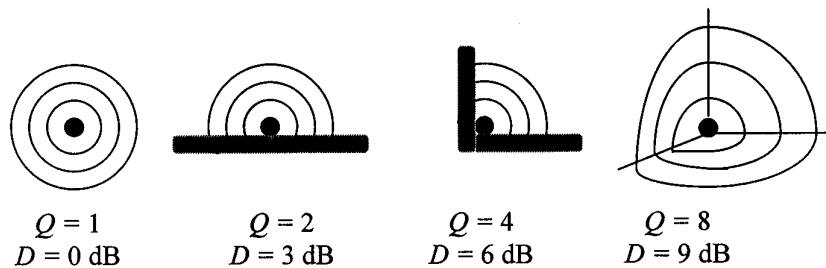
$$I = \frac{W \cdot}{2 \cdot \pi \cdot r^2} \quad [\text{W/m}^2] \quad \text{e} \quad W = 2 \cdot \pi \cdot r^2 \cdot I \quad [\text{W}]$$

in assenza del piano riflettente la sua potenza sarebbe stata irradiata in un semispazio secondo la (1) pertanto il fattore di direttività sarà:

$$Q = \frac{I_{\ominus}}{I_0} = \frac{\frac{W \cdot}{2 \cdot \pi \cdot r^2}}{\frac{W \cdot}{4 \cdot \pi \cdot r^2}} = 2 \quad \text{e} \quad D=3 \text{ dB}$$

ragionando in modo analogo, se la sorgente è collocata lungo la linea di intersezione tra due superfici riflettenti Q sarà pari a 4 e D pari a 6 dB.

Figura 1 – Curve iso-intensità, fattori ed indici di direttività per una sorgente puntiforme omnidirezionale appoggiata su uno o più piani.



### 3. Fattori di attenuazione sonora nella propagazione in ambiente esterno

Oltre all'attenuazione da divergenza altri fattori possono concorrere all'attenuazione del suono durante la sua propagazione nell'ambiente esterno. Si tratta di complessi fenomeni dissipativi legati agli effetti del vento, del gradiente di temperatura, all'assorbimento di energia sonora da parte dell'aria e delle superfici lambite dall'onda di pressione (terreno, vegetazione ...).

L'attenuazione dovuta a tali fenomeni viene detta 'attenuazione in eccesso'.

Gli effetti di tutti questi fenomeni vengono rappresentati da un termine  $\Delta L$ , espresso in dB, che viene aggiunto alla formula impiegata, ad esempio nel caso di sorgente puntiforme:

$$(13) \quad L_p = L_w + 10 \log \frac{\rho_0 c}{400} - 11 - 20 \cdot \log r + D - \Delta L \quad \text{dB}$$

#### 3.1 Condizioni meteorologiche

Il gradiente verticale di temperatura ed il vento influenzano la direzione di propagazione e la velocità del suono.

Si ricorda che la velocità del suono nell'aria è legata alla temperatura della stessa. Una delle formule con cui è calcolabile: questa velocità è la seguente:

$$c = 331 + 0,6 t$$

dove  $t$  è la temperatura dell'aria espressa in gradi centigradi.

Pertanto se la temperatura dell'aria aumenta con l'altezza (gradiente positivo) la velocità del suono aumenterà anch'essa con l'altezza. Un fronte d'onda tenderà così ad essere leggermente più veloce nella sua parte alta, e la direzione di propagazione del suono tenderà ad incurvarsi verso il basso, come illustrato nelle figure 2-3-4. Una situazione del genere si verifica se la superficie del suolo è fredda, perché innevata o ghiacciata oppure semplicemente non scaldata dal Sole come avviene nelle ore notturne o al tramonto di giornate molto limpide quando la superficie del suolo si raffredda rapidamente per radiazione verso il cielo. Ma il gradiente positivo si riscontra anche quando uno strato di nubi basse scherma la radiazione solare.

Questa situazione favorisce la propagazione del suono a distanza: l'energia sonora che normalmente si disperderebbe verso l'alto riesce a raggiungere un ricevitore anche lontano.

Normalmente però avviene il contrario: tanto che la situazione appena descritta è denominata 'inversione termica'. Di norma la temperatura dell'aria (che è scaldata dal suolo) diminuisce con l'altezza, e le direzioni di propagazione delle parti del fronte d'onda (raggi sonori) si incurvano verso l'alto.

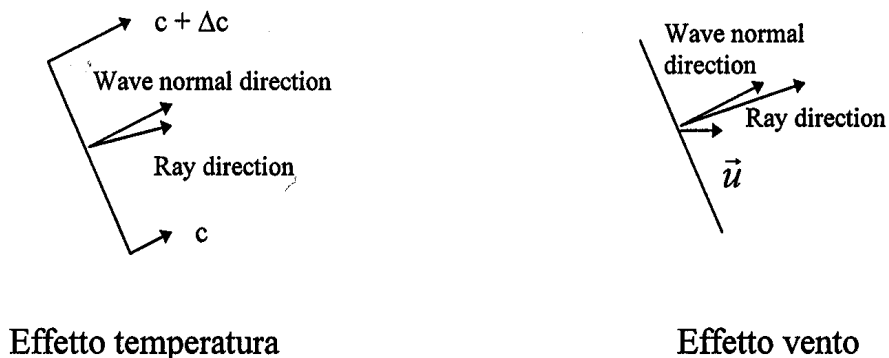


Figura 2

Il vento può avere effetti diversi sull'onda sonora a seconda delle rispettive direzioni, che possono combinarsi in vario modo. Rappresentando come vettori sia la velocità del raggio sonoro che la velocità del vento, la somma dei due vettori-velocità determina la direzione risultante del raggio sonoro.

Di norma la velocità del vento aumenta con l'altezza.

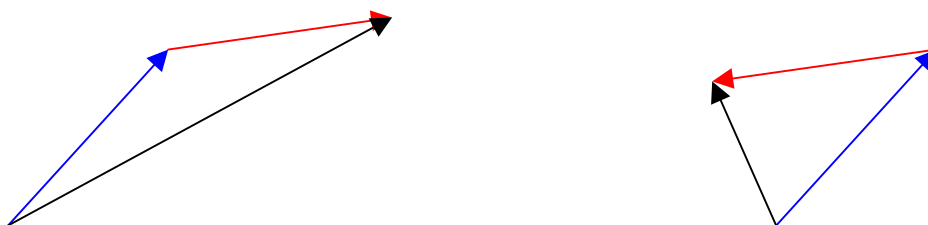


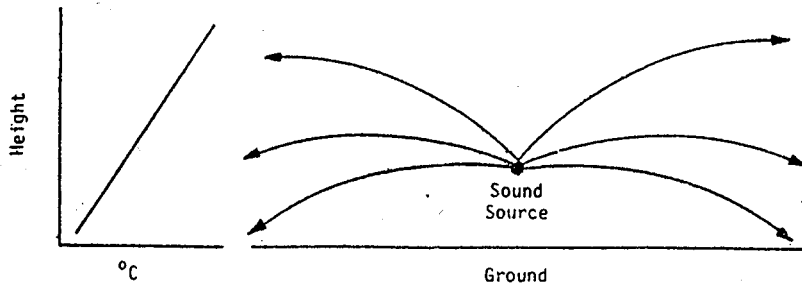
Figura 3

Quando il suo percorso si incurva verso il basso il suono può anche superare delle barriere.

L'effetto del gradiente di temperatura può determinare la presenza di zone d'ombra sonora. Se il gradiente è positivo e le onde vengono deviate verso il basso non si formano zone d'ombra, se il gradiente è negativo invece sì. La distanza  $r$ , indicata in figura 5, indica l'inizio della zona non raggiunta dal suono diretto (zona tratteggiata).

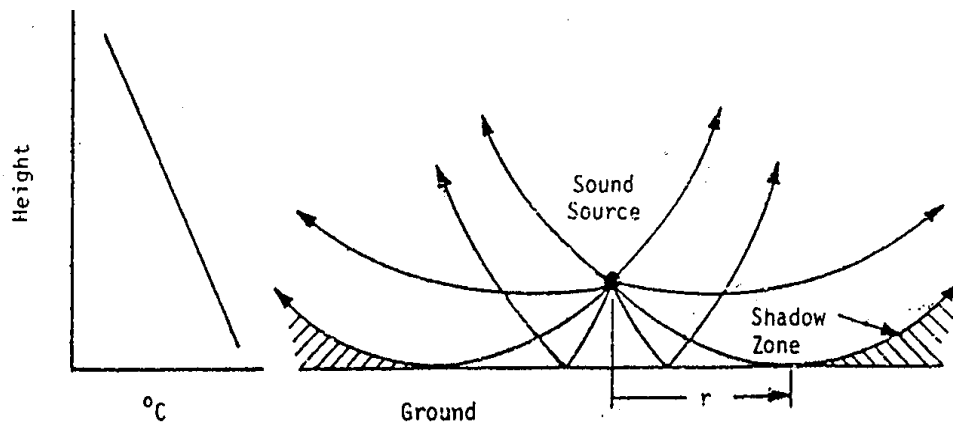
Quando il gradiente di temperatura ha un andamento più complicato (con una o più inversioni) le zone d'ombra diventano più irregolari e possono allontanarsi dalla sorgente (figura 6). A volte può crearsi una specie di canale all'interno del quale il suono si propaga a distanza con attenuazione minima (figura 7).





Deviazione delle onde in presenza di un gradiente positivo di temperatura

Figura 4

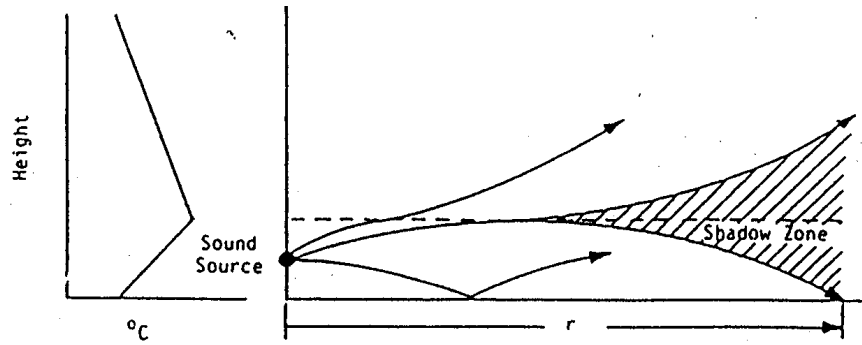


Deviazione delle onde in presenza di un gradiente negativo di temperatura

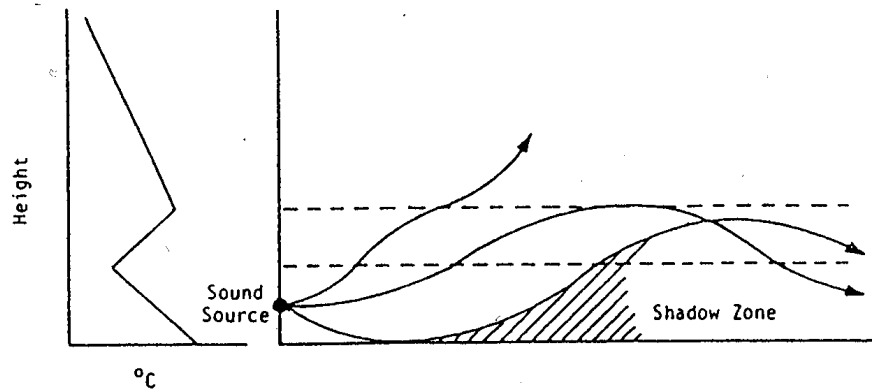
Figura 5

La figura 8 mostra quello che può essere un effetto combinato di vento e gradiente di temperatura.

