

La propagazione del suono all'aperto

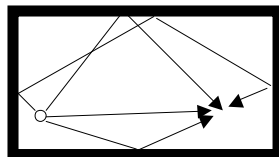
Simone Secchi

Dipartimento di Tecnologie dell'Architettura e Design "Pierluigi Spadolini"
Università di Firenze

La propagazione sonora

Problematiche e metodi di calcolo differenti per:

- Ambiente interni: campo sonoro diffuso \Rightarrow importanza delle riflessioni sonore multiple



- Ambiente esterni: campo libero \Rightarrow importanza degli effetti di attenuazione



Propagazione sonora in ambiente esterno

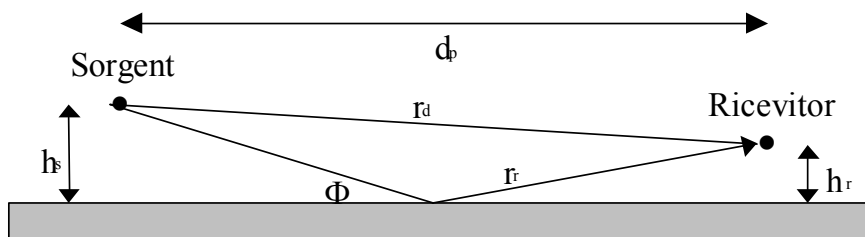
$$L_p = L_W + D - A_{div} - A_{atm} - A_{ground} - A_{screen} - A_{misc}$$

- L_p = livello di pressione sonora nel punto del ricevitore (dB);
 L_W = livello di potenza della sorgente sonora (dB);
 D = termine correttivo per direttività della sorgente ($D = 0$ per sorgenti omnidirezionali) (dB);
 A_{div} = attenuazione per divergenza geometrica delle onde (dB);
 A_{atm} = attenuazione per assorbimento dell'aria (dB);
 A_{ground} = attenuazione per "effetto suolo" (dB);
 A_{screen} = attenuazione per presenza di barriere (dB);
 A_{misc} = attenuazione per altri effetti (presenza di edifici o di vegetazione, gradiente termici, vento, ecc.) (dB).

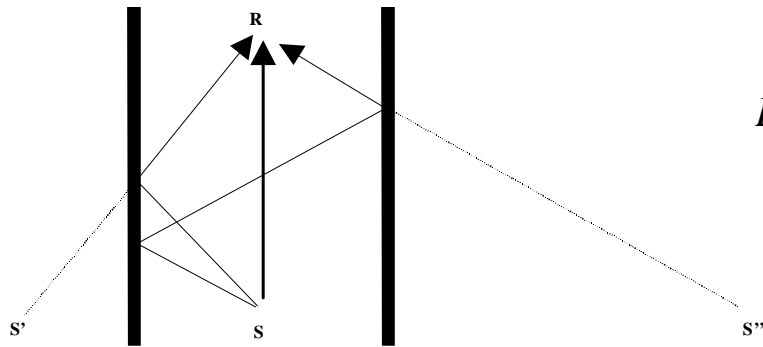
Attenuazione per divergenza geometrica

$$A_{div} = 20 \lg(r) + 11 \quad (\text{dB})$$

Riduzione di 6 dB ad ogni raddoppio della distanza dalla sorgente



Metodo delle sorgenti immagine



$$L_p = 10 \lg \left(10^{\frac{L_{pd}}{10}} + \sum_{i=1}^n 10^{\frac{L_{pri}}{10}} \right)$$

L_{pd} = livello di pressione dovuto alla propagazione diretta da sorgente a ricevitore;

L_{pri} = livello di pressione dovuto alle onde riflesse dalla i esima superficie riflettente (coefficiente di assorb. α)

$$L_{pd} = L_w - 20 \lg(r_d) - 11 \text{ (dB)}$$

$$L_{pri} = L_w - 20 \lg(r_i) + 10 \lg(1 - \alpha) - 11 \text{ (dB)}$$

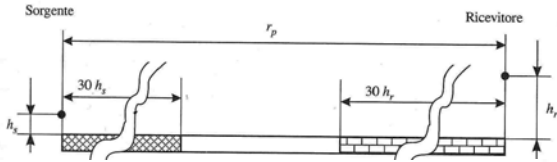
Attenuazione dell'aria

$$Att = \alpha \cdot r$$

Attenuazione in dB/km

T_c (°C)	U.R. (%)	Frequenza centrale di banda di ottava (Hz)							
		63	125	250	500	1000	2000	4000	8000
10	70	0,12	0,41	1,04	1,93	3,66	9,66	32,8	117
20	70	0,09	0,34	1,13	2,80	4,98	9,02	22,9	76,6
30	70	0,07	0,26	0,96	3,14	7,41	12,7	23,1	59,3
15	20	0,27	0,65	1,22	2,70	8,17	28,2	88,8	202
15	50	0,14	0,48	1,22	2,24	4,16	10,8	36,2	129
15	80	0,09	0,34	1,07	2,40	4,15	8,31	23,7	82,8

