

Propagazione del suono in ambiente esterno

Argomenti trattati

- Introduzione sul concetto di rumore ambientale
- Propagazione di un'onda sferica in campo libero
- Riflessione di un'onda sferica sul terreno:
 - Calcolo del livello diretto e di quello riflesso attraverso sorgente virtuale
 - Interferenza in sorgenti coerenti e somma energetica in sorgenti incoerenti
- Esercizio sui concetti trattati
- Fenomeni di attenuazione in eccesso:
 - Riflessione sul terreno
 - Assorbimento dell'aria
 - Vegetazione
 - Fenomeni atmosferici
 - Schermatura
- Esercizio sul concetto di schermatura

Rumore ambientale

Per rumore ambientale s'intende l'insieme dei fenomeni che riguardano la propagazione del suono in ambienti esterni. E' importante conoscere l'argomento e le norme che vi concernono per una corretta progettazione.

I sistemi interessati a questo fenomeno sono molteplici, alcuni esempi possono essere:

- ◇ Infrastrutture di trasporto
- ◇ Fabbriche
- ◇ Cantieri edili
- ◇ Manifestazioni estemporanee

Tenere sotto controllo il rumore ambientale è fondamentale per il benessere fisico di ognuno di noi. Questo fenomeno è considerato una forma di inquinamento fisico. Molto spesso per poterlo ridurre l'unica soluzione è di allontanare le sorgenti oppure di costruire delle barriere e in entrambi i casi si affronta il problema con interventi di pianificazione. Ecco perché per un architetto è importantissimo conoscere questo fenomeno.

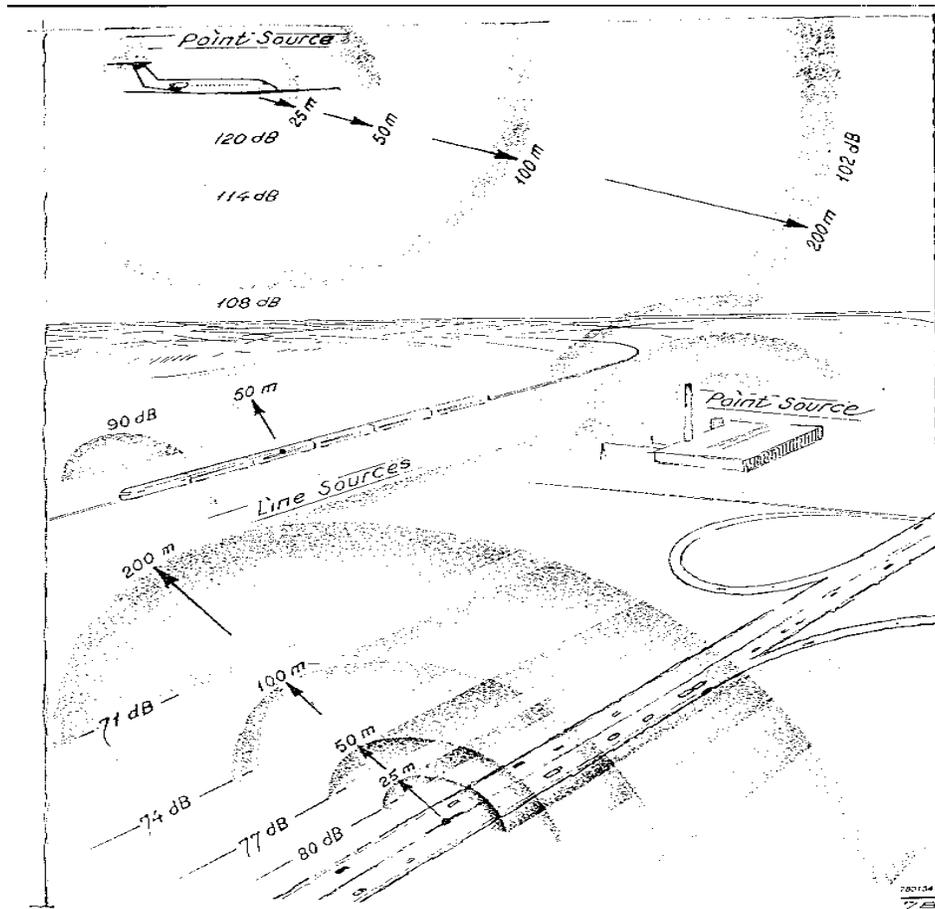


Fig.1 - Esempi di sorgenti lineari e puntiformi –

La figura 1 mostra schematicamente con alcuni esempi la dispersione del suono. Si possono distinguere in generale tre tipi di sorgenti:

- puntiformi (ad esempio una fabbrica o un aereo)
- lineari (ad esempio una strada o una ferrovia)
- piana

A seconda quindi del tipo di sorgente si hanno comportamenti diversi (in questa lezione si è analizzato solo il caso di sorgenti puntiformi, si possono, invece, trovare approfondimenti sulle sorgenti lineari nella lezione successiva a questa.)