Tutti questi effetti sono rilevabili su distanze di centinaia e non di decine di metri. Su tali distanze un vento a favore può aumentare il livello sonoro di 3-4 dB.

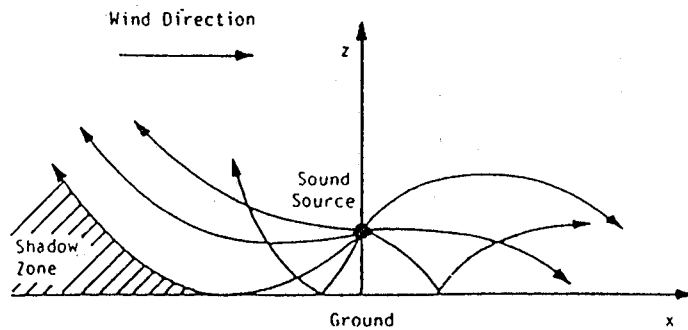


Deviazione delle onde in presenza di un'inversione del gradiente di temperatura



Deviazione delle onde in presenza di due inversioni del gradiente di temperatura

Figura 6-7



L'effetto del vento e del gradiente di temperatura sulla deviazione delle onde

Figura 8

### 3.2 Assorbimento da parte dell'aria

Nella propagazione del suono all'aperto, su grandi distanze, non è trascurabile l'assorbimento da parte dell'aria. L'assorbimento di energia sonora da parte dell'aria è legato agli effetti dissipativi, attriti interni al mezzo, che convertono parte dell'energia in calore. L'effetto è rilevabile solo considerando distanze pari a varie lunghezze d'onda. Questo assorbimento è dovuto a due processi.

1. Assorbimento classico, esso include:
  - 1.1 le perdite per diffusione e radiazione (termine solitamente trascurabile),
  - 1.2 le perdite dipendenti dalla conduzione termica, significative alle frequenze più basse,
  - 1.3 perdite da attrito, proporzionali al quadrato della frequenza, dunque rilevanti alle frequenze più alte.Nel range dell'udibile l'assorbimento classico è responsabile solo dell'1% dell'assorbimento da parte dell'aria ed in generale può essere trascurato.
2. Rilassamento rotazionale e vibrazionale delle molecole di ossigeno nell'aria. Per i gas poliatomici queste perdite sono dovute alla conversione dell'energia cinetica delle molecole in energia interna. Il rilassamento vibrazionale è preponderante rispetto a quello rotazionale, ed è la causa principale dell'assorbimento del suono da parte dell'aria.

Entrambi i tipi di assorbimento sono funzione della distanza di propagazione, delle impurità presenti nell'aria, dell'umidità e della temperatura. In generale l'assorbimento aumenta con la frequenza, con il decrescere dell'umidità (che significa con l'aumento della densità), ed, eccetto che per alte frequenze e bassi valori dell'umidità, aumenta al decrescere della temperatura.

Come si può osservare dai valori riportati in tabella II, a frequenze minori di 1000 Hz, con un umidità relativa del 50% l'attenuazione dovuta all'aria è molto piccola, dell'ordine di 1-2 dB, ma sale notevolmente alle alte frequenze.

Dunque la semplice distanza altera lo spettro del rumore penalizzando le alte frequenze.

### 3.3 Barriere acustiche

Le barriere acustiche sono costituite da ostacoli fisici interposti tra sorgente e ricevitore lungo la linea di propagazione del suono, dunque sorgente (S) e ricevitore (R) non devono "vedersi."

È essenziale che tali ostacoli abbiano un buon potere fonoisolante, di almeno 15-20 dB, altrimenti il suono che le attraversa non è trascurabile.

Se tali condizioni sono soddisfatte le onde sonore possono raggiungere il ricevitore solo per diffrazione sui bordi della barriera, e non seguendo un percorso "diretto".

In generale, come indicato in figura 9, il rumore emesso da una sorgente S può raggiungere il ricevitore A seguendo vari percorsi:

- diffrazione sui bordi, superiore e laterali della barriera (B,C,D),
- trasmissione attraverso la barriera (SA),
- riflessioni e diffrazioni su altre superfici circostanti (E).

L'attenuazione acustica dovuta alla barriera è rappresentata dal termine  $\Delta L$ , ovvero dalla differenza tra il livello di pressione sonora in un dato punto in assenza della barriera  $L_{p,0}$  e quello che si riscontrerebbe nello stesso punto in presenza della stessa  $L_{p,b}$ .

$$\Delta L = L_{p,0} - L_{p,b} \quad \text{dB}$$

se dalla sorgente puntiforme S l'energia sonora raggiunge il ricevitore A solo per diffrazione e l'attenuazione dovuta alla barriera può essere valutata con la seguente relazione, valida per sorgenti puntiformi:

$$(14) \Delta L_d = 10 \log(3 + 20 \cdot N) \quad \text{dB}$$

la relazione [lez. ... alla scuola di acustica di FE] è valida per  $N > 0$ . Dove  $N$  rappresenta il numero di Fresnel definito come segue:

$$(15) N = \frac{2 \cdot (SB + BA - SR)}{\lambda}$$

dove  $\lambda$  è la lunghezza d'onda considerata, e la somma tra parentesi al numeratore rappresenta la differenza di percorso tra il raggio sonoro diretto e quello che subisce la diffrazione (quantità denominata anche  $\delta$ ),

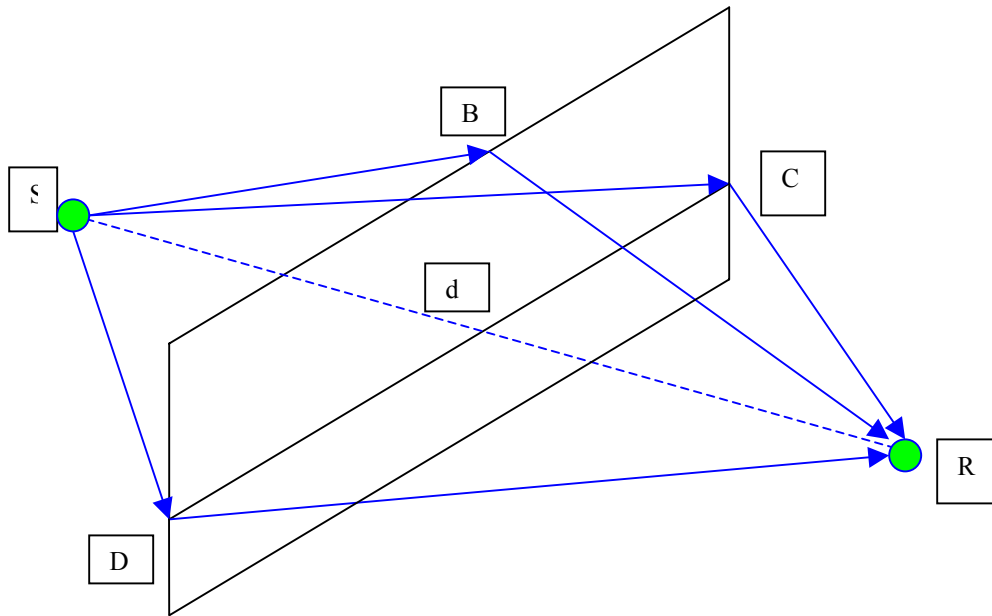


Figura 9 – Barriera acustica e percorsi del suono.

nel caso di schermi profondi tale differenza di percorso ( $\delta$ ) è così calcolabile (con riferimento alla figura 9/b):

$$\delta = SB + BC + CR - SR$$

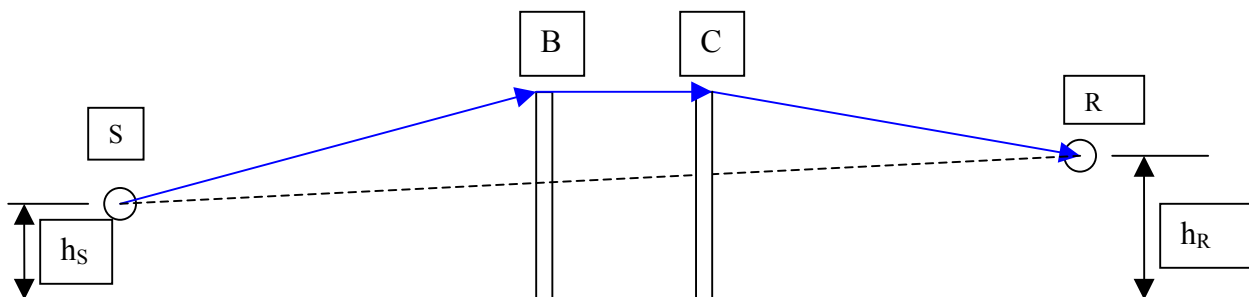


Figura 9/b – Differenza di percorso nel caso di schermi spessi.

Come si può osservare il valore di N è legato alla differenza tra il percorso dell'onda sonora diffratta dal bordo superiore della barriera (SB+BR) e quello che sarebbe il percorso diretto (SR).

Se si considera anche la diffrazione attraverso i bordi laterali, si dovrà utilizzare la seguente relazione dove N<sub>1</sub> ed N<sub>2</sub> sono i numeri di Fresnel relativi ai percorsi laterali:

$$(16) \Delta L = \Delta L_d - 10 \log \left( 1 + \frac{N}{N_1} + \frac{N}{N_2} \right) \quad \text{dB}$$

valida per valori di N, N<sub>1</sub> ed N<sub>2</sub> > 1.

Per ridurre l'influenza della diffrazione laterale a valori minori di 2 dB occorre che la larghezza della barriera sia pari ad almeno 4-5 volte la sua altezza.

Un'altra formula in uso per calcolare ΔL, e valida per l'intero campo di variazione di N, è la seguente [lez. Bretoni e M. Strada-Lazzarin], valida sempre per sorgenti puntiformi

$$(17) \Delta L_d = 20 \log \frac{\sqrt{2 \cdot \pi \cdot |N|}}{\tanh \sqrt{2 \cdot \pi \cdot |N|}} + 5 \quad \text{dB}$$

si ricorda che la tangente iperbolica di un numero è  $\tanh(\alpha) = \frac{e^\alpha - e^{-\alpha}}{e^\alpha + e^{-\alpha}}$  con e = numero di Nepero.

Come si deduce dalle formule riportate, minore è la frequenza (maggiore è λ) minore è N e minore risulta essere l'attenuazione ottenibile con la barriera. Questo perché le basse frequenze subiscono di più l'effetto della diffrazione. Dunque anche la presenza di barriere modifica lo spettro del rumore nella zona da esse protetta.

Ai valori ottenuti con le formule riportate è comunque posto un limite pratico di 24 dB

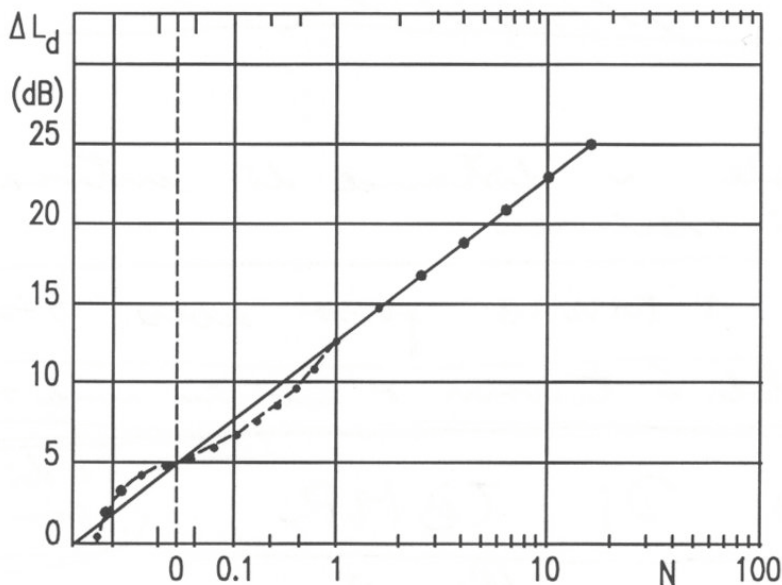


Figura 10 – Andamento dei valori dell'attenuazione ottenuti con la (14)

Per sorgenti lineari non sono disponibili formule, si può tuttavia assumere, sulla base di osservazioni sperimentali condotte da Z. Maekawa [4], che per una sorgente lineare incoerente (discontinua) l'attenuazione ottenibile sia sempre inferiore di 4-5 dB rispetto a quella che si avrebbe per una sorgente puntiforme.