Attenuazione per effetto suolo



Frequenze centrali delle bande di ottava [Hz]	A_s o A_r [dB]	A_m [dB]
63	-1,5	-3q
125	-1,5 + $G a'(h)$	
250	-1,5 + $G b'(h)$	
500	-1,5 + $G c'(h)$	
1000	-1,5 + $G d'(h)$	
2000	-1,5 (1 - G)	
4000	-1,5 (1 - G)	
8000	-1,5 (1 - G)	-3q (1 - G)

Per calcolare A_s porre $G = G_s$ e $h = h_s$

Per calcolare A_r porre $G = G_r$ e $h = h_r$

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

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

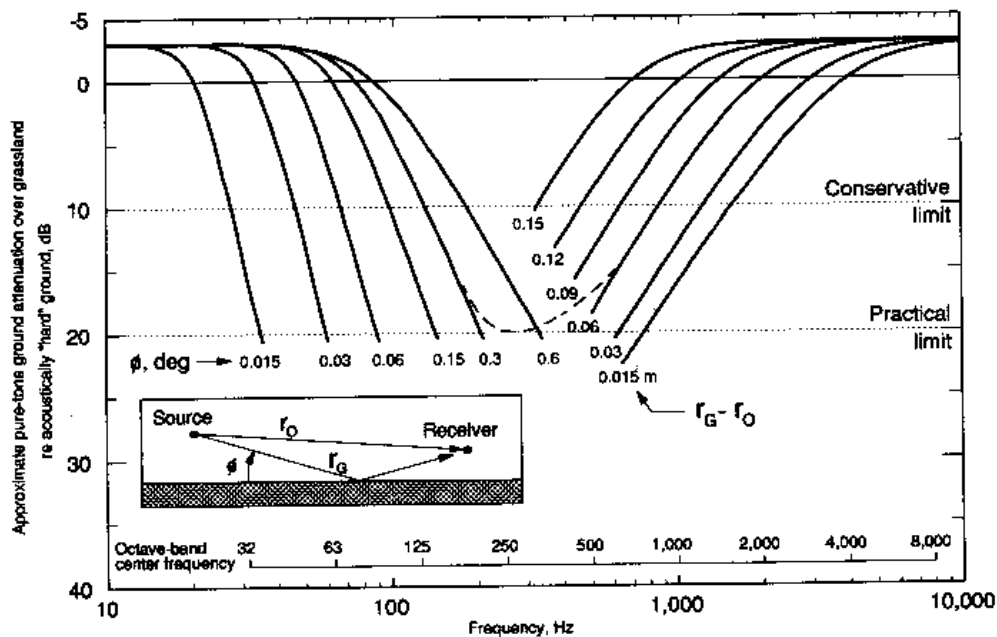
$$c'(h) = 1,5 + 14e^{-0,46h^2} (1 - e^{-r_p/50})$$

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

$$q = 0 \quad \text{quando } r_p \leq 30 (h_r + h_s)$$

$$q = 1 - \frac{30(h_r + h_s)}{r_p} \quad \text{quando } r_p > 30 (h_r + h_s)$$

Attenuazione per effetto suolo



Attenuazione di barriere acustiche

$$A_{screen} = \begin{cases} 20 \lg \frac{\sqrt{2\pi N}}{\tanh \sqrt{2\pi N}} + 5 & (\text{per } N \geq -0,2) \\ 0 & (\text{altrimenti}) \end{cases} \quad (\text{dB})$$

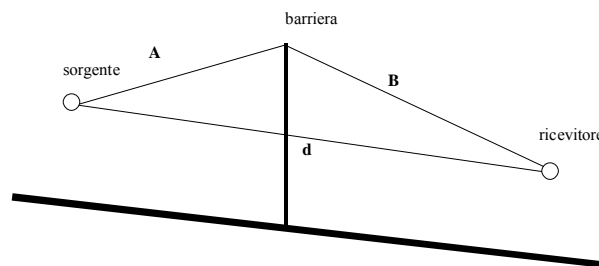
$$N = \pm \frac{2}{\lambda} (A + B - d)$$

λ = lunghezza d'onda del suono ($=c/f$) (m);

$A+B$ = più breve percorso sonoro sopra la barriera, dalla sorgente al ricevitore (m);

d = distanza in linea retta tra sorgente e ricevitore (m);

il segno più si applica quando il ricevitore si trova nella zona in ombra della barriera
il segno meno quando si trova nell'altra zona.