Propagazione sferica

La propagazione sferica nasce in genere da una sorgente puntiforme ossia una sorgente piccola rispetto alla lunghezza d'onda generata e relativamente lontana dal ricevitore. Il fronte d'onda che si genera è sferico.

Il caso più semplice che si può avere è quello di una sorgente puntiforme omnidirezionale ossia una sorgente che non privilegia alcuna direzione.

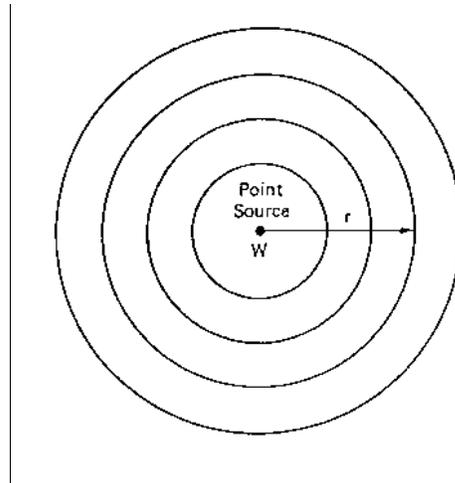


Fig.2 – Sorgente puntiforme omnidirezionale –

Si è già visto nelle precedenti lezioni la legge di propagazione che interessa questo particolare caso in cui l'onda si propaga in un campo libero ossia:

$$I = \frac{W}{4\pi r^2} \quad (1)$$

I è l'intensità, **W** la potenza e **r** il raggio.

In termini di livelli, invece, si ha:

$$L_I = L_W + 10 \log \left(\frac{1}{4\pi r^2} \right) \quad (2)$$

Si hanno, anche, casi in cui la sorgente puntiforme è direttiva ossia ha una direzione privilegiata di propagazione. In questi casi s'inserisce nella formula appena descritta un coefficiente **Q** di direttività:

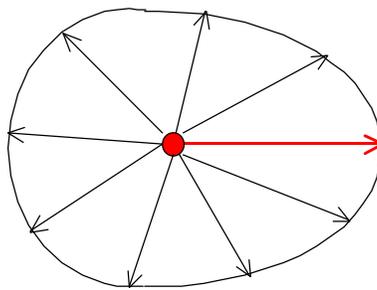


Fig.3 – Sorgente puntiforme direttiva –

$$L_I = L_W + 10 \log \left(\frac{Q}{4\pi r^2} \right) \quad (3)$$

Se la sorgente è puntiforme e la propagazione avviene in campo libero, l'energia che si propaga resta in prima approssimazione costante, la densità sonora, invece, diminuisce e si distribuisce su una superficie sempre maggiore (vedi figura 4).

Si ha un'attenuazione di 6dB per raddoppio di distanza.

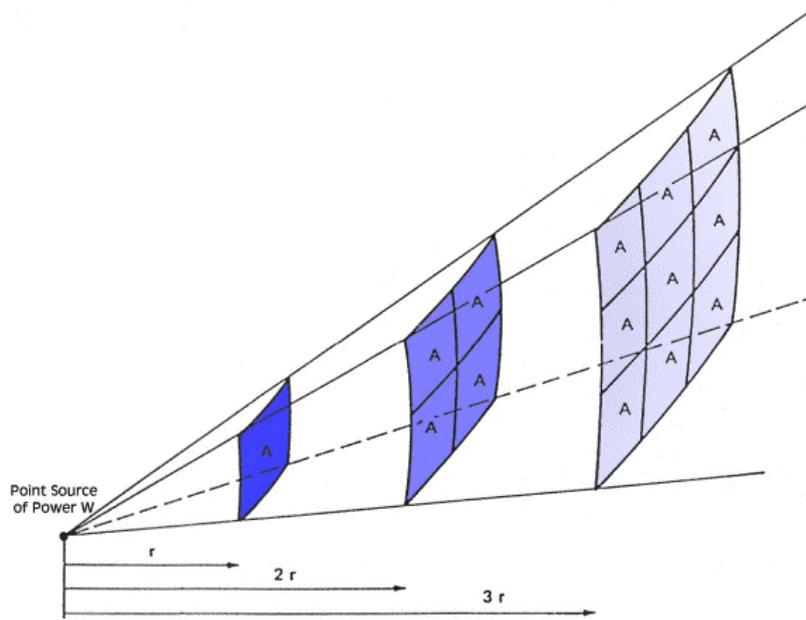


Fig.4 – Propagazione del suono da una sorgente puntiforme –

In campo libero per una sorgente puntiforme la relazione tra livello e raddoppio della distanza è lineare.