Nel caso di rumore da traffico stradale sono stati sviluppati vari metodi di calcolo semplificato che forniscono il risultato direttamente in dB(A), si riporta a titolo di esempio quello proposto dal CNR canadese [3], che fornisce l'attenuazione dovuta alla barriera ( $\Delta L$ ) in base alla sola differenza di percorso  $\delta$ . Tale attenuazione, che non è riferita a singole frequenze, va applicata al livello totale.

$$\Delta L = 7,7 \log \delta + 13,7 \quad \text{dB(A)}$$

### 3.3.1 Barriere acustiche di lunghezza finita

Nel caso di barriere acustiche di lunghezza finita per valutare il livello sonoro al ricevitore si tiene conto dell'energia sonora non diffratta che arriva dalle parti di sorgente non schermate e di quella che arriva per diffrazione, sommando i rispettivi contributi.

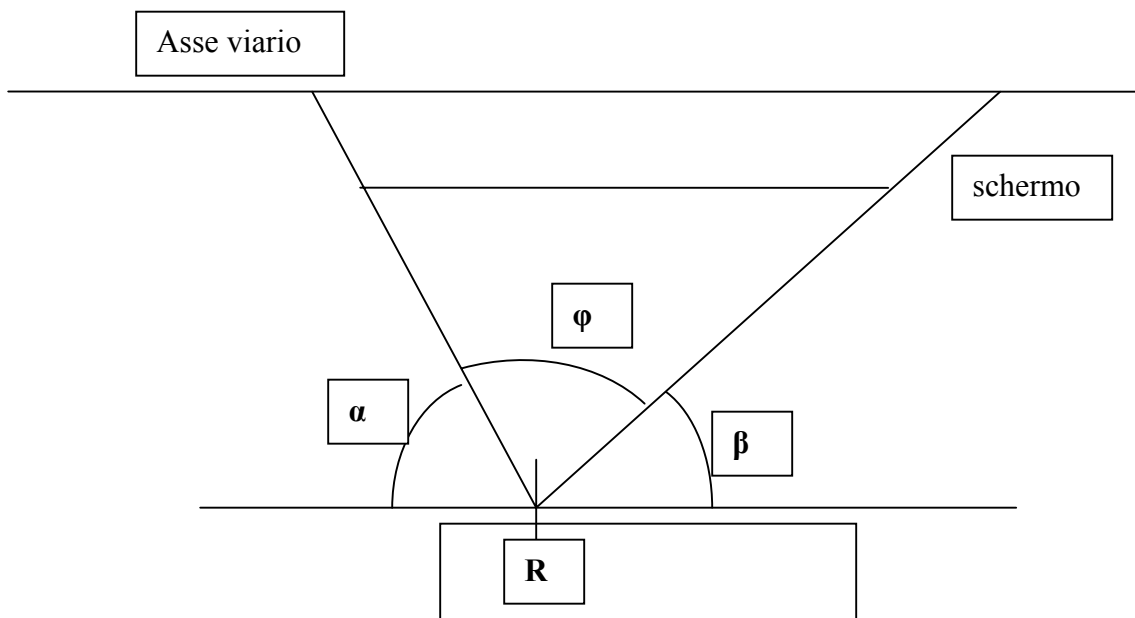


Figura 11 – Schermo di lunghezza .limitata

Si riporta come esempio il metodo proposto dal centro di ricerche francese CETUR (Centre d'études sur les transports urbains).[3].

Dato un ricevitore che riceve energia sonora proveniente da una strada situata ad una distanza  $d$  e vista sotto un angolo di  $180^\circ$ , se  $L$  è il livello sonoro che la strada produrrebbe al ricevitore in assenza di ostacoli, quando la strada è parzialmente schermata da una barriera di lunghezza  $l$ , si possono distinguere due contributi:

a) l'energia sonora compresa entro gli angoli  $\alpha$  e  $\beta$  che arriva al ricevitore senza subire diffrazione:

$$L_{(\alpha+\beta)} = L + 10 \log((\alpha + \beta) / 180^\circ)$$

con tale operazione in pratica l'energia sonora totale che arriverebbe all'ascoltatore in assenza di barriera (il cui livello sarebbe  $L$ ) viene moltiplicata per un coefficiente di riduzione (minore di uno) che risulta dal rapporto tra la somma degli angoli  $\alpha$  e  $\beta$  e l'angolo totale di  $180^\circ$ ,

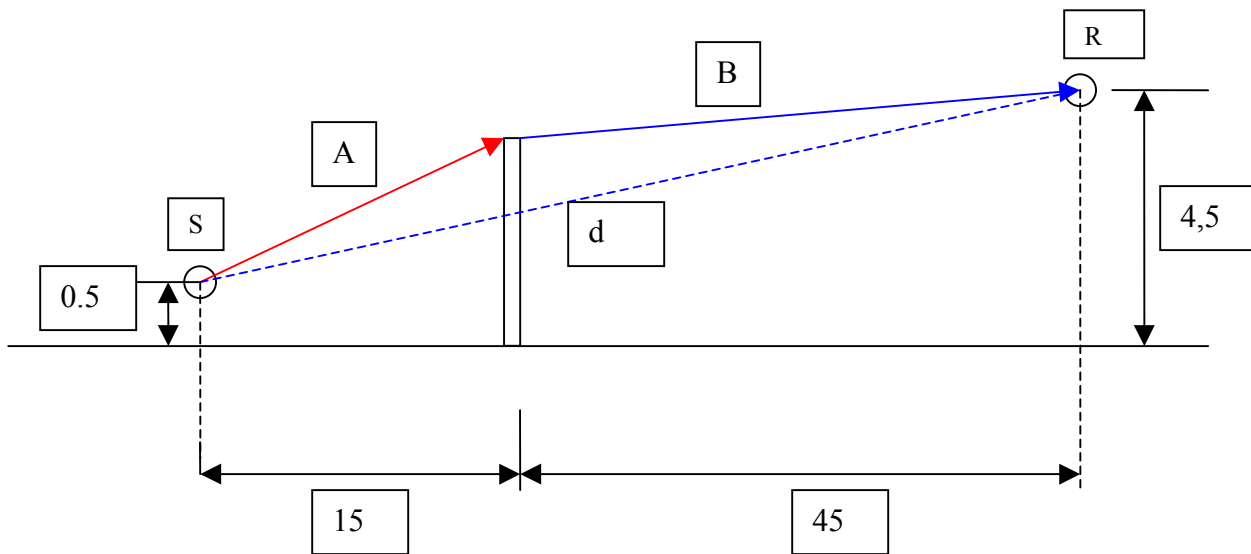
b) l'energia sonora diffratta che arriva con attenuazione  $\Delta L$  (attenuazione calcolata come se lo schermo fosse infinitamente lungo), essa è compresa entro l'angolo  $\varphi$ :

$$L_{(\varphi)} = L + 10 \log(\varphi / 180^\circ) - \Delta L$$

il livello sonoro al recettore risulterà dalla composizione dei due livelli  $L(\alpha+\beta)$  e  $L(\varphi)$ .

### 3.3.2 Esempio di calcolo dell'attenuazione dovuta ad una barriera acustica di lunghezza finita

In riferimento a quest'ultimo metodo ipotizziamo che la sorgente costituita dall'asse viario produrrebbe, in assenza di schermatura, un livello di pressione sonora totale  $L$  pari a 72,4 dB(A) nella posizione del ricevitore.



La differenza di percorso fra l'onda diretta e l'onda diffratta sarà:

$$\delta = \sqrt{2^2 + 15^2} + \sqrt{45^2 + 1^2} - \sqrt{4^2 + 60^2} = 0,175$$

in riferimento alla frequenza di 680 Hz, utilizzata per le stime di attenuazione in dB(A), dunque ad una lunghezza d'onda di 0,5 m, il numero di Fresnel sarà:

$$N = \frac{2 \cdot \delta}{\lambda} = \frac{2 \cdot 0,175}{0,5} = 0,7$$

Se lo schermo fosse di lunghezza infinita a tale numero di Fresnel corrisponderebbe un'attenuazione di 12 dB(A) per le sorgenti puntiformi (si veda anche la figura 10), che scendono a 7,5 per le sorgenti lineari (4,5 dB in meno secondo Maekawa [3]).

$$\Delta L_d = 10 \log(3 + 20 \cdot N) = 10 \log(3 + 20 \cdot 0,7) = 12,3 \quad \text{dB}$$

Ipotizziamo ora che in pianta il ricevitore veda la lunghezza dello schermo entro un angolo di  $90^\circ$ .

a) contributo dell'energia sonora non diffratta compresa entro gli angoli  $\alpha$  e  $\beta$ :

$$L_{(\alpha+\beta)} = L + 10 \log\left(\frac{\alpha + \beta}{180^\circ}\right) = 72,4 + 10 \log\left(\frac{90^\circ}{180^\circ}\right) = 72,4 - 3 = 69,4 \quad \text{dB}$$

b) l'energia sonora diffratta che arriva con attenuazione  $\Delta L$  (calcolata come se lo schermo fosse infinitamente lungo), essa è compresa entro l'angolo  $\varphi$ :

$$L_{(\varphi)} = L + 10 \log\left(\frac{\varphi}{180^\circ}\right) - \Delta L = 72,4 + 10 \log\left(\frac{90^\circ}{180^\circ}\right) - 7,5 = 61,9 \quad \text{dB}$$

il livello sonoro  $L$  al recettore risulterà dalla composizione dei due livelli  $L_{(\alpha+\beta)}$  e  $L_{(\varphi)}$ :

$$L_{(tot)} = L_{(\alpha+\beta)} + L_{(\varphi)} = 70,1 \quad \text{dB}$$

### 3.3.3 Esempio di calcolo dell'attenuazione dovuta ad una barriera acustica di lunghezza illimitata

Consideriamo una sorgente puntiforme omnidirezionale  $S$  la cui potenza sonora alle frequenze di 1000 e di 500 Hz sia la seguente:

$$\text{a } 1000 \text{ Hz : } W_S = 10 \text{ W} \text{ -----} \rightarrow L_{W,S} = 10 \cdot \log \frac{W}{W_0} = 10 \cdot \log \frac{10}{10^{-12}} = 10 \cdot \log 10^{13} = 130 \quad \text{dB}$$

$$\text{a } 500 \text{ Hz : } W_S = 1 \text{ W} \text{ -----} \rightarrow L_{W,S} = 10 \cdot \log \frac{W}{W_0} = 10 \cdot \log \frac{10^0}{10^{-12}} = 10 \cdot \log 10^{12} = 120 \quad \text{dB}$$

Se l'assorbimento da parte del suolo non è totale bisognerà tener conto anche dell'energia sonora riflessa. Si considera pertanto una sorgente-immagine  $S'$ , speculare ad  $S$ . I raggi o percorsi sonori che dalle due sorgenti raggiungono il ricettore  $R$  per diffrazione sono i due indicati in figura.