I descrittori del suono

Livello continuo equivalente di pressione sonora ponderata "A"

Valore del livello di pressione sonora ponderata "A" di un suono costante che, nel corso di un periodo specificato T , ha la medesima pressione quadratica media di un suono considerato, il cui livello varia in funzione del tempo

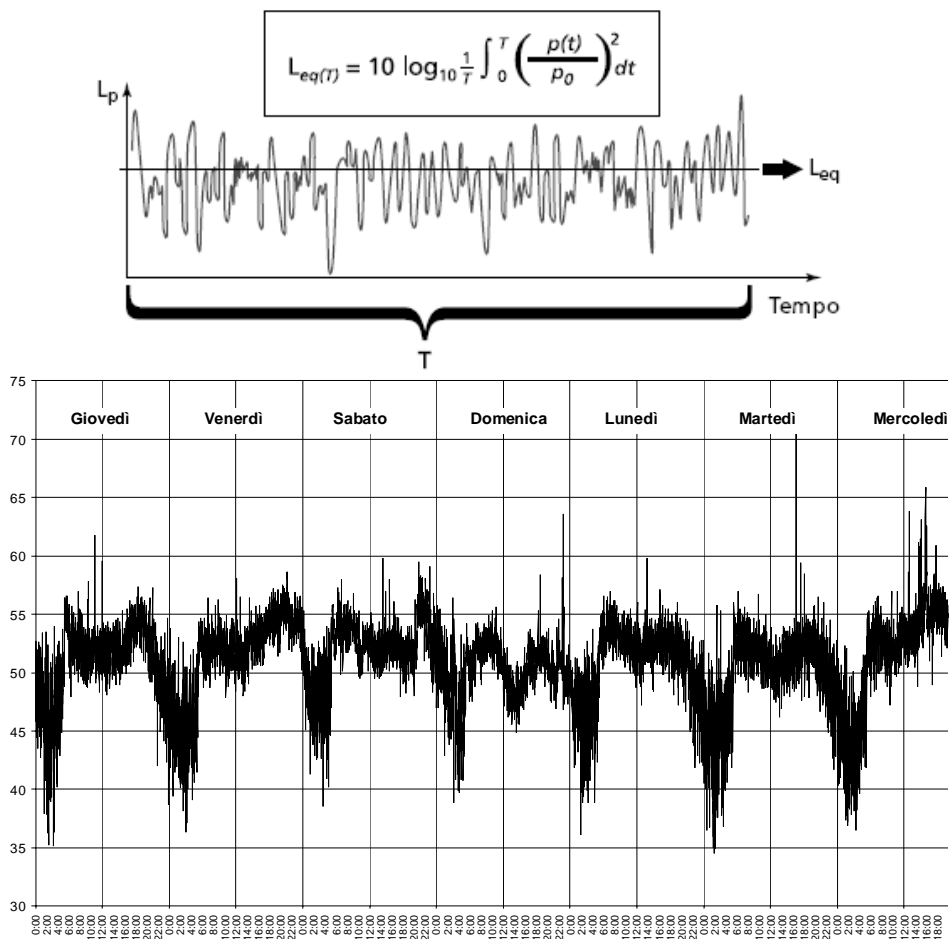
$$L_{Aeq,T} = 10 \lg \frac{1}{t_2 - t_1} \int_0^T \frac{p_A^2(t)}{p_0^2} dt \quad \text{dB(A)}$$

dove:

L_{Aeq} è il livello continuo equivalente di pressione sonora ponderata "A" considerato in un intervallo di tempo che inizia all'istante t_1 e termina all'istante t_2 ;

$p_A(t)$ è il valore istantaneo della pressione sonora ponderata "A" del segnale acustico in Pascal (Pa);

$p_0 = 20 \mu\text{Pa}$ è la pressione sonora di riferimento.



Livelli massimi e minimi

L_{AFMax} , L_{ASMax} o L_{AIMax} : livello sonoro massimo ponderato A misurato con ponderazione temporale Fast (F), Slow (S) o Impulse (I).

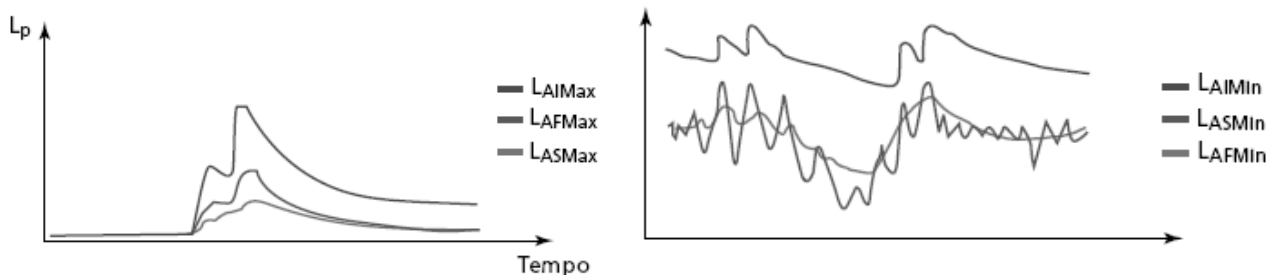
Sono i livelli sonori più alti che vengono rilevati durante il periodo di misura.