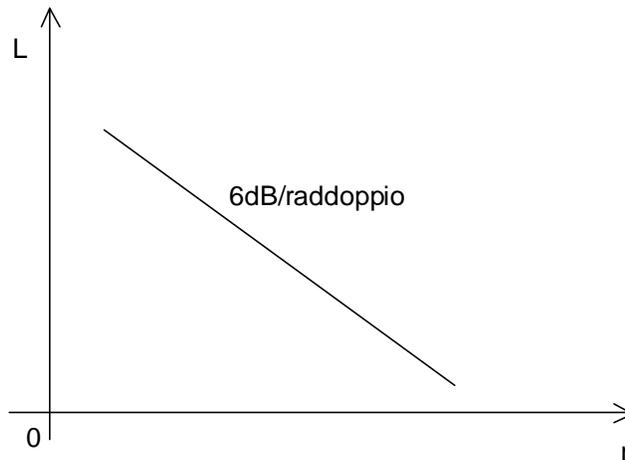


Fig.4 – Legge di decadimento del livello al raddoppio della distanza–

Nella realtà il campo di propagazione non è mai completamente libero ma si ha tutta una serie di fattori che aumentano o diminuiscono il livello del suono, primo fra tutti è il terreno.

Riflessione sul terreno

Il terreno si può considerare una superficie piana che, quando è colpita da un'onda sonora, la riflette. Abbiamo già visto come risolvere in questi casi il problema, adottando, cioè, una sorgente virtuale in posizione speculare al piano riflettente rispetto alla sorgente e sommando il contributo di quest'ultima al livello diretto.

Calcolo del livello diretto e di quello riflesso

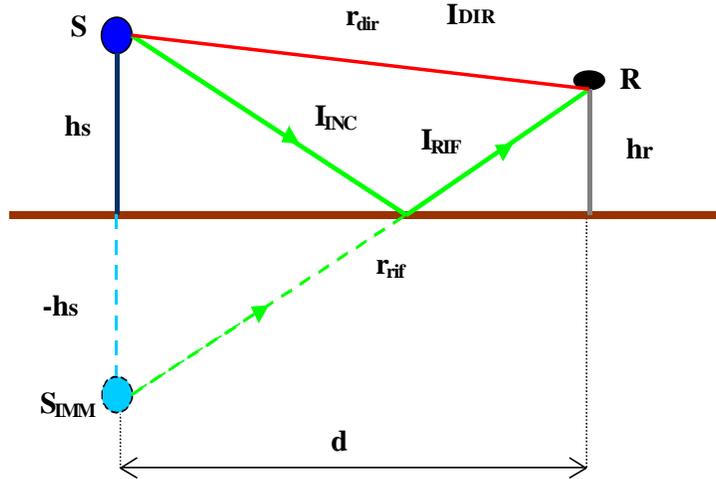


Fig.5 –Suono riflesso su un terreno-

Per calcolare quindi il livello che arriva al ricevitore, ricordando che siamo in presenza di una sorgente puntiforme, si deve sommare due livelli: diretto **L_{DIR}** e riflesso **L_{RIF}**.

$$L_{DIR} = L_W + 10 \log \frac{Q_{DIR}}{4\pi r_{DIR}^2}$$

$$L_{RIF} = L_W + 10 \log \frac{Q_{RIF} (1 - \alpha)}{4\pi r_{RIF}^2} \quad (4)$$

L_W è il livello di potenza della sorgente, **Q_{RIF}** e **Q_{DIR}** i coefficienti di direttività (se valgono entrambi 1 si ha una sorgente omnidirezionale), **α** è il coefficiente acustico del terreno (ricordiamo che **α** è sempre <1, il terreno, infatti, porta ad una perdita di energia).

In genere si esprime **r_{RIF}** e **r_{DIR}** in funzione di **d** distanza in pianta tra la sorgente e il ricevitore, di **h_s** altezza della sorgente e di **h_r** altezza del ricevitore (v.d. figura 5). Le formule qui sotto (5) sono state ricavate dal teorema di Pitagora.

$$r_{DIR} = \sqrt{d^2 + (h_S - h_R)^2}$$

$$r_{RIF} = \sqrt{d^2 + (h_S + h_R)^2} \quad (5)$$

Rimane ora il problema di come sommare i due livelli sonori **L_{DIR}** e **L_{RIF}**. Per procedere in questo calcolo va verificato, infatti, se la sorgente è coerente o incoerente.

Interferenza in sorgenti coerenti

Se si ha una sorgente che emette un suono coerente, composto da n° suoni puri (un suono puro è caratterizzato da una legge sinusoidale e da un'unica frequenza) è difficile controllare come funziona il suo spettro di riflessione e possono formarsi dei momenti d'interferenza incontrollabili.

L'interferenza può essere costruttiva o distruttiva a seconda se i due suoni puri che si vengono a sommare sono in fase o meno.

Se le due onde sono in fase si parla d'**interferenza costruttiva** e si ha un aumento di livello.