Ipotizzando che il coefficiente di assorbimento sonoro del suolo sia  $\alpha = 0.2$  a 1000 Hz e  $\alpha = 0.1$  a 500 Hz., la potenza sonora della sorgente-immagine  $S'$  sarà:

$$\text{a } 1000 \text{ Hz : } W_{S'} = 10 * (1 - 0.2) = 8 \text{ W} \text{ -----} \rightarrow L_{W,S'} = 10 \cdot \log \frac{8}{10^{-12}} = 129 \quad \text{dB}$$

$$\text{a } 500 \text{ Hz : } W_{S'} = 1 * (1 - 0.1) = 0.9 \text{ W} \text{ -----} \rightarrow L_{W,S'} = 10 \cdot \log \frac{0,9}{10^{-12}} = 119 \quad \text{dB}$$

Si trattano separatamente gli effetti della barriera sul suono proveniente dalle due sorgenti, il livello sonoro totale al ricettore  $R$  risulterà dalla somma (logaritmica) dei livelli sonori dovuti rispettivamente ad  $S$  ed  $S'$ , effettuata in ogni banda di frequenza.

$$L_{p,tot} = 10 \cdot \log \frac{p_0^2 10^{L_{p,S}/10} + p_0^2 10^{L_{p,S'}/10}}{p_0^2} = 10 \cdot \log \left( 10^{L_{p,S}/10} + 10^{L_{p,S'}/10} \right)$$



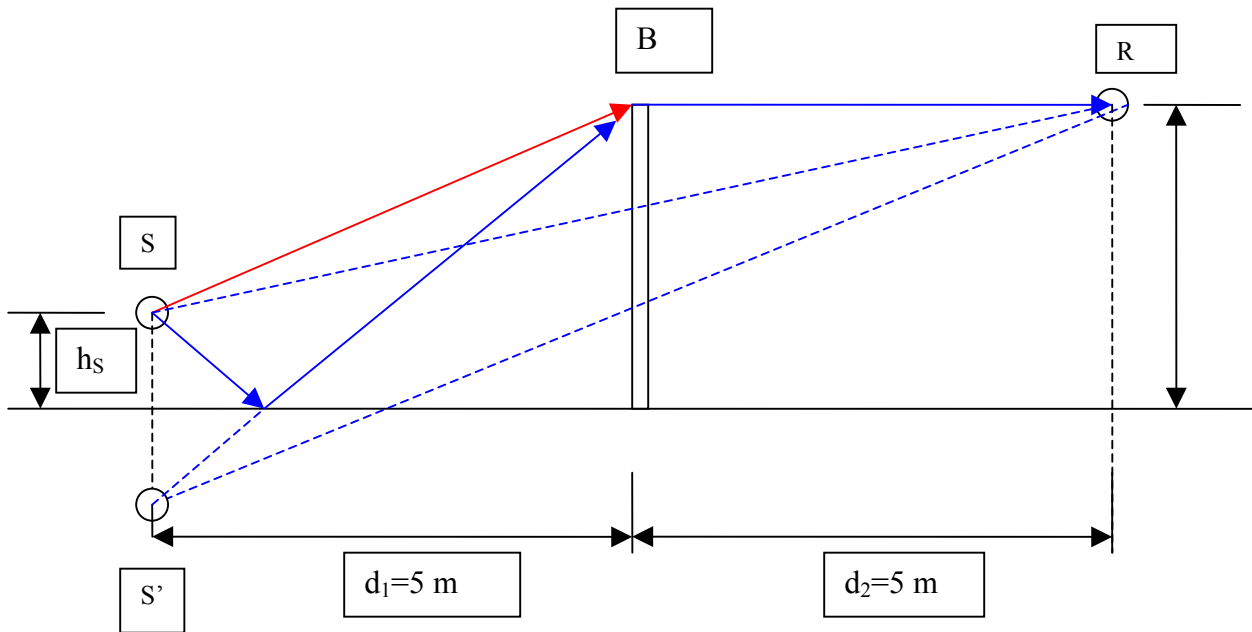


Figura 12 – Esempio di barriera acustica.

In assenza di barriera il livello sonoro in R dovuto alla sorgente reale S sarebbe determinato dalla sola divergenza sferica:

$$L_{p,S,lib} = L_{W,S} - 11 - 20 \lg r = 130 - 11 - 20 \lg 10.2 = 98.8 \text{ dB}$$

La differenza di percorso  $\delta$  dovuta alla barriera é:  $\delta = \sqrt{5^2 + 2^2} + 5 - \sqrt{10^2 + 2^2} = 0,187 \text{ [m]}$

Pertanto a 1000 Hz il numero di Fresnel sar : 
$$N = \frac{2 \cdot \delta}{\lambda} = \frac{2 \cdot 0.187}{\frac{340}{1000}} = 1,09$$

Pertanto l'attenuazione dovuta alla barriera é:  $\Delta L_{barr} = 10 \lg (3 + 20 N) = 13.9 \text{ dB}$

Dunque il livello sonoro attenuato in R é:  $L_{p,S} = L_{p,S,lib} - \Delta L_{barr} = 98.8 - 13.9 = 84.9 \text{ dB}$

Si ripete il procedimento per la frequenza di 500 Hz.

$$L_{p,S,lib} = L_{W,S} - 11 - 20 \lg r = 120 - 11 - 20 \lg 10.2 = 88.8 \text{ dB}$$

La differenza di percorso  $\delta$  é sempre:  $\delta = 0.187 \text{ [m]}$

mentre a 500 Hz il numero di Fresnel sarà: 
$$N = \frac{2 \cdot \delta}{\lambda} = \frac{2 \cdot 0.187}{\frac{340}{500}} = 0.55$$

Pertanto l'attenuazione dovuta alla barriera é: 
$$\Delta L_{barr} = 10 \lg (3 + 20 N) = 11.46 \quad \text{dB}$$
  
(si nota che é minore di quella a 1000 Hz)

Dunque il livello sonoro attenuato in R é: 
$$L_{p,S} = L_{p,S,lib} - \Delta L_{barr} = 88.8 - 11.46 = 77.3 \quad \text{dB}$$

Si ripete il procedimento per la sorgente-immagine S', di cui si é calcolata la potenza.

$$L_{p,S',lib} = L_{W,S'} - 11 - 20 \lg r = 129 - 11 - 20 \lg 10.77 = 97.4 \text{ dB}$$

La differenza di percorso  $\delta$  dovuta alla barriera stavolta é:

$$\delta = \sqrt{5^2 + 4^2} + 5 - \sqrt{10^2 + 4^2} = 0.63 \text{ [m]}$$

Pertanto a 1000 Hz il numero di Fresnel sarà: 
$$N = \frac{2 \cdot \delta}{\lambda} = \frac{2 \cdot 0.63}{\frac{340}{1000}} = 3.72$$

Pertanto l'attenuazione dovuta alla barriera é: 
$$\Delta L_{barr} = 10 \lg (3 + 20 N) = 18.9 \quad \text{dB}$$
  
(come si vede é > data la > differenza di percorso)

Dunque il livello sonoro attenuato in R é: 
$$L_{p,S'} = L_{p,S',lib} - \Delta L_{barr} = 97.4 - 18.9 = 78.5 \quad \text{dB}$$

Per la frequenza di 500 Hz.

$$L_{p,S',lib} = L_{W,S'} - 11 - 20 \lg r = 119 - 11 - 20 \lg 10.77 = 87.4 \text{ dB}$$

La differenza di percorso é sempre:  $\delta = 0.63 \text{ [m]}$

Pertanto a 500 Hz il numero di Fresnel sarà: 
$$N = \frac{2 \cdot \delta}{\lambda} = \frac{2 \cdot 0.63}{\frac{340}{500}} = 1.85$$

Pertanto l'attenuazione dovuta alla barriera é: 
$$\Delta L_{barr} = 10 \lg (3 + 20 N) = 16 \quad \text{dB}$$

Dunque il livello sonoro attenuato in R é: 
$$L_{p,S'} = L_{p,S',lib} - \Delta L_{barr} = 87.4 - 16 = 71.4 \quad \text{dB}$$
  
Ora non resta che sommare i livelli di pressione sonora in R dovuti alle due sorgenti (o ai due percorsi dell'onda):

a 1000 Hz: 
$$L_{p,tot} = 10 \cdot \log(10^{84.9/10} + 10^{78.5/10}) = 86 \quad \text{dB}$$

a 500 Hz: 
$$L_{p,tot} = 10 \cdot \log(10^{77.3/10} + 10^{71.4/10}) = 78 \quad \text{dB}$$

A questi risultati andrebbe ora applicata la pesatura A.

### 3.4 Effetto della vegetazione

La presenza di un manto erboso, così come di piante ed alberi attenua la propagazione dell'energia sonora.

Ma l'effetto della vegetazione è minore di quanto la sensibilità comune porti a credere.

Come risulta dai diagrammi riportati nelle figure 13 e 14 gli effetti della vegetazione cominciano ad essere sensibili solo su distanze elevate e con spessori della cortina arborea ragguardevoli, non con una semplice fila di alberi per intendersi.

A titolo indicativo lungo trenta metri di bosco fitto si può avere un'attenuazione di 5 dB.

Come si può osservare l'effetto della vegetazione è in generale maggiore alle alte frequenze, per l'assorbimento di energia sonora da parte del fogliame (si veda il bosco denso di sempreverdi), mentre la presenza di alberi e piante dal fusto consistente consente di ottenere attenuazione anche alle basse frequenze.

## 4. La norma ISO 9613-2

La norma ISO 9613 parte seconda riguarda il calcolo dell'attenuazione del suono nella sua propagazione in ambiente esterno, proponendo un metodo di calcolo

Lo scopo principale è il calcolo del livello continuo equivalente ponderato "A" della pressione sonora efficace ( $L_{Aeq,T}$ ) come definito nella ISO 1996-1,2,3 in condizioni meteorologiche favorevoli alla propagazione del suono.

Un'altra grandezza che viene determinata è il livello sonoro mediato su un tempo lungo ( $L_{Aeq,LT}$ ) ISO 1996-1,2.

Tali condizioni sono sottovento (paragrafo 5.4.3.3 della ISO 1996-2) ovvero:

- direzione del vento compresa entro un angolo di ... dalla linea congiungente il centro della principale sorgente sonora ed il ricevitore, con vento che soffia dalla sorgente al ricevitore,
- velocità del vento compresa tra 1 e 5 m/s misurata tra 3 e 11 m da terra.

Le formule suggerite dalla norma sono da considerarsi valide in riferimento a sorgenti sonore puntiformi, qualora si abbia a che fare con sorgenti più estese (assi viari o installazioni industriali) esse dovranno essere suddivise in sezioni, ognuna con propria potenza sonora e direttività. L'attenuazione calcolata in riferimento ad un punto rappresentativo della sezione viene attribuita all'intera sezione.

Un gruppo di sorgenti puntiformi può essere rappresentato da una sola sorgente puntiforme equivalente situata al suo centro in taluni casi specificati dalla norma.