Spesso sono usati insieme con altri parametri (come L_{Aeq}) per assicurare che un singolo evento non superi un limite.

La ponderazione temporale (F, S o I) deve essere specificata.

L_{AFMin} , L_{ASMin} o L_{AIMin} : livello sonoro minimo ponderato A misurato con ponderazione temporale Fast (F), Slow (S) o Impulse (I).

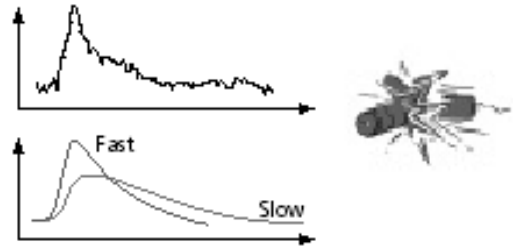
Sono i livelli sonori più bassi rilevati durante il periodo di misura.



Correzioni alle misure di pressione sonora (Decreto 16/3/98)

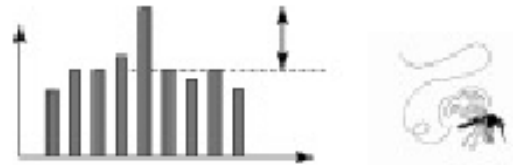
Componenti impulsive

Evento ripetitivo;
Differenza tra L_{AImax} e L_{ASmax} superiore a 6 dB;
Durata dell'evento a -10 dB dal valore L_{AFmax} inferiore a 1 s.



Componenti tonali

Livello minimo di una banda supera i livelli minimi delle bande adiacenti di almeno 5 dB.



Componenti in bassa frequenza

Presenza di componenti tonali nell'intervallo di frequenze compreso fra 20 Hz e 200 Hz, esclusivamente nel tempo di riferimento notturno.



Livello sonoro di un singolo evento L_{AE} (SEL)

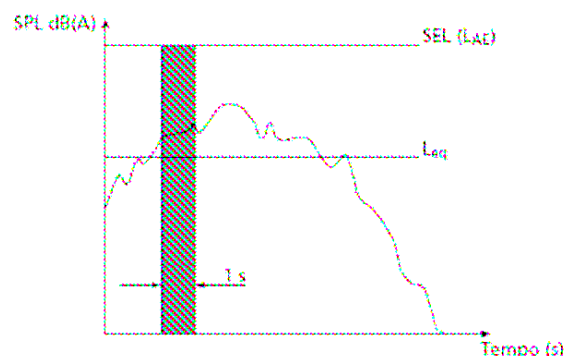
è dato dalla formula

$$SEL = L_{AE} = 10 \log \left[\frac{1}{t_0} \int_{t_1}^{t_2} \frac{p_A^2(t)}{p_0^2} dt \right] \quad dB(A)$$

Dove:

$t_2 - t_1$ è un intervallo di tempo sufficientemente lungo da comprendere l'evento;

t_0 è la durata di riferimento (1s)

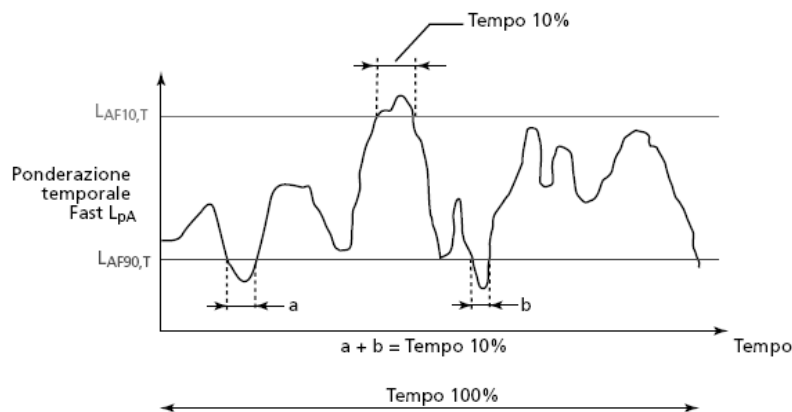


Livelli statistici

Livello percentile $L_{AFN,T}$: livello sonoro ponderato A superato per N% del periodo di misura.

In alcuni paesi il parametro $L_{AF90,T}$ (livello sonoro superato per il 90% del tempo di misura) o