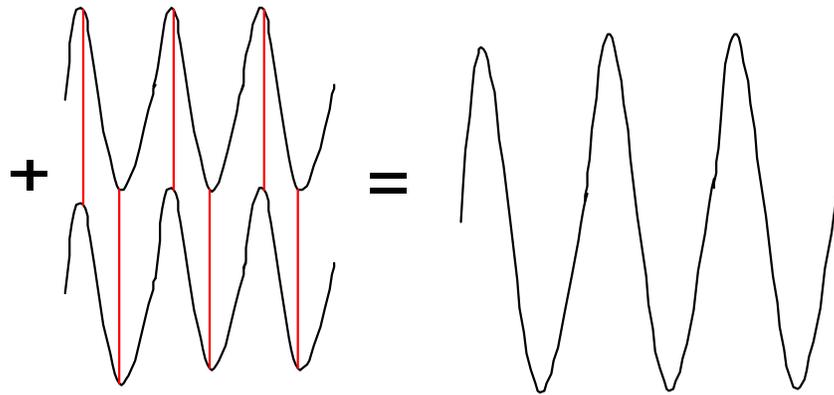


Fig.6 –Interferenza costruttiva-

Le due funzioni si sommano perfettamente:

$$P_{tot} = P_1 + P_2 \quad (6)$$

Se $P_1=P_2$ ho un aumento di 6 dB.

Se le due onde sono in controfase, invece, si parla di **interferenza distruttiva** e:

$$P_{tot} = P_1 - P_2 \quad (7)$$

Se $P_1=P_2$ avrò che $P_1-P_2=0$ l'aumento sarà quindi $-\infty$

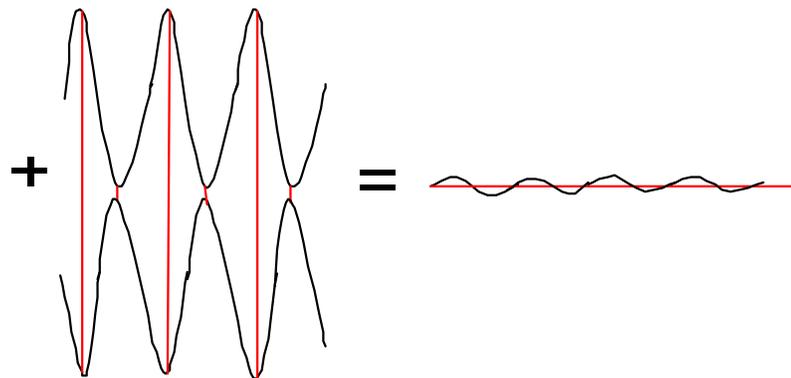


Fig.7–Interferenza distruttiva-

Tra i due casi, come si è visto, c'è una profonda differenza e vanno considerati entrambi poiché mentre negli ambienti chiusi non si ha il fenomeno dell'interferenza mentre all'aperto questo è più frequente.

Sorgenti incoerenti

Per sorgenti incoerenti il problema è molto meno complesso, infatti, non si hanno, in buona approssimazione, mai fenomeni di interferenza.

Per questo tipo di sorgenti le forme d'onda sono molto diverse e si può sommare la loro intensità algebricamente.

$$I_{tot} = I_1 + I_2 \quad (8)$$

Se $I_1=I_2$ avrò un incremento di 3 dB.

Ritorniamo ora al problema originario che ci ha portato a fare questa serie di considerazioni ossia la somma di L_{DIR} e L_{RIF} .

Poniamoci nel caso di un suono incoerente rimandando l'analisi del caso coerente a studi di carattere più specifico.

Ricordiamo la somma di due livelli:

$$L_{TOT} = 10 \log \left(10^{\frac{L_{DIR}}{10}} + 10^{\frac{L_{RIF}}{10}} \right) \quad (9)$$

Sostituiamo quindi i valori trovati dalle formule (4):

$$L_{TOT} = L_W + 10 \log \left(\frac{Q_{DIR}}{4\pi r_{DIR}^2} + \frac{Q_{RIF}(1-\alpha)}{4\pi r_{RIF}^2} \right) \quad (10)$$

Esercizio

Sia data una sorgente puntiforme incoerente ad 1m da una pavimentazione stradale ($\alpha=0.2$) e un ricevitore ad un'altezza di 10m e ad una distanza in pianta dalla sorgente di 50m.

Ipotizziamo che la sorgente sia ad esempio una macchina da cantiere di medie dimensioni che ha un L_w pari a 100 dB. Si calcoli il livello totale che arriva al ricevitore.