### 4.1 Definizioni

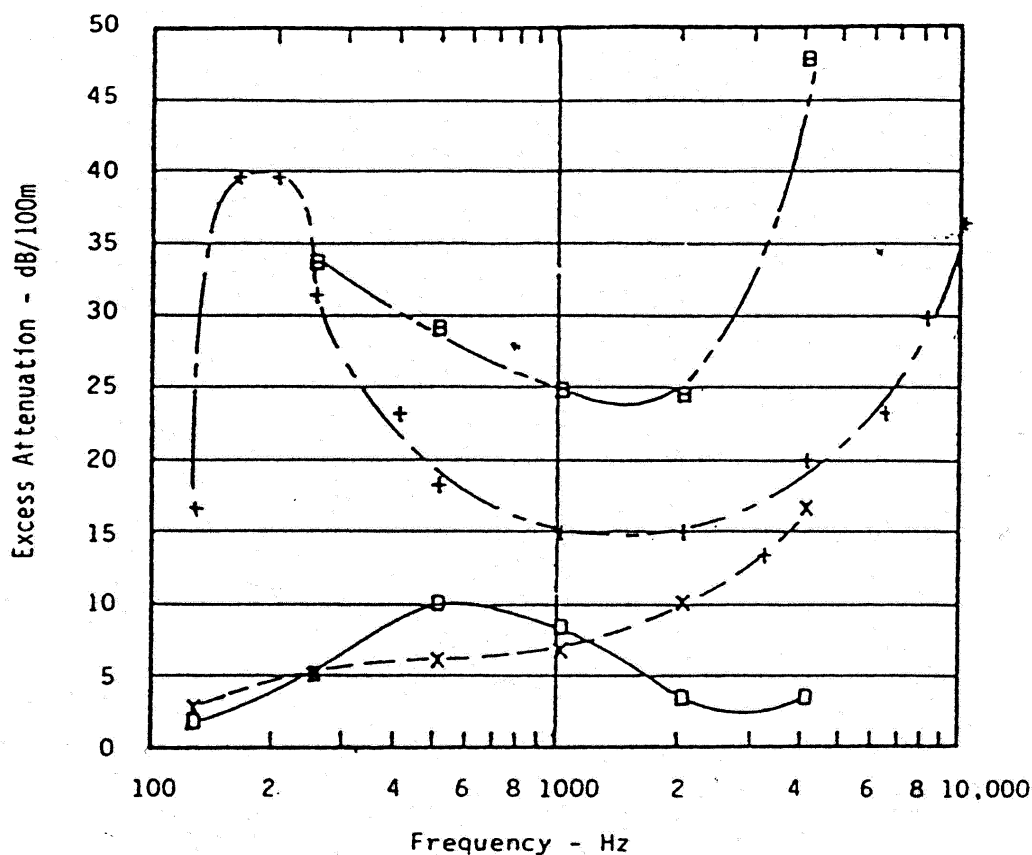
**4.1.1  $L_{Aeq,T}$  (Downwind)** - Livello continuo equivalente della pressione sonora ponderato "A" in condizioni di sottovento. È il valore del livello di pressione di un suono stazionario che, in un intervallo finito di tempo ( $t_2-t_1$ ) presenti la stessa pressione quadratica media del segnale (non stazionario) in esame.

Esso è così calcolato:

$$L_{Aeq,T} \text{ (Downwind)} = 10 \cdot \log \left( \frac{1}{t_2 - t_1} \int_{t_1}^{t_2} \frac{p_A^2(t)}{p_0^2} dt \right) \quad \text{dB}$$

dove  $p_0$  è la pressione sonora di riferimento (20  $\mu\text{Pa}$ ) e  $p_A(t)$  è la pressione sonora istantanea del segnale all'istante  $t$  ponderata A. può essere misurato con un fonometro integratore (ISO 804) con un intervallo temporale di integrazione che permetta di avere le condizioni "sottovento", come specificato nella ISO 1996-2 (5.4.3.3), si tratta in genere di un tempo abbastanza lungo da consentire di mediare gli effetti delle variazioni della velocità del vento.

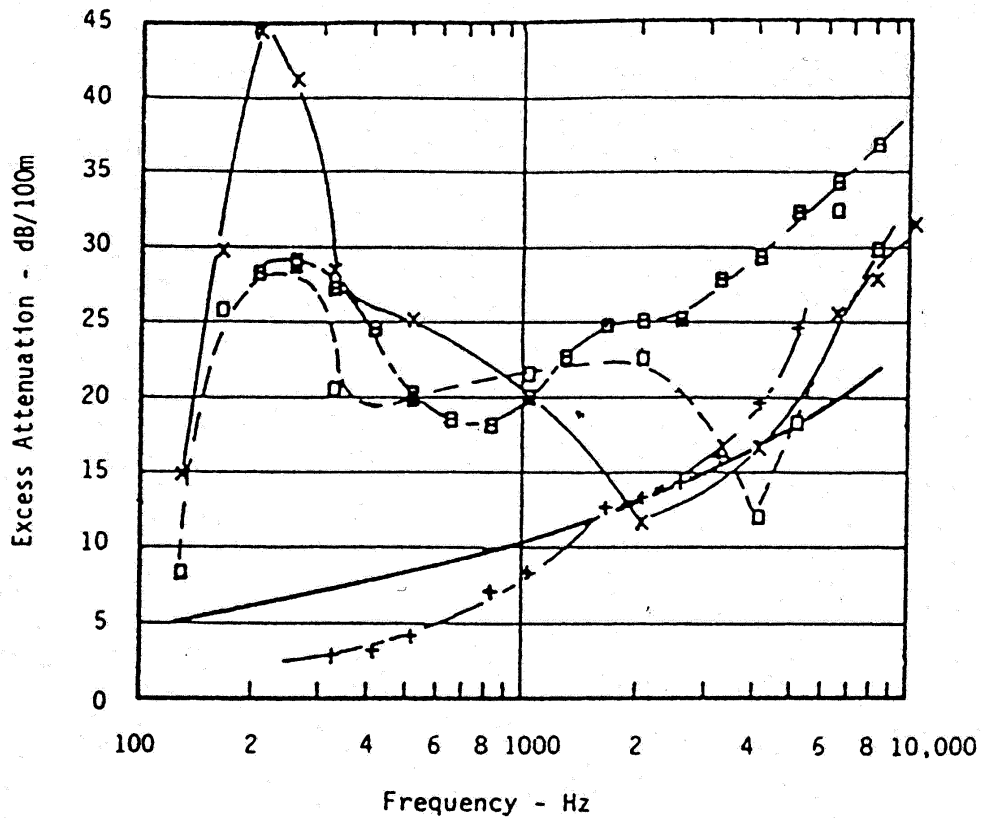
(\* "T" sta per totale somma di livelli di tutte le bande di frequenza – NdR - \*)



- — — — □ Attenuation of sound due to grass (More).<sup>10</sup>
- X — — — — X Attenuation of sound due to dense foliage (More).<sup>10</sup>
- B — — — — B Attenuation of sound due to hardwood brush (Aylor).<sup>1</sup>  
The dense hardwood brush was composed of deciduous tree and shrub species with foliage extending from the ground to a height of 6 m. The land coverage consisted of 81% shrubs, 10% red maple, 6% birch, 1.5% oak and 1.5% alder. The shrubs consisted of highbush, blueberry, sweet pepperbush and pinxterbush. The height of the shrubs varied from 1.5 to 3 m and the height of the trees extended to 6 m. The soil varied from loam to sandy and was covered with 7 to 8 cm of partially decomposed peat humus. The sound measurements were made in the summer when the leaf and foliage coverage were fairly uniform in the test area.
- + — — — — + Attenuation of sound due to hardwood brush (Aylor).<sup>1</sup>  
The test area was the same as described above except the sound measurements were made in the fall after the leaves had fallen.

### Attenuazione associata a diversi tipi di manto erboso

Figura 13 – Attenuazione ottenibile con diversi tipi di manto erboso e vegetazione bassa (cespugli). Fonte [1].



- Attenuation of sound due to trees and forest - average for all types of U.S. forest (Hoover).<sup>6</sup>
- - - - □ Attenuation of sound due to Canadian cedar, pine, spruce and deciduous forests (Embleton).<sup>3</sup>
- + - - - + Attenuation of sound due to dense evergreenwoods (Wiener and Keast).<sup>13</sup>
- - - □ Attenuation of sound due to ten-year-old hemlocks (Aylor).<sup>1</sup>  
Trees were planted on a 1.8 x 1.8 m grid over a 37 x 66 m area and were left undisturbed. Bare branches and twigs existed from a height of 2.5 m to 6 m. The leaf canopy was closed and extended upwards from 6 m. The soil was sandy loam covered with a .6 to 1.2 cm layer of needles.
- x- - - x Attenuation of sound due to 16 m tall red pine (Aylor).<sup>1</sup>  
The leaf canopy was closed and extended upwards from 10.5 m above the ground. The trunks were free of branches to a height of 8 m. Average distance between trees was 3.3 m. The ground was covered with 2.5 cm of organic soil in addition to 2.5 cm of more recently fallen litter.

## Attenuazione associata a diversi tipi di alberi o foreste

Figura 14 – Attenuazione ottenibile con diversi tipi di alberi. Fonte [1].

**4.1.2  $L_{Downwind}$**  - Livello medio di pressione sonora in bande di ottava in condizioni di sottovento. È la componente in bande di ottava del Livello continuo equivalente della pressione sonora in condizioni di sottovento, come definito al punto precedente, ma senza la ponderazione "A".

**4.1.3  $L_{Aeq,LT}$**  - Livello di pressione sonora mediato su un tempo lungo. È il Livello continuo equivalente della pressione sonora ponderato "A" misurato in un periodo sufficientemente lungo da includere diverse condizioni meteorologiche.

**4.1.4  $L_{WD}$**  - Livello effettivo di potenza sonora nella direzione di propagazione. Per una sorgente puntiforme direzionale è il livello di potenza sonora in bande di ottava di una sorgente puntiforme omnidirezionale, sita nella stessa posizione, che produca nel punto di ascolto lo stesso livello di pressione in bande di ottava.

**4.1.5  $L_W$**  - Livello di potenza sonora della sorgente in bande di ottava in condizioni di campo libero. È quello che si può misurare seguendo le norme ISO 3740 (per le macchine) o la ISO 8297(per gli impianti industriali)

## 4.2 Metodo di calcolo

Il livello medio di pressione sonora in bande di ottava in condizioni di sottovento  $L_{Downwind}$  va calcolato per ogni sorgente puntiforme e per ogni banda di ottava (come specificato nella IEC 255) nel range di frequenze da 63 a 8000 Hz utilizzando la seguente relazione:

$$(18) \quad L_{Downwind} = L_{WD} - A \quad \text{dB}$$

dove il termine A, che rappresenta l'attenuazione totale in bande di ottava durante la propagazione, è composto dai seguenti contributi:

$$(19) \quad A = A_{div} + A_{atm} + A_{ground} + A_{refl} + A_{screen} + A_{misc} \quad \text{dB}$$

dove:

$A_{div}$  = attenuazione da divergenza geometrica (sferica nel caso della sorgente puntiforme in questione),

$A_{atm}$  = attenuazione dovuta all'assorbimento da parte dell'aria,

$A_{ground}$  = attenuazione dovuta all'effetto suolo,

$A_{refl}$  = attenuazione dovuta a riflessioni da parte di ostacoli,

$A_{screen}$  = attenuazione dovuta a effetti schermanti,

$A_{misc}$  = attenuazione dovuta alla somma di altri effetti.

La ponderazione "A", in ogni banda di ottava, può essere applicata singolarmente ad ognuno di questi contributi oppure alla loro somma.

Il Livello continuo equivalente della pressione sonora ponderato "A" in condizioni di sottovento  $L_{Aeq,T}$  (Downwind) risulta dalla somma, estesa a tutte le  $N$  sorgenti presenti, dei singoli livelli di pressione ottenuti con le ultime due equazioni per ogni sorgente e per ogni banda di frequenza.

