***APPUNTI DI TEORIA***

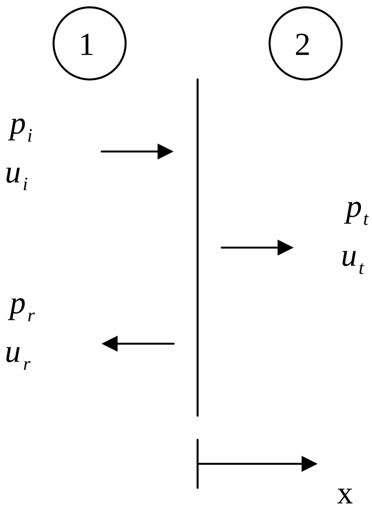
**5. PROPAGAZIONE DEL SUONO**

## 5.1 Introduzione

Le modalità di propagazione del suono dipendono principalmente dalle caratteristiche del mezzo fisico ( in questo corso l'attenzione è focalizzata sulla propagazione nei gas, in particolare nell'aria) e dalla presenza di ostacoli che interferiscono con il campo sonoro. Quando le onde sonore incontrano l'interfaccia fra due mezzi diversi (ad esempio, gas-liquido, o gas-solido) si verificano infatti fenomeni quali la riflessione, la rifrazione, l'assorbimento, la dispersione e la diffrazione, che modificano le modalità di propagazione rispetto al caso di riferimento costituito dal cosiddetto campo sonoro libero, ovvero da una situazione di propagazione in un gas omogeneo ed in assenza di ostacoli.

## 5.2 Riflessione e trasmissione del suono

Si vuole studiare il comportamento di un'onda piana in corrispondenza di una superficie piana di interfaccia tra due mezzi di diversa impedenza acustica specifica. Per semplicità si considera incidenza normale dell'onda e assenza di fenomeni dissipativi: pertanto l'energia dell'onda incidente si ripartisce in due quote associate rispettivamente all'onda trasmessa e all'onda riflessa.




Significato dei pedici

| | | |
|---|---|---|
| i | ONDA INCIDENTE | Mezzo 1 $R_1$ |
| r | ONDA RIFLESSA | |
| t | ONDA TRASMESSA | Mezzo 2 $R_2$ |

L'impedenza dei mezzi di propagazione, di cui si considera solo la parte reale (impedenza acustica caratteristica), è data da:

$$R_1 = \rho_1 c_1 \qquad\qquad R_2 = \rho_2 c_2$$

Per un'onda armonica di ampiezza $A$ e frequenza angolare $\omega$ si ha:

$$p_i = A_i \,\mathrm{sen}(\omega t\text{-}kx) = R_1 u_i$$

$$p_r = A_r \,\mathrm{sen}(\omega t+kx) = -R_1 u_r$$

$$p_t = A_t \,\mathrm{sen}(\omega t\text{-}kx) = R_2 u_t$$

Nel mezzo (1) velocità e pressione sono date dalla sovrapposizione dei contributi delle onde incidente e riflessa. Imponendo le condizioni di congruità di $p$ e $u$ all'interfaccia:

$$p_i + p_r = p_t$$

$$u_i + u_r = u_t$$

si ottiene:

$$A_i + A_r = A_t$$

$$\frac{A_i}{R_1} - \frac{A_r}{R_1} = \frac{A_t}{R_2}$$

da cui

$$p \quad \begin{cases} \dfrac{p_t}{p_i} = \dfrac{A_t}{A_i} = \dfrac{2R_2}{R_1 + R_2} \\[2ex] \dfrac{p_r}{p_i} = \dfrac{A_r}{A_i} = \dfrac{R_2 - R_1}{R_1 + R_2} \end{cases}$$

$$u \quad \begin{cases} \dfrac{u_t}{u_i} = \dfrac{2R_1}{R_1 + R_2} \\[2ex] \dfrac{u_r}{u_i} = \dfrac{R_1 - R_2}{R_1 + R_2} \end{cases}$$

$$I \quad \begin{cases} \dfrac{I_t}{I_i} = \dfrac{u_t\, p_t}{u_i\, p_i} = \dfrac{4R_1R_2}{(R_1 + R_2)^2} = t \quad COEFF. \quad DI \quad TRASMISSIONE \\[2ex] \dfrac{I_r}{I_i} = \dfrac{u_r\, p_r}{u_i\, p_i} = \dfrac{(R_2 - R_1)^2}{(R_1 + R_2)^2} = r \quad COEFF. \quad DI \quad RIFLESSIONE \end{cases}$$