Dati

$h_s=1m$

$h_R=10m$

$d=50m$

$Q=1$

$\alpha=0.2$

$L_w=100dB$

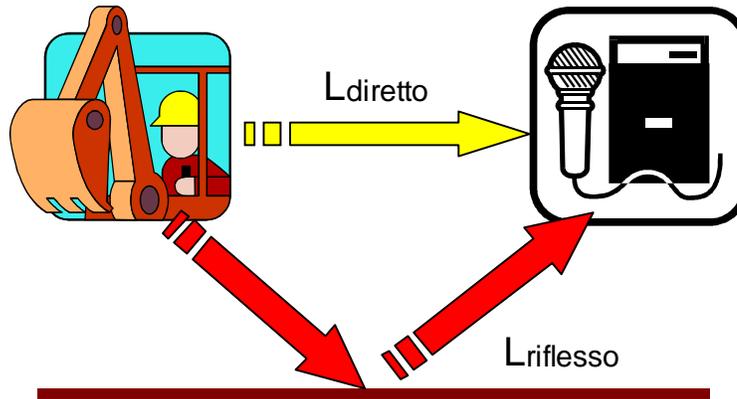


Fig.8

Da (5) ho r_{RIF} e r_{DIR}

$$r_{DIR} = \sqrt{d^2 + (h_S - h_R)^2} = \sqrt{50^2 + (10 - 1)^2} = 50.8m$$

$$r_{RIF} = \sqrt{d^2 + (h_S + h_R)^2} = \sqrt{50^2 + (10 + 1)^2} = 51.2m$$

Da (4) ho L_{DIR} e L_{RIF}

$$L_{DIR} = L_W + 10 \log \frac{Q_{DIR}}{4\pi r_{DIR}^2} = 100 + 10 \log \frac{1}{4\pi (50.8)^2} = 54.9dB$$

$$L_{RIF} = L_W + 10 \log \frac{Q_{RIF} (1 - \alpha)}{4\pi r_{RIF}^2} = 100 + 10 \log \frac{(1 - 0.2)}{4\pi (51.2)^2} = 53.8dB$$

Da (9) ho L_{TOT}

$$L_{TOT} = 10 \log \left(10^{\frac{L_{DIR}}{10}} + 10^{\frac{L_{RIF}}{10}} \right) = 10 \log (10^{5.49} + 10^{5.38}) = 57.4dB$$

Attenuazioni in eccesso

Analizzando la propagazione del suono in ambiente esterno, non si può trascurare lo studio di tutta una serie di fenomeni che possono provocare variazioni anche molto rilevanti del livello sonoro, rispetto ad una situazione base. Questi fenomeni prendono il nome d'attenuazioni in eccesso (excess attenuation) e i principali sono:

- Riflessione sul terreno
- Assorbimento dell'aria
- Vegetazione
- Fenomeni atmosferici
- Schermatura

La valutazione numerica di questi fattori è però, spesso, difficile, qui di seguito, quindi, li analizzeremo solo qualitativamente.

Per quanto riguarda la riflessione sul terreno si è già parlato

Assorbimento dell'aria

L'aria non è un gas perfetto e non si può considerare un mezzo perfettamente elastico. Per questo motivo il suono propagandosi in aria sarà soggetto a fenomeni dissipativi.

Definiamo quindi **A** indice di assorbimento, **A** si misura in dB/Km e dipende dalla frequenza **f** e dall'umidità relativa dell'aria **U.R.**

La norma ISO 9613 stabilisce i valori di **A** in funzione di **f** e **U.R.**

L'assorbimento è massimo quando l'aria è secca e il suono ha frequenze molto elevate. (vedi figura 11)

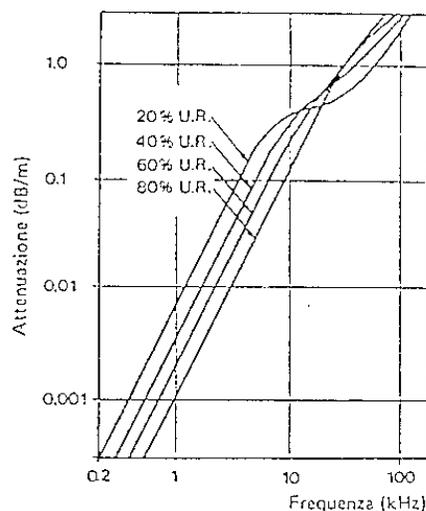


Fig.9 –Attenuazione dell'aria-

Vegetazione

La vegetazione produce attenuazioni nella propagazione del suono. Si definisce anche per questo caso un indice V che varia in rapporto alla frequenza e al tipo di vegetazione. V si esprime in dB/m e viene fornito da alcune norme (ISO 9613 o anche normative nazionali)

Fenomeni atmosferici

Per quanto riguarda i fenomeni atmosferici è molto difficile stabilire quantitativamente l'attenuazione o l'aumento di livello che vengono a creare, non vi sono tabelle a riguardo come nei precedenti due casi. Analizziamo qui di seguito solo in termini qualitativi due dei principali fenomeni che variano il livello del suono:

- Il vento
- Il gradiente di temperatura dell'aria

Il **vento** non trasporta il suono come comunemente si pensa ma curva i suoi raggi creando zone d'ombra e zone in cui il suono arriva con maggior intensità aggirando gli ostacoli fisici posti sul suo cammino. L'immagine 12 mostra come i raggi sonori curvano sottovento, se la velocità del vento varia linearmente con la quota. Questa curvatura fa sì che si creino zone d'ombra (di sotto all'ultimo raggio tangente con il suolo), cioè zone dove il livello sonoro cala bruscamente.