(\* il livello totale in ogni banda di frequenza sarà: \*)

$$L = 10 \cdot \log \sum_{i=1}^N 10^{\frac{L_i}{10}} \quad \text{dB}$$

Il Livello di pressione mediato su un tempo lungo  $L_{Aeq,LT}$  è uguale al  $L_{Aeq,T}$  (Downwind) corretto con un termine che tenga conto della variabilità delle condizioni meteorologiche:

$$L_{Aeq,LT} = L_{Aeq,T} (\text{Downwind}) - C_{meteo} \quad \text{dB}$$

Il livello effettivo di potenza sonora per bande di ottava nella direzione di propagazione ( $L_{WD}$ ) è dato dal livello di potenza in campo libero ( $L_W$ ) più un termine che tiene conto della direttività della sorgente ( $DC$ ), esso quantifica la differenza di irraggiamento nella direzione considerata tra la sorgente in esame ed una sorgente omnidirezionale:

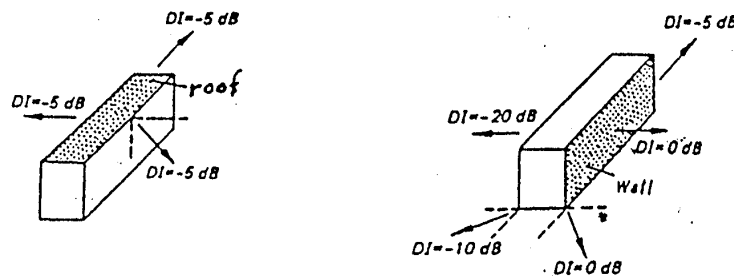
$$L_{WD} = L_W + DC \quad \text{dB}$$


ovviamente per una sorgente puntiforme omnidirezionale  $DC$  sarà pari a 0 dB.

La correzione  $DC$  è data dall'indice di direttività propria della sorgente ( $DI$ ) più un indice  $K_0$  che tiene conto delle condizioni al contorno che modificano l'angolo solido entro cui avviene l'emissione.

#### 4.2.1 L'indice di direttività $DI$

Ricordando quanto anzidetto, l'indice di direttività  $D$  (definito dalla 11) descrive in che misura il livello di pressione sonora generato in un dato punto da una sorgente direzionale si discosta da quello che sarebbe generato nello stesso punto da una sorgente omnidirezionale di pari potenza e collocata nella stessa posizione. La ISO 3744 descrive come tale indice possa essere derivato da misure.



 superficie irradiante

Valori approssimati per gli indici di direttività di superfici irradianti degli edifici (muri, tetti, finestre, porte). La freccia indica la direzione della radiazione per l'indice.

Figura 15

Quando dei vincoli esterni alla sorgente modificano l'angolo solido  $\Omega$  entro cui avviene l'emissione (riducendolo rispetto al valore massimo di  $4\pi$  [st]), l'indice  $K_0$ , che tiene conto di questa riduzione, è calcolabile in generale come:

$$K_0 = 10 \cdot \log \frac{4\pi}{\Omega} \quad \text{dB}$$

la restrizione dell'angolo solido può essere dovuta alla presenza di superfici riflettenti nelle vicinanze della sorgente, come nel caso del suolo, ma l'effetto di questo è già compreso nel termine  $A_{ground}$ .

La Tabella I riporta il valore di  $K_0$  (in dB) per situazioni tipiche. Si veda a tal proposito anche la Figura 1.

Tabella I - Valori dell'indice  $K_0$  (in dB) per tener conto dell'emissione all'interno di un angolo solido  $\Omega$  minore di  $4\pi$  [st]

Condizione della sorgente	$K_0$ (in dB)
Sorgente con radiazione sferica in un spazio libero	0
Sorgente vicina ad una superficie riflettente (diversa dal terreno)	3
Sorgente vicina alla linea di intersezione tra due piani riflettenti, tra loro perpendicolari, uno dei quali è il terreno	3
Sorgente vicina alla linea di intersezione tra due piani riflettenti, tra loro perpendicolari, nessuno dei quali è il terreno	6
Sorgente vicina al punto di intersezione tra tre piani riflettenti, tra loro perpendicolari, uno dei quali è il terreno	6
Sorgente vicina al punto di intersezione tra tre piani riflettenti, tra loro perpendicolari, nessuno dei quali è il terreno	9

#### 4.2.2 Attenuazione da divergenza geometrica

Come già visto nel paragrafo 1.2 l'attenuazione da divergenza geometrica. (sferica nel caso delle sorgenti puntiformi qui considerate) è calcolabile

$$A_{\text{div}} = 20 \log \frac{d}{d_0} + 11 \quad \text{dB}$$

dove  $d_0$  è la distanza di riferimento alla quale è stato valutato il livello di potenza sonora direzionale ( $L_{\text{WD}}$ ) della sorgente (NB. la formula è diversa dalla (4) perché quest'ultima era basata sul livello di pressione efficace misurato ad una distanza nota).

#### 4.2.3 Attenuazione da assorbimento da parte dell'aria

L'attenuazione da assorbimento da parte dell'aria ( $A_{\text{atm}}$ ) è definita come:

$$A_{\text{atm}} = \frac{\alpha d}{1000} \quad \text{dB}$$

dove  $d$  è la distanza in metri ed  $\alpha$  è il coefficiente di attenuazione atmosferica, espresso in dB/km. Quest'ultimo è funzione, oltreché della frequenza, dei vari parametri che caratterizzano fisicamente l'aria, in particolare: temperatura ed umidità relativa. In misura minore  $\alpha$  dipende anche dalla pressione atmosferica.

Valori di  $\alpha$  relativi alla temperatura di 15 °C sono riportati nella Tabella II. Valori relativi ad altre temperature sono riportati dalla ISO 9613 parte prima.

Come si può osservare dai valori riportati in tabella, con un umidità relativa del 50%  $A_{\text{atm}}$  è dell'ordine di 1-2 dB al km per le frequenze medie, e sale notevolmente alle alte frequenze.



Tabella II

Coefficiente di attenuazione atmosferica  $\alpha$  in bande di 1/3 ottava, in funzione della percentuale di umidità relativa, a 15°C. [4]

Freq. (Hz)	Umidità relativa (%)										
	10	15	20	30	40	50	60	70	80	90	100
50	0,268	0,224	0,189	0,141	0,111	0,0914	0,0774	0,670	0,591	0,528	0,477
63	0,353	0,310	0,272	0,212	0,171	0,142	0,121	0,105	0,0927	0,0831	0,0752
80	0,454	0,413	0,378	0,311	0,257	0,217	0,187	0,163	0,145	0,113	0,118
100	0,577	0,531	0,504	0,441	0,378	0,326	0,285	0,251	0,224	0,202	0,184
125	0,735	0,667	0,647	0,601	0,539	0,479	0,426	0,381	0,343	0,312	0,285
160	0,956	0,828	0,806	0,786	0,740	0,681	0,621	0,565	0,516	0,473	0,436
200	1,28	1,04	0,991	0,989	0,973	0,930	0,874	0,815	0,757	0,704	0,655
250	1,78	1,33	1,22	1,21	1,23	1,22	1,18	1,13	1,07	1,02	0,959
315	2,55	1,77	1,54	1,47	1,50	1,53	1,53	1,51	1,47	1,41	1,36
400	3,74	2,44	2,00	1,79	1,81	1,87	1,91	1,92	1,91	1,89	1,85
500	5,58	3,49	2,70	2,23	2,18	2,24	2,31	2,36	2,40	2,41	2,41
630	8,36	5,11	3,80	2,89	2,68	2,69	2,75	2,84	2,91	2,97	3,01
800	12,5	7,63	5,50	3,89	3,41	3,29	3,31	3,38	3,48	3,57	3,65
1000	18,4	11,5	8,17	5,45	4,51	4,16	4,06	4,08	4,15	4,25	4,35
1250	26,5	17,4	12,3	7,90	6,22	5,49	5,17	5,05	5,05	5,11	5,20
1600	36,9	26,0	18,6	11,7	8,90	7,55	6,86	6,51	6,35	6,30	6,32
2000	49,3	38,3	28,2	17,7	13,1	10,8	9,50	8,75	7,31	8,07	7,95
2500	62,5	54,8	42,2	26,9	19,7	15,9	13,6	12,2	11,4	10,8	10,4
3150	75,5	75,7	62,1	41,0	29,9	23,8	20,1	17,7	16,1	15,0	14,3
4000	87,3	99,9	88,8	62,0	45,7	36,2	30,3	26,4	23,7	21,7	20,3
5000	97,4	123	122	92,4	69,7	55,4	46,2	39,9	35,5	32,2	29,8
6300	106	151	161	135	105	84,7	70,8	61,1	54,0	48,7	44,7
8000	114	174	202	190	156	129	108	93,7	82,8	74,6	68,1
10000	123	195	242	257	226	192	265	144	127	115	105

### 4.2.3 Attenuazione dovuta all'effetto-suolo

L'attenuazione da effetto-suolo è dovuta all'interferenza tra il suono diretto e quello riflesso dal terreno, pertanto, a meno di non far entrare in gioco altri effetti, si assume che il terreno abbia superficie piatta, orizzontale o di pendenza costante.

Il terreno situato tra sorgente e ricevitore è diviso in tre regioni:

- regione della sorgente, va dalla sorgente fino ad una distanza pari a trenta volte l'altezza della sorgente ( $h_s$ ), con un valore massimo che coincide con la distanza sorgente-ricevitore proiettata sul terreno ( $d_p$ ),
- regione del ricevitore, va dal ricevitore sino ad una distanza pari a trenta volte l'altezza del ricevitore ( $h_r$ ), con un valore massimo che coincide con la distanza sorgente-ricevitore proiettata sul terreno ( $d_p$ ),
- regione intermedia, che è quella compresa tra le due precedenti, come indicato in figura, essa può non esservi se  $d_p < (30 h_s + 30 h_r)$ .

Il *fattore di terreno G* descrive le proprietà di ogni terreno, si riportano i valori di tre esempi.

- Terreno duro*, come: pavimentazione, acqua, ghiaccio, cemento, tutti i terreni a bassa porosità, in tal caso  $G=0$ .
- Terreno poroso*, come: terreno coperto d'erba, alberi o altra vegetazione, terreno coltivabile (arato),; in tal caso  $G=1$ .
- Terreno misto*, comprende entrambi i tipi precedenti, il valore di  $G$  è compreso tra 0 ed 1 e coincide con la frazione di terreno poroso.