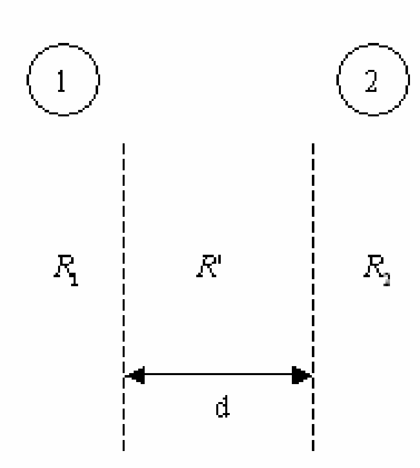
I risultati ottenuti evidenziano che:

- se $R_2 >> R_1$, ad es. se (1) = aria e (2) = solido, si ha:

$$p_r/p_i = 1; \qquad p_i + p_r = 2p_i; \qquad t = 0; \quad r = 1$$

- il coefficiente di trasmissione $t$ è massimo quando $R_1 = R_2$, ovvero quando si ha un *perfetto accoppiamento di impedenza* fra i due mezzi.

Nel caso in cui fra i mezzi (1) e (2) sia interposto un mezzo intermedio di propagazione di spessore $d$ e impedenza caratteristica $R'$, le caratteristiche di trasmissione si modificano nel modo seguente:




- se $d$ è un multiplo intero di $\lambda/2$ si ha:

$$t = \frac{4R_1R_2}{(R_1 + R_2)^2}$$

- se $d$ è un multiplo dispari di $\lambda/4$ si ha:

$$t = \frac{4R_1R_2}{\left(R' + \frac{R_1R_2}{R'}\right)^2}$$

Da cui, se $R' = \sqrt{R_1R_2}$ , risulta: $t = 1$

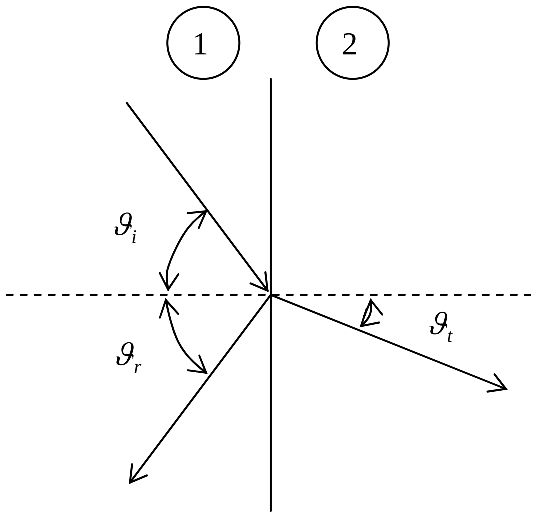
## 5.3 L'ipotesi dell'acustica geometrica

I risultati sopra ottenuti evidenziano notevoli analogie con quelli relativi alla teoria della riflessione delle onde elettromagnetiche, di cui si fa uso in ottica e nelle telecomunicazioni. Tali analogie permettono di utilizzare le leggi di Snell dell'ottica per studiare la riflessione e trasmissione di "raggi acustici" incidenti obliquamente su una superficie piana.

In pratica, le condizioni per le quali le leggi dell'acustica geometrica risultano applicabili sono:

- superfici piane di estensione molto maggiore della lunghezza d'onda $\lambda$
- dimensioni delle asperità della superficie molto minori di $\lambda$ (in pratica <≈ $\lambda$/10)

Poiché i fenomeni acustici coprono un campo di lunghezze d'onda molto ampio ($\lambda$ = 17 mm ÷ 17 m), per cui $\frac{\lambda_{\max}}{\lambda_{\min}} = 10^3$, è evidente che una determinata superficie può effettivamente soddisfare le due condizioni sopra indicate (e quindi comportarsi come uno "specchio acustico") a patto di restringere l'intervallo delle frequenze di interesse in modo da rispettare i vincoli di cui sopra.