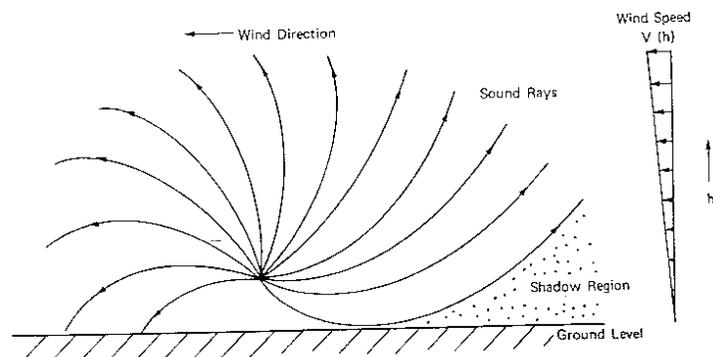


Fig.11 –Propagazione del suono in relazione al vento-

Il cambiamento di **temperatura dell'aria** influisce anch'esso sulla propagazione del suono. La temperatura normalmente cala all'aumentare dell'altezza dal suolo (caso a) ma vi sono anche momenti in cui avviene il contrario si parla, infatti, di inversione termica (caso b). Vi è poi una terza condizione (caso c) in presenza di nebbia in cui il terreno è caldo mentre la nebbia ha una temperatura minore.

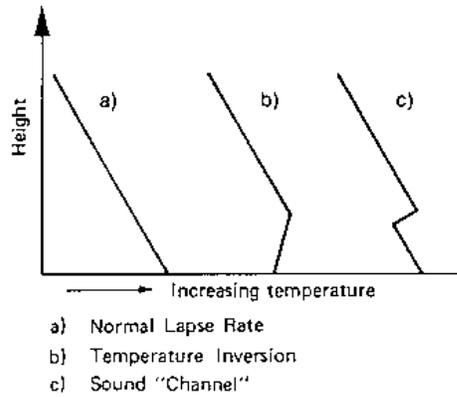


Fig.11 –Grafico della temperatura in funzione dell’altimetria-

Nella figura 12 è rappresentato per i casi a e b il comportamento dei raggi sonori.

Caso a): In condizioni normali la temperatura cala con l’aumento dell’altezza, poiché il raggio sonoro curva verso il freddo, in questo caso esso è incurvato verso l’alto. Esiste, poi, un raggio limite che va a toccare il terreno, per cui al di sotto di esso si crea una zona d’ombra, cioè una zona in cui il suono non arriva.

Caso b): Se si verificano situazioni d’inversione termica, invece, i raggi sonori si incurvano verso il basso, non si creano più zone d’ombra e il rumore può oltrepassare eventuali ostacoli.

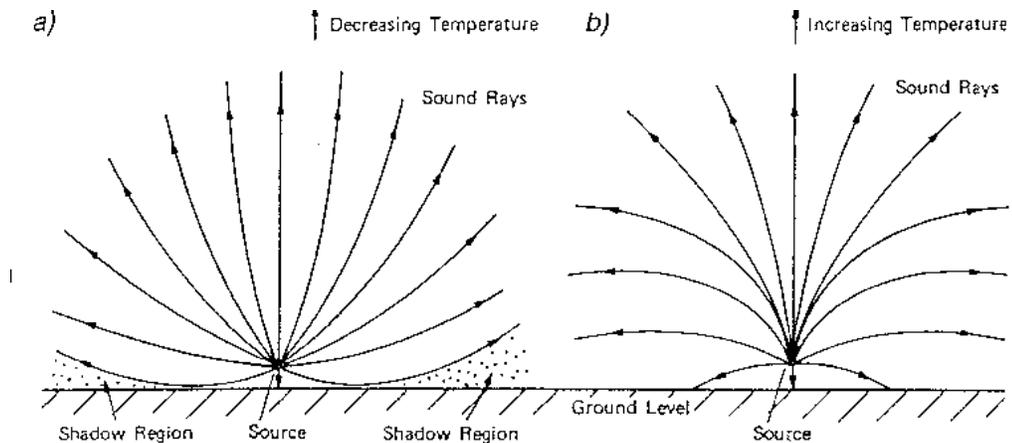


Fig.12 –Propagazione del suono in funzione della temperatura-

Caso c): In presenza di nebbia il terreno è caldo mentre la nebbia è fredda, la temperatura scende e i raggi sonori sono portati ad elevate altezze dal suolo. Appena si supera la coltre, il sole riscalda l’aria e la temperatura aumenta. Il suono

intrappolato ricade, quindi sul terreno. Con questo meccanismo il suono può essere trasportato per parecchi chilometri, prima di ricadere sul terreno, con un'attenuazione molto bassa.

Schermatura

Quando le onde sonore incontrano un ostacolo, aggirano i bordi dell'ostacolo stesso dando luogo a fenomeni di **diffrazione**. In altre parole, le direzioni di propagazione delle onde sonore sono deformate dagli ostacoli che esse incontrano.