Per valutare l'attenuazione di una superficie in banda di ottava, si calcolano dapprima le attenuazioni relative alle tre regioni ( $A_s$ ,  $A_r$ ,  $A_m$ ) in funzione delle relative caratteristiche del terreno ( $G_s$ ,  $G_r$ ,  $G_m$ ) usando le espressioni riportate nella Tabella III. L'attenuazione totale dovuta al terreno risulta dalla somma delle tre.

$$A_{\text{ground}} = A_s + A_r + A_m \quad \text{dB}$$

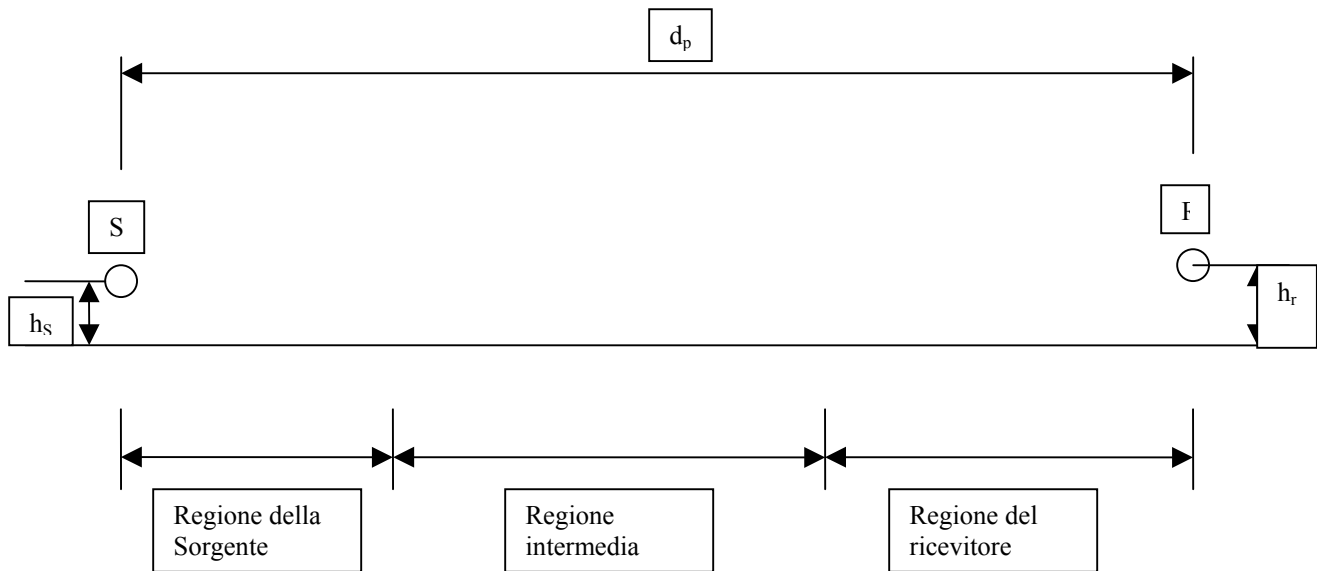


Figura 16

Frequenza centrale di banda	$A_s$	$A_r$	$A_m$
63	-1,5	-1,5	-3·q
125	$-1,5+G_s \cdot a'(h)$	$-1,5+G_r \cdot a'(h)$	$-3 \cdot q \cdot (1-G_m)$
250	$-1,5+G_s \cdot b'(h)$	$-1,5+G_r \cdot b'(h)$	$-3 \cdot q \cdot (1-G_m)$
500	$-1,5+G_s \cdot c'(h)$	$-1,5+G_r \cdot c'(h)$	$-3 \cdot q \cdot (1-G_m)$
1000	$-1,5+G_s \cdot d'(h)$	$-1,5+G_r \cdot d'(h)$	$-3 \cdot q \cdot (1-G_m)$
2000	$-1,5 \cdot (1-G_s)$	$-1,5 \cdot (1-G_r)$	$-3 \cdot q \cdot (1-G_m)$
4000	$-1,5 \cdot (1-G_s)$	$-1,5 \cdot (1-G_r)$	$-3 \cdot q \cdot (1-G_m)$
8000	$-1,5 \cdot (1-G_s)$	$-1,5 \cdot (1-G_r)$	$-3 \cdot q \cdot (1-G_m)$

Dove:

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

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

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

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

$$q = 1 - \frac{30 \cdot (h_s + h_r)}{d_p} \quad \text{per } d_p > 30 \cdot (h_s + h_r)$$

$$q = 0 \quad \text{per } d_p \leq 30 \cdot (h_s + h_r)$$

$A_{\text{ground}}$  può essere calcolato in modo più semplice qualora sussistano certe condizioni ovvero:

- spettro sonoro a larga banda e prevalentemente piatto (senza rilevanti componenti tonali),
- terreno poroso o prevalentemente poroso,
- si voglia calcolare solo il livello di pressione ponderato "A" nella posizione del ricevitore.

In tal caso si può usare la formula:

$$A_{\text{ground}} = 4,8 - \frac{2 \cdot h_m}{d} \left(17 + \frac{300}{d}\right) \quad \text{dB}$$

dove d è la distanza sorgente-ricevitore ed  $h_m$  è l'altezza media del cammino di propagazione dal suolo (in metri). Valori negativi di  $A_{\text{ground}}$  devono essere sostituiti con valori nulli.

Utilizzando questa procedura alternativa di calcolo si deve introdurre un ulteriore termine di correzione della direttività DC nella formula per il calcolo del  $L_{\text{WD}}$  (Il livello effettivo di potenza sonora per bande di ottava nella

direzione di propagazione), a causa dell'apparente aumento del livello di potenza dovuto alle riflessioni sul terreno in prossimità della sorgente:

$$DC = 10 \cdot \log \left( 1 + \frac{d_p^2 + (h_s - h_r)^2}{d_p^2 + (h_s + h_r)^2} \right) \quad \text{dB}$$

dove  $h_s$ ,  $h_r$  e  $d_p$  hanno sempre il significato prima definito.

#### 4.2.4 Effetto delle riflessioni

Le riflessioni in oggetto sono quelle sulle superfici più o meno verticali, tipicamente le facciate degli edifici, che possono aumentare il livello sonoro al ricevitore. Non vengono invece inclusi in questo termine gli effetti delle riflessioni sul terreno (già incluse nel termine  $A_{\text{ground}}$ ) né quelli delle riflessioni su superfici vicine al ricevitore, *che riducono il livello da esso percepito*.

Il termine  $A_{\text{refl}}$  avrà segno negativo in modo da descrivere un aumento del livello di pressione (si ricordi che nella formula finale (18) verrà sottratto).

Gli effetti delle riflessioni vanno calcolati in tutte le bande di ottava per le quali:

- si può costruire una riflessione speculare,
- il coefficiente di riflessione sulla superficie è maggiore di 0,2,
- la superficie sia sufficientemente larga, in modo che la frequenza centrale della banda considerata soddisfi la seguente relazione:

$$f_c > \frac{2 \cdot c}{a_r \cdot \cos \beta} \cdot \frac{d_{s,o} \cdot d_{o,r}}{d_{s,o} + d_{o,r}} \quad [\text{Hz}]$$

dove:  $c$  è la velocità del suono nell'aria [m/s],  $d_{s,o}$  è la distanza sorgente-punto di riflessione [m],  $d_{o,r}$  è la distanza punto di riflessione - ricevitore [m],  $\beta$  è l'angolo di incidenza e  $a_r$  l'area della superficie riflettente [m<sup>2</sup>].

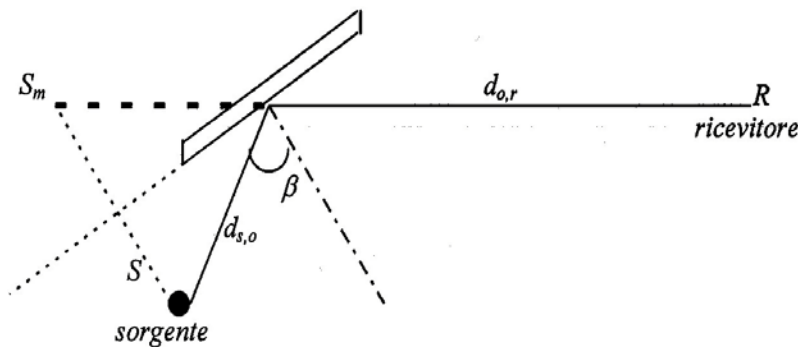


Figura 17 - Riflessione speculare

Quando in una banda di ottava una delle suddette condizioni non è soddisfatta il termine  $A_{\text{refl}}$  assume valore nullo.

Il termine  $A_{\text{refl}}$  sarà calcolabile con la:

$$A_{\text{refl}} = -10 \cdot \log(1 + \rho) \quad \text{dB}$$

dove  $\rho$  è il coefficiente di riflessione della superficie. Valori indicativi di tale coefficiente si trovano nella seguente Tabella IV.

Tabella IV

Tipo di superficie	Coefficiente di riflessione $\rho$
Muri piani rigidi	1
Muri di edifici con finestre, piccole nervature o cavità	0,8
Muri di edif. Industriali con più del 50% della superficie occupata da aperture	0,4
Superfici rigide e cilindriche (cisterne, sili), solo se la distanza $d_{sc}$ tra la sorgente S ed il cilindro C è $\ll$ della distanza $d_{cr}$ cilindro e ricevitore R allora si applica la formula riportata, dove: D è il diametro del cilindro, $\Phi$ è l'angolo supplementare a quello tra le direzioni SC e CR	$D \cdot \sin(\Phi/2) \cdot 2 \cdot d_{sc}$
Installazioni impiantistiche all'aperto (tubazioni, torri e simili)	0

Quando invece le condizioni di trasmissione per le sorgenti reale ed immaginaria sono sensibilmente diverse, si deve considerare la presenza della sorgente immaginaria oltre a quella reale per entrambe il valore di  $A_{refl}$  sarà nullo mentre il livello di potenza della sorgente immaginaria sarà dato da:

$$L_{WR,image} = L_{WR} + 10 \cdot \log \rho + DC_r \quad \text{dB}$$

dove  $DC_r$  è il livello di potenza effettivo della sorgente nella direzione dell'oggetto riflettente meno quello nella direzione del ricevitore ( $L_{WR}$  è invece il liv di potenza nella direzione del ricevitore) per la sorgente immaginaria tutti i terminio di attenuazione della (19), come  $\rho$  e  $DC_r$ , devono essere calcolati in funzione del cammino di propagazione del suono riflesso.

Se il livello di pressione della sorgente immaginaria nella posizione del ricevitore è inferiore di più di 7 dB rispetto a quello della sorgente reale, essa sarà ignorata.

#### 4.2.5 Effetto degli schermi (o barriere)

Un oggetto è considerato schermo o barriera quando:

- la sua densità superficiale (massa frontale) è almeno di  $10 \text{ kg/m}^2$ ,
- la sua superficie non presenta crepe o interruzioni,
- è di altezza tale da limitare o impedire totalmente la vista tra sorgente e ricevitore,
- la sua profondità misurata lungo la linea sorgente-ricevitore è maggiore della lunghezza d'onda alla frequenza centrale della banda considerata.

L'attenuazione dovuta allo schermo o "insertion loss" ( $A_{screen}$ ) è definita come la differenza tra il livello di pressione misurato al ricevitore con e senza la barriera.

In condizioni sottovento l'attenuazione dell'energia sonora che passa (e subisce diffrazione) sul bordo superiore sarà data da:

$$A_{screen} = D_z - A_{ground} > 0 \quad \text{dB}$$

mentre quella dell'energia che passa attorno ai bordi verticali sarà data da:

$$A_{screen} = D_z \quad \text{dB}$$

dove  $A_{\text{ground}}$  è l'attenuazione dovuta all'effetto del suolo in assenza della barriera, e  $D_z$  è l'indice di schermatura per ogni banda d'ottava.

Quest'ultima espressione si usa per calcolare il livello di pressione mediato su un tempo lungo ( $L_{\text{Aeq,LT}}$ ) nel caso di impianti industriali che presentino più sorgenti e di schermature costituite da edifici alti più di dieci metri da terra, ed anche nel caso di elevati livelli sonori all'interno dell'impianto.

Il calcolo di  $D_z$  è riferito ad un unico cammino di propagazione sorgente-ricevitore, qualora esistano più percorsi (ovvero siano considerate più sporgenti come prima definite) allora si dovranno stimare separatamente i contributi dei vari cammini al livello di pressione sonora al ricevitore.

$D_z$  è così calcolato

$$D_z = 10 \log \left( 3 + \frac{C_2}{\lambda} \cdot C_3 \cdot z \cdot K_W \right) \text{ dB}$$

Dove:

$C_2=20$  include l'effetto delle riflessioni sul terreno,

$C_3=1$  per singola rifrazione e

$$C_3 = \frac{1 + \left(\frac{5\lambda}{e}\right)^2}{\frac{1}{3} - \left(\frac{5\lambda}{e}\right)^2} \text{ per doppia rifrazione}$$

$\lambda$  è la frequenza di centro banda,  $z$  è la differenza di percorso tra il suono diretto e quello diffratto,  $K_W$  è un fattore di correzione per gli effetti meteorologici, ed  $e$  è la distanza tra i due bordi che danno luogo alla doppia diffrazione.