$$\vartheta_i = \vartheta_r$$

$$sen\,\vartheta_t = \frac{c_2}{c_1} sen\,\vartheta_i$$

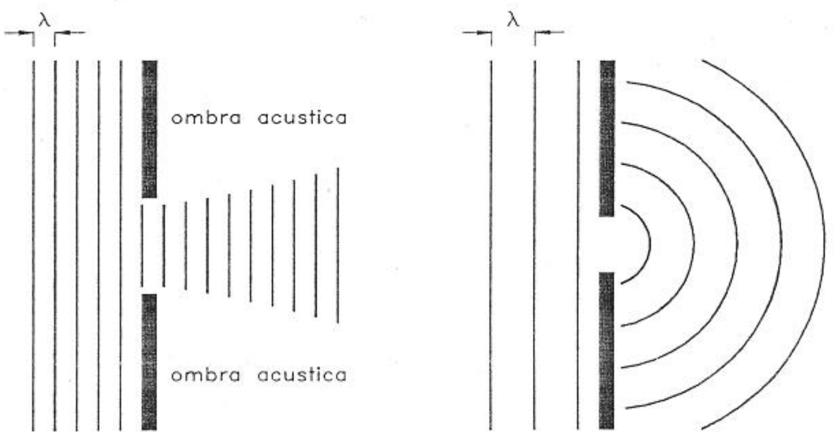
ACUSTICA GEOMETRICA

L'acustica geometrica è uno strumento molto potente per costruire modelli matematici di simulazione della propagazione del suono in applicazioni quali l'acustica architettonica e l'acustica degli ambienti esterni o industriali.

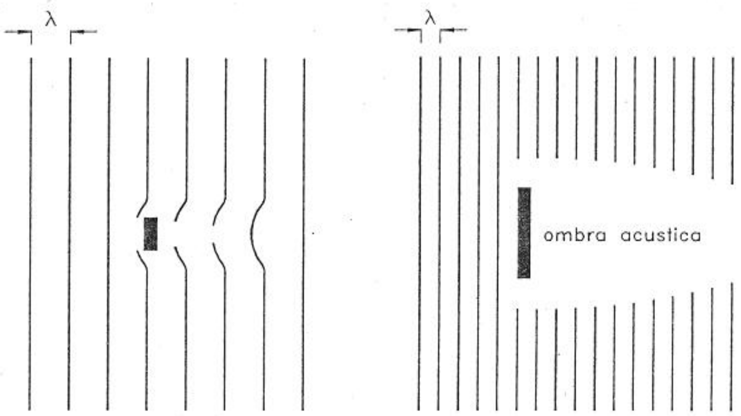
## 5.4 Diffrazione del suono

Nel caso in cui la dimensione *d* della parete o ostacolo su cui incide l'onda sonora sia confrontabile con la lunghezza d'onda $\lambda$, si verificano fenomeni di diffrazione a valle dell'ostacolo. La figura presenta due casi di interesse pratico

FORO CIRCOLARE PRATICATO IN UNA PARETE PIANA INDEFINITA




OSTACOLO PIANO DI DIMENSIONE FINITA

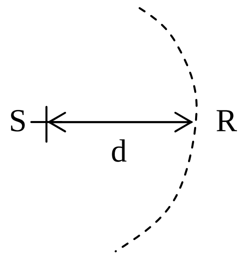



Quando l'ostacolo ha dimensioni maggiori di $\lambda$, la diffrazione fa sì che si abbia propagazione in una porzione limitata dello spazio a valle dell'ostacolo e che si generi quindi una *zona d'ombra*; al contrario, se $d < \lambda$ la presenza dell'ostacolo non influenza apprezzabilmente la propagazione per cui non si riscontra la presenza della zona d'ombra.

## 5.5 Propagazione del suono in campo libero

Condizioni di *campo sonoro libero ideale* si verificano nel caso di mezzo di propagazione omogeneo, isotropo e non dissipativo ed in assenza di ostacoli interposti tra sorgente e punti ricevitori. A tale schematizzazione sono riconducibili, almeno in prima approssimazione, i problemi di propagazione sonora negli ambienti aperti.

Indicando con S una sorgente sonora puntiforme, di cui è nota la potenza *W* ed il fattore di direttività *Q* nella direzione sorgente-ricevitore, è possibile calcolare il livello di intensità (che assumeremo coincidere numericamente con il livello di pressione sonora) nel punto ricevitore, situato a distanza *d* dalla sorgente, attraverso il seguente semplice bilancio energetico:




$$I = \frac{QW}{4\pi d^2}$$

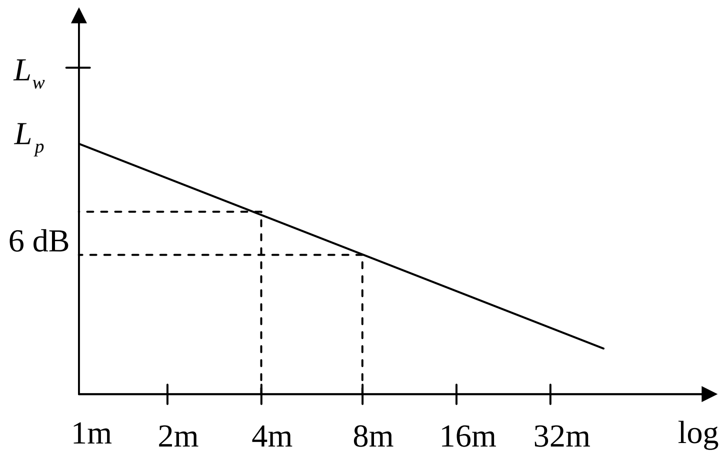
*I* = intensità sonora nel punto R
*d* = distanza sorgente-ricevitore
*W* = potenza sonora della sorgente
*Q* = fattore di reattività

In termini di livelli, introducendo i valori di riferimento $I_{ref}$ = $10^{-12}$ W/m$^2$, $W_{ref}$ = $10^{-12}$ W, $A_{ref}$ = 1m$^2$, si ottiene:

$$\frac{I}{I_{ref}} = Q\frac{W}{W_{ref}}\frac{A_{ref}}{4\pi d^2}$$

$$10\log\frac{I}{I_{ref}} = 10\log Q + 10\log\frac{W}{W_{ref}} + 10\log A_{ref} - 10\log 4\pi - 10\log d^2$$

$$L_I \cong L_p = DI + L_W + 0 - 11dB - 20\log d$$




In definitiva:

$$L_p(d) = L_w + DI - 11 - 20\log(d)$$

$$L_p(d_1) = L_p(d_2) + 20\log(\frac{d_2}{d_1})$$

Il termine 20 log($d$) che compare nelle precedenti equazioni rappresenta l'attenuazione per *divergenza geometrica dell'onda*; questo termine dipende dalla forma del fronte d'onda (in questo caso *sferica* in quanto si è considerata puntiforme la sorgente sonora). La diminuzione del livello sonoro risultante è pari a –6 dB per ogni raddoppio di distanza.

Il livello di pressione sonora nelle condizioni reali risulta, a parità di distanza, generalmente inferiore a quello calcolato con le equazioni riferite al caso ideale, in quanto intervengono ulteriori termini di attenuazione dovuti alla dissipazione (assorbimento) nel mezzo di propagazione, alle condizioni meteorologiche, all'assorbimento del terreno, alla presenza di schermi.

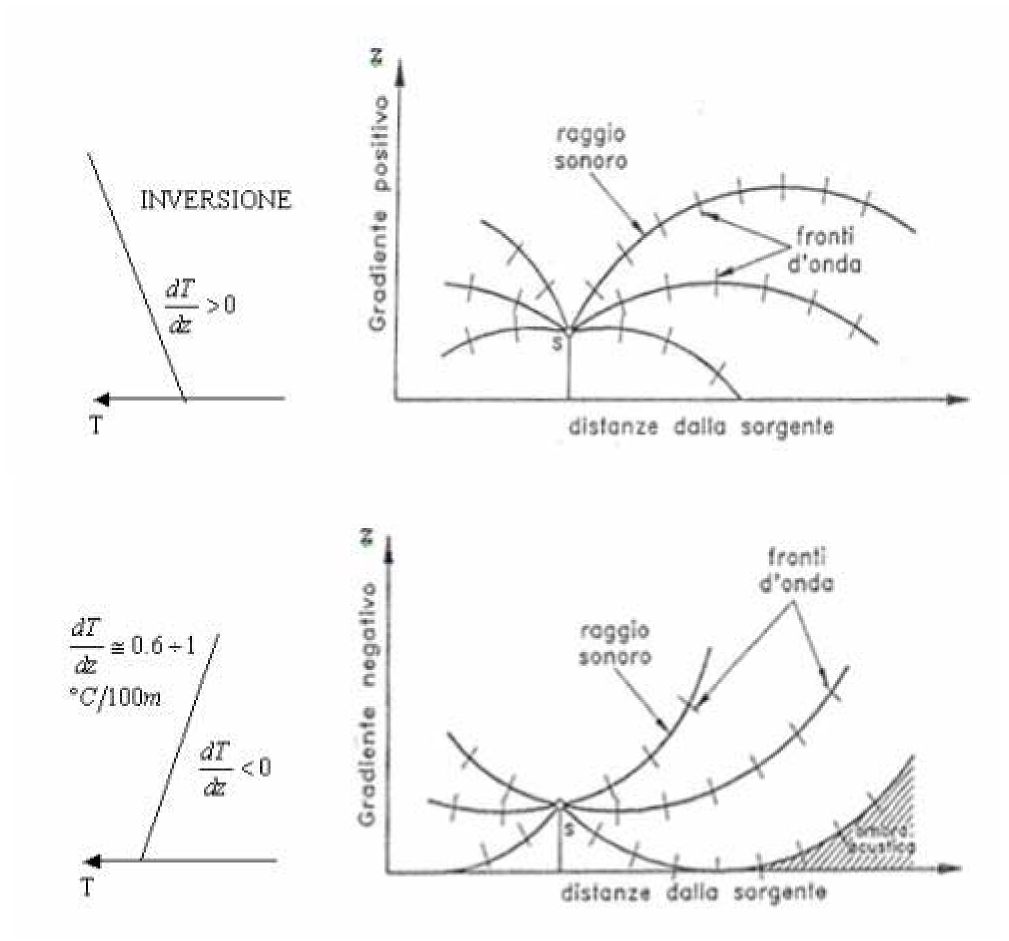
### 5.5.1 Assorbimento del mezzo di propagazione