Supponiamo di avere una sorgente e un ricevitore a distanza r , di porre poi in mezzo tra S e R uno schermo infinito in due dimensioni ma finito nella terza (v.d. figura 13)

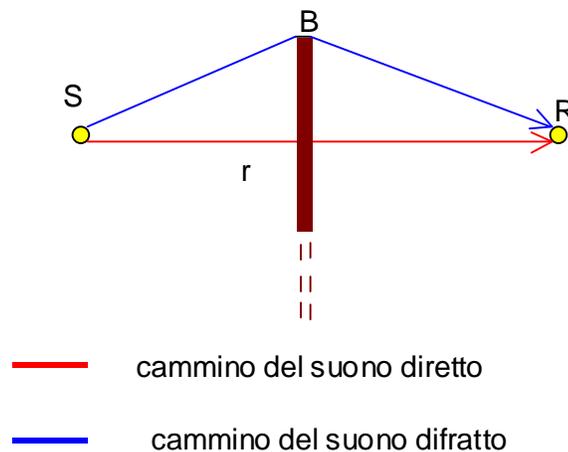


Fig.13

Se lo schermo non ci fosse il suono percorrerebbe il raggio rosso e:

$$L_{DIR} = L_w + 10 \log \frac{Q_{DIR}}{4\pi r_{DIR}^2} \quad (11)$$

Nel caso in cui ho lo schermo, il suono percorre il percorso blu e subisce una perdita d'energia, si avrà, quindi, un'attenuazione del livello. In questo caso non ho più un livello diretto ma un livello diffratto L_{DIFF} :

$$L_{DIFF} = L_{DIR} - \Delta L_{BAR} \quad (12)$$

Per poter calcolare ΔL_{BAR} , ossia l'attenuazione della barriera, è necessario conoscere il **numero di Fresnel N**.

$$N = \frac{2\delta}{\lambda} = \frac{2\delta f}{c} \quad (13)$$

dove λ è la lunghezza d'onda, c la velocità del suono che in aria vale 340 m/s, f è la frequenza e δ è il percorso dell'onda difratta meno quello dell'onda diretta. Riferendosi al disegno 13:

$$\delta = \overline{SB} + \overline{BR} - \overline{SR} \quad (14)$$

Più la barriera è alta, più cresce δ e di conseguenza N , e tanto più aumenta l'attenuazione. Anche all'aumentare di f cresce l'attenuazione.

Tra attenuazione e numero di Fresnel, quindi, esiste una legge lineare, essa è descritta diagramma di Maekawa e dalle relative formule:

-se la sorgente è puntiforme $\Delta L_{BAR} = 10 \log [3 + 20N]$ (15)

-se la sorgente è lineare $\Delta L_{BAR} = 10 \log [2 + 5.5N]$ (16)

Nella figura 14 è riportato il diagramma di Maekawa: la linea rossa è per le sorgenti lineari, quella blu e quella verde per le sorgenti puntiformi (queste ultime sono il risultato di due diversi studi: quello di Maekawa e quello di Kirchoff).

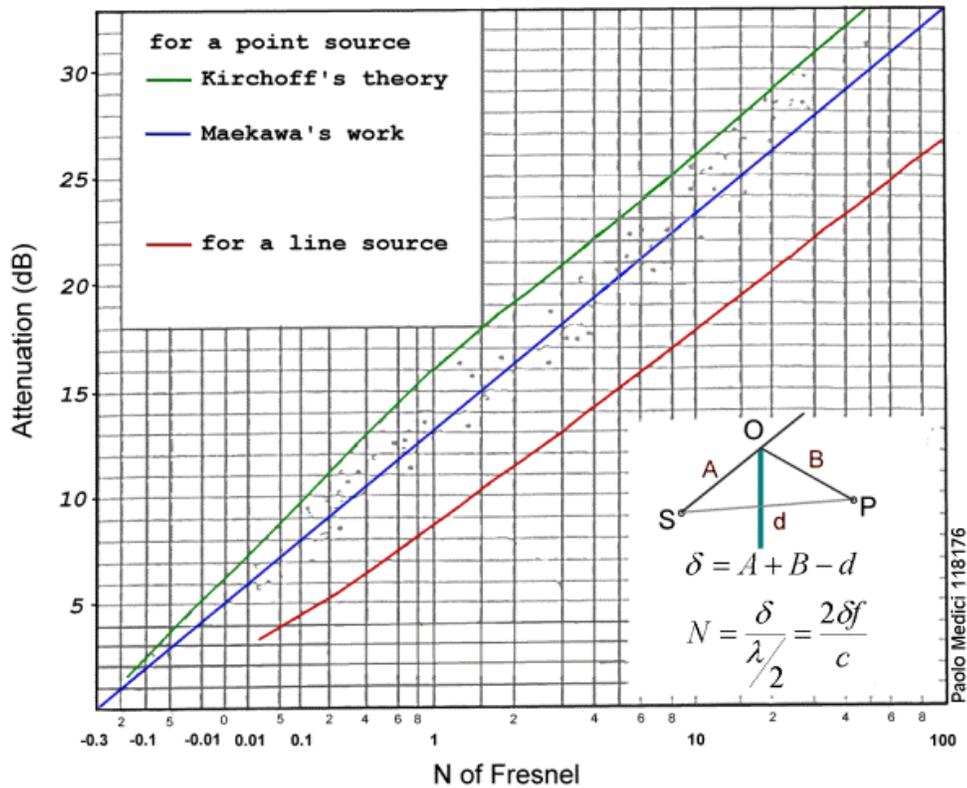


Fig.14 –Diagramma di Maekawa-

Esercizio sulle schermature

Riprendiamo gli stessi dati dell'esercizio precedente e questa volta tra sorgente e ricevitore poniamo una barriera.