L'espressione riportata per il calcolo di  $C_3$  fornisce valori intermedi fra quelli relativi ai due casi estremi: singola diffrazione ( $e=0$ ,  $C_3=1$ ) e doppia diffrazione ( $e \gg \lambda$ ,  $C_3=3$ ).

Si noti come l'equazione per il calcolo di  $D_z$  possa coincidere con la (14) nel caso di singola diffrazione, in assenza di correzioni meteo e se  $C_3 = 2$ .

Non si devono assumere valori di maggiori di 20 dB per singola diffrazione (barriere sottili) e di 25 per doppia diffrazione (barriere profonde).

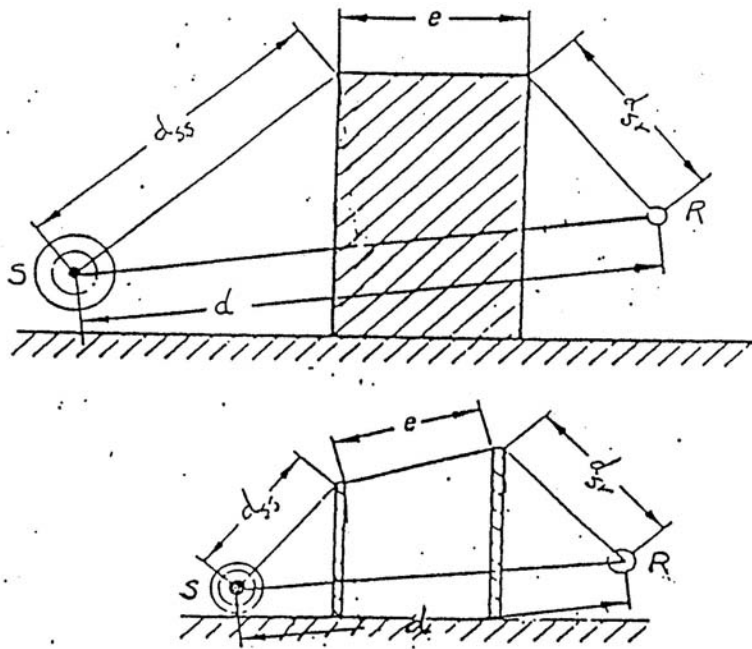
Con riferimento alla figura 18, nel caso di singola diffrazione (valore di  $e$  trascurabile) la differenza di percorso sarà:

$$z = d_{ss} + d_{sr} - d$$

mentre nel caso di doppia diffrazione:

$$z = d_{ss} + e + d_{sr} - d$$

se sorgente e ricevitore "si vedono" (la linea visiva passa sopra la barriera) allora  $z$  avrà segno negativo.



1 Doppia diffrazione. Quantità geometriche per la determinazione della differenza di cammino

Figura 18 – Doppia diffrazione

Il fattore di correzione per gli effetti meteorologici ( $K_w$ ) è =1 per  $z \leq 0$ , e per diffrazione laterale, per  $z > 0$  viene così calcolato:

$$K_w = \exp \left( - \sqrt{\frac{d_{ss} \cdot d_{sr} \cdot d}{2 \cdot z}} \right)$$

per distanze sorgente-ricevitore < 100 m si assumerà  $K_w = 1$  ottenendo un'accuratezza di 1 dB

Qualora fossero presenti più di due schermi in serie si può usare lo stesso metodo di calcolo considerando però i soli due schermi maggiormente influenti.

#### 4.2.6 Attenuazioni varie

Il termine  $A_{misc}$  tiene conto di altre attenuazioni dovute a:

- presenza di fogliame lungo la linea di propagazione ( $A_{foliage}$ ),
- presenza di un insediamento industriale ( $A_{site}$ ),
- propagazione attraverso un insediamento urbano ( $A_{housing}$ ).

per valutare gli effetti di tali fenomeni non c'è un metodo di calcolo specifico, come negli altri casi.

#### 4.2.6.1 A<sub>foliage</sub>

Quando è presente una zona di densa vegetazione si possono assumere i seguenti valori di attenuazione. Se la zona interessa il cammino di propagazione per una lunghezza di 10-20 m l'attenuazione è espressa con un valore complessivo in dB, per estensioni maggiori è espressa in dB per metro di estensione lungo il cammino di propagazione.

Tabella V – Attenuazione in bande di ottava per propagazione attraverso una densa vegetazione.

	Freq.	di	centro	banda	(Hz)			
Distanza di Propagazione e d <sub>r</sub> (m)	63	125	250	500	1000	2000	4000	8000
10<=d <sub>r</sub> <20	0 dB	0 dB	1 dB	1 dB	1 dB	1 dB	2 dB	3 dB
20<=d <sub>r</sub> <200	0,02 dB/m	0,03 dB/m	0,04 dB/m	0,05 dB/m	0,06 dB/m	0,08 dB/m	0,09 dB/m	0,12 dB/m

#### 4.2.6.2 A<sub>site</sub>

L'attenuazione dovuta all'attraversamento di un sito industriale è dovuta alla diffrazione sui bordi degli edifici e installazioni (tubature e strutture varie). Il valore di tale attenuazione varia caso per caso, non potendolo misurare si possono usare in prima approssimazione i seguenti valori.

Tabella VI – Attenuazione in bande di ottava per propagazione attraverso installazioni industriali.

	Freq.	di	centro	banda	(Hz)			
	63	125	250	500	1000	2000	4000	8000
Attenuazione in dB/m	0	0,02	0,05	0,05	0,05	0,05	0,05	0,05

L'attenuazione cresce col cammino percorso fino ad un valore massimo di 10 dB.

#### 4.2.6.3 A<sub>housing</sub>

Nell'attraversamento di un'area abitativa l'attenuazione è dovuta agli effetti schermanti e riflettenti degli edifici. Tali effetti possono essere valutati singolarmente con i termini A<sub>screen</sub> ed A<sub>refl</sub> oppure, in modo approssimato, con la formula:

$$A_{housing} = 0,1 \cdot B \cdot d_b - 10 \cdot \log\left(1 - \frac{P}{100}\right) \text{ dB}$$

Dove:

- d<sub>b</sub> è la lunghezza del percorso attraverso l'insediamento,



- B è la densità degli edifici lungo tale cammino, valutata planimetricamente come il rapporto tra l'area di base totale degli edifici e l'area della superficie in considerazione (coperta e scoperta),
- p è la percentuale della lunghezza delle facciate degli edifici rispetto alla lunghezza totale della strada (non può superare il 90%).

Il termine  $A_{\text{housing}}$  non dovrebbe superare i 10 dB. Il primo termine del membro di destra della precedente equazione interagisce con  $A_{\text{ground}}$

Chiamando  $A_{\text{ground,b}}$  l'attenuazione da effetto suolo nella zona costruita, ed  $A_{\text{ground,o}}$  lo stesso tipo di attenuazione che si avrebbe sullo stesso percorso in assenza di edifici, per la propagazione attraverso una zona costruita  $A_{\text{ground,b}}$  è in genere nullo nell'equazione (19), se invece  $A_{\text{ground,o}}$  è maggiore di  $A_{\text{housing}}$  allora quest'ultimo termine viene ignorato.

Comprensibilmente per bassi valori della densità abitativa B  $A_{\text{ground}}$  è predominante, mentre per zone ad alta densità è predominante il termine  $A_{\text{housing}}$ .

Il secondo termine del membro di destra della stessa equazione è presente quando vi sono file di edifici ben definite lungo strade e ferrovie, purchè questo termine sia di valore inferiore alla "insertion loss" di una barriera sita nella stessa posizione e di altezza pari a quella media degli edifici (in tal caso si calcola l'attenuazione da barriera – N.d.R. -).

Se si scende nel dettaglio il valore del livello di pressione ponderato "A" in una posizione specifica di una zona costruita potrebbe differire di anche 10 dB dal valore medio calcolato con l'equazione sopra riportata.

#### 4.2.7 La correzione meteo $C_{\text{meteo}}$

Il calcolo del livello di pressione sonora mediato su un tempo lungo ( $L_{\text{Aeq,LT}}$ ): diversi mesi un anno, avviene applicando un fattore correttivo  $C_{\text{meteo}}$  al livello continuo equivalente di pressione sonora ponderato "A" in condizioni di "sottovento"  $L_{\text{Aeq,T}}$  (downwind).

Nel caso di una sorgente puntiforme che emetta in modo stazionario  $C_{\text{meteo}}$  può essere così calcolato:

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

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

dove  $C_0$  è una costante che dipende solo dalla statistica meteorologica locale riguardante la direzione e velocità del vento ed i gradienti di temperatura.

Si può osservare come gli effetti della condizione meteorologica siano piccoli per piccole distanze sorgente-ricevitore e per grandi altezze degli stessi.

Se si hanno condizioni favorevoli alla propagazione per il 50% del periodo considerato, allora  $C_0$  sarà pari a 3 dB, perché l'energia sonora emessa dalla sorgente in condizioni non favorevoli alla propagazione, cioè la metà dell'energia totale emessa nel periodo considerato (se  $C_0$  quasi coincide con  $C_{\text{meteo}}$ ), non va considerata. Analogamente se si hanno condizioni favorevoli alla propagazione per il 33% del periodo considerato  $C_0$  sarà pari a 5 dB, e così via.

Ai fini pratici  $C_0$  varia tra 0 e 5 dB.

*Per una sorgente suddivisa in più sorgenti puntiformi  $h_s$  rappresenta l'altezza della sorgente ? //l'attenuazione/ predominante, e  $d_p$  la distanza del centro di quella sorgente dal ricevitore.*

#### 4.2.8 Stima dell'accuratezza

Dai confronti tra valori stimati con il metodo sopra riportato e valori misurati del  $L_{Aeq,T}$  (downwind), risultano i valori di accuratezza riportati in tabella. Queste stime sono riferite a situazioni che non comprendono la presenza di barriere.

Tabella VII – Accuratezza in dB stimata per il  $L_{Aeq,T}$  (downwind).

		Distanza sorgente - ricevitore d [m]	
		0<d<100	100<d<1000
Altezza media sorgente-ricevitore	0<=h<5	+ - 3dB	+ -3dB
h [m]	5<=h<=30	+ -3dB	+ -3dB

#### Bibliografia

- [1] Pompoli R. e P. Fausti. *Propagazione del suono nell'ambiente esterno*. Lezione tenuta presso la Scuola di Acustica dell'Università di Ferrara nell'AA 1997-98.
- [2] Lazzarin R. e M. Strada. *Elementi di acustica tecnica*. Cleup. Padova.
- [3] D. Bertoni , A. Franchini. *Interventi per la riduzione del Rumore*. Lezione tenuta presso la Scuola di Acustica dell'Università di Ferrara nell'AA 1997-98.
- [4] Z. Maekawa. Noise reduction by screens, *Applied Acoustic* 1, pp. 157-173 (1968)
- [5] ISO (1977) **ISO 3745** "Acoustic – Determination of sound power levels of noise sources – Precision methods for anechoic and semi- anechoic room"
- [6] ISO **ISO 9613-2** "Acoustic – Attenuation of sound during propagation outdoors. A general method of calculation"
- [7] ISO (1982) **ISO 1996-1** "Acoustic – Description and measurement of environmental noise, Part 1, Basic quantities and procedures"
- [8] ISO (1982) **ISO 1996-2** "Acoustic – Description and measurement of environmental noise, Part 2, Acquisition of data pertinent to land use"
- [9] ISO (1982) **ISO 1996-3** "Acoustic – Description and measurement of environmental noise, Part 3, Application to noise limits"