E' determinato dalla dissipazione di energia dovuto sia alla conduzione termica e alla viscosità dell'aria, nonché all'effetto di transizioni rotazionali e vibrazionali nelle molecole di $O_2$. Tali effetti, più evidenti alle frequenze elevate e nel caso di aria secca, interessano la propagazione a grandi distanze: ad esempio, per un rumore rosa si ha tipicamente un'attenuazione di circa 3 dB per distanze dell'ordine di 500÷600 m.

### 5.5.2 Effetto delle condizioni meteorologiche

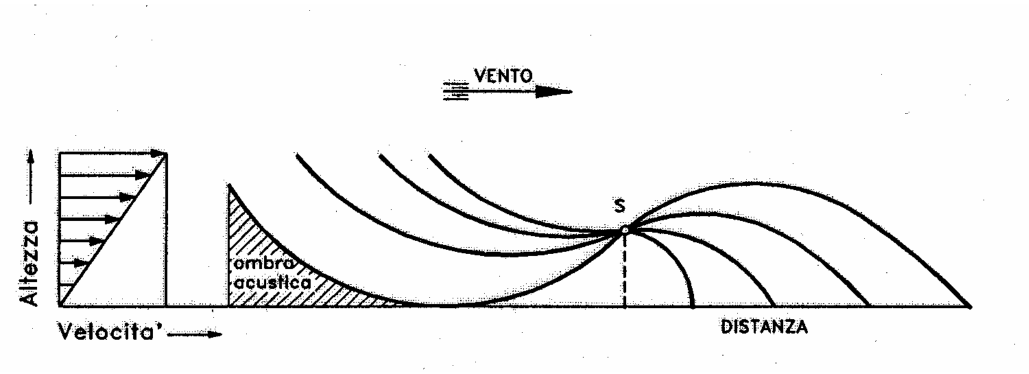
La presenza di gradienti verticali di temperatura e velocità del vento modifica le condizioni di omogeneità del mezzo di propagazione e determina un incurvamento dei raggi sonori emessi dalla sorgente; quest'ultimo fenomeno è dovuto al fatto che la velocità del suono non è più costante con la quota ma presenta anch'essa gradienti verticali.

Per quanto riguarda i gradienti verticali di temperatura, si considerano due situazioni opposte: quella di gradiente negativo (ovvero di temperatura che diminuisce con la quota), tipica delle condizioni diurne nei mesi temperati, e quella di gradiente positivo (ovvero di inversione termica), tipica delle condizioni notturne invernali.




Poiché la velocità del suono cresce in funzione della radice quadrata della temperatura assoluta, i raggi sonori si incurvano rispettivamente verso l'alto o verso il basso nei due casi considerati: la situazione di gradiente negativo determina una zona d'ombra a una certa distanza dalla sorgente, mentre la situazione di inversione determina una "concentrazione" dei raggi sonori e quindi un incremento dei livelli.

In prossimità del suolo la velocità del vento aumenta con la quota per effetto dei fenomeni di strato limite fluidodinamico. La velocità del suono effettiva, somma vettoriale della velocità di propagazione in aria ferma e della velocità del vento, sarà quindi diversa alle varie quote: i raggi sonori si incurvano come indicato in figura e si verifica una zona d'ombra sopravento e una zona di concentrazione sottovento rispetto alla sorgente.

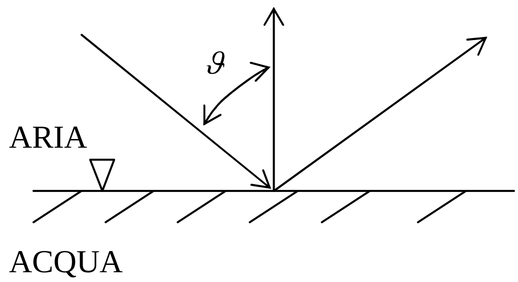



La propagazione del suono è inoltre influenzata dalla presenza di nebbia, pioggia o neve.

### 5.5.3 Effetto del suolo

La riflessione delle onde sonore da parte del suolo può dare luogo ad un rinforzo della pressione sonora percepita, nel caso di suolo riflettente, oppure ad un'attenuazione nel caso di suolo coperto di vegetazione.

Nel caso di superficie riflettente, l'angolo limite $\theta$ per il quale si verifica perfetta riflessione dipende dalle impedenze caratteristiche dei due mezzi; ad esempio, nel caso di riflessione su uno specchio d'acqua risulta:




$$ARIA \quad \begin{cases} c_a = 344\, m/s \\ Z_a = 410\, Kg/ms^2 \end{cases}$$

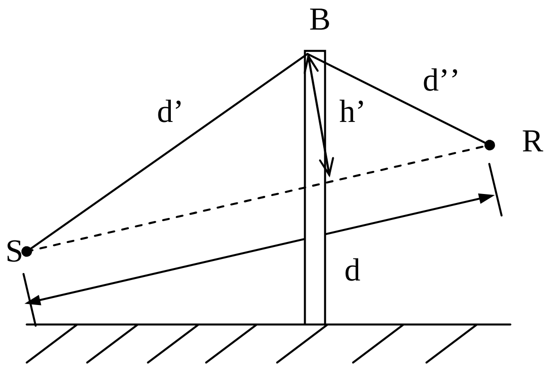
$$ACQUA \quad \begin{cases} c_w = 1460\, m/s \\ Z_w = 146\ 10^4\ Kg/ms^2 \end{cases}$$

$$\vartheta = sen^{-1} \frac{c_u}{c_w} \cong 14°$$

L'acqua è dunque uno specchio acustico pressoché perfetto, a meno di incidenza con angoli molto piccoli.

### 5.5.4 Effetto di schermi bidimensionali piani (barriere antirumore)

Uno schermo sottile di altezza assegnata e lunghezza indefinita determina una riduzione del livello sonoro percepito in punti ricevitori che si trovano all'interno della zona d'ombra creata dall'ostacolo. Tale zona d'ombra si estende al di sotto della congiungente sorgente-bordo superiore della barriera ed ha un'estensione angolare che dipende dalla frequenza del suono. La teoria della diffrazione indica che l'*attenuazione della barriera*, ovvero la riduzione teorica del livello sonoro percepito, dipende dal nunero di Fresnel, *N*, a sua volta funzione dell'altezza efficace *h'* della barriera e della lunghezza d'onda del suono (v. figura).




*h'* = altezza efficace della barriera

Numero di Fresnel

$$N = \frac{2(d'+d''-d)}{\lambda} \propto \frac{h'}{\lambda}$$

Valori numerici dell'attenuazione teorica $A_b$ sono forniti dalla formula di Kurze-Anderson:

$$A_b = 5 + 20C_1 \log\left[\frac{\sqrt{2\pi N}}{\tanh\left(C_2\sqrt{2\pi N}\right)}\right]$$

| | | |
|---|---|---|
| SORGENTE LINEARE | $C_1 = 0{,}75$ | $C_2 = 1{,}00$ |
| SORGENTE PUNTUALE | $C_1 = 1{,}00$ | $C_2 = 1{,}00$ |

L'attenuazione effettiva in opera è in realtà minore di quella prevista dalla suddetta formula, in quanto la barriera modifica il percorso dei raggi sonori "allontanandoli" dal suolo; conseguentemente la barriera determina una riduzione dell'assorbimento del suolo, che riduce l'efficacia della barriera. L'attenuazione in opera *A* (spesso indicata con il termine Inglese *Insertion Loss*) viene calcolata con l'espressione:

$$A = A_b - (A_s - A_{sb})$$

In cui il termine tra parentesi rappresenta la perdita di attenuazione del suolo dovuto alla presenza della barriera.