Dati

$h_S=1\text{m}$	$h_R=10\text{m}$	$d=50\text{m}$	$h_B=3\text{m}$	$d_B=10\text{m}$
$Q=1$	$\alpha=0.2$	$L_W=100\text{dB}$		$f=500\text{Hz}$

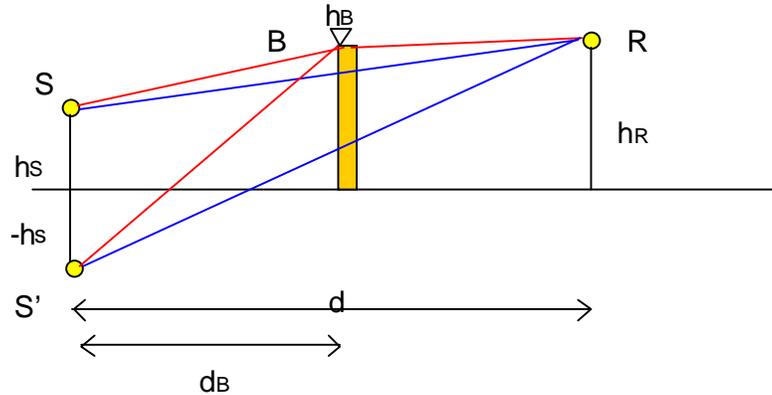


Fig.15

Il caso senza barriera (rappresentato dalle linee blu nella figura 15) l'abbiamo studiato nell'esercizio precedente, abbiamo trovato che:

$$L_{DIR}=54.9\text{dB} \qquad L_{RIF}=53.8\text{dB} \qquad L_{TOT}=57.4\text{dB}$$

Se consideriamo anche la barriera sia il suono diretto che quello riflesso subiranno una deviazione nel loro percorso rappresentata nella figura dalle linee rosse. E' chiaro che, nel secondo caso, il suono percorrerà un cammino più lungo per arrivare al ricevitore e per questo il livello totale sarà più basso di quello trovato nel primo caso.

Come prima cosa per risolvere il problema si dovrà calcolare l'attenuazione della barriera, utilizzando la formula (15) o anche consultando il diagramma di Maekawa.

$$\Delta L_{BAR} = 10 \log [3 + 20N]$$

Ricavo N:

$$N = \frac{2\delta}{\lambda} = \frac{2\delta f}{c}$$

$$f=500 \text{ Hz} \qquad c=340\text{m/s} \qquad \delta = \overline{SB} + \overline{BR} - \overline{SR} \qquad SR = r_{dir} = 50.8\text{m}$$

$$\begin{aligned}\overline{SB} &= \sqrt{d_B^2 + (h_B - h_S)^2} = \sqrt{3^2 + 2^2} = 3.6m \\ \overline{BR} &= \sqrt{(d - d_B)^2 + (h_R - h_B)^2} = \sqrt{47^2 + 7^2} = 47.5m \\ \delta_{DIR} &= 3.6 + 47.5 - 50.8 = 0.3m \\ N_{DIR} &= \frac{2 \cdot 500 \cdot 0.3}{340} = 0.93 \\ \Delta L_{DIR} &= 10 \log(3 + 20 \cdot 0.93) = 13.3dB \\ L_{DIR(barr)} &= L_{DIR} - \Delta L_{DIR} = 54.9 - 13.3 = 41.6dB\end{aligned}$$

Riapplichiamo le stesse formule per la sorgente immaginaria per trovare il livello riflesso attenuato dalla barriera:

$$\begin{aligned}\overline{S'B} &= \sqrt{d_B^2 + (h_B + h_S)^2} = \sqrt{3^2 + 4^2} = 5m \\ \overline{BR} &= 47.5m \\ \delta_{RIF} &= 5 + 47.5 - 51.2 = 1.31m \\ N_{RIF} &= \frac{2 \cdot 500 \cdot 1.31}{340} = 3.85 \\ \Delta L_{RIF} &= 10 \log(3 + 20 \cdot 3.85) = 19dB \\ L_{RIF(barr)} &= L_{RIF} - \Delta L_{RIF} = 53.8 - 19 = 34.8dB\end{aligned}$$

Sommo quindi i due livelli trovati:

$$L_{TOT(barr)} = 10 \log \left(10^{\frac{L_{DIR}}{10}} + 10^{\frac{L_{RIF}}{10}} \right) = 10 \log(10^{4.16} + 10^{3.48}) = 42.4dB$$

Rispetto al risultato ottenuto nell'esercizio senza barriera L_{TOT} è minore di 15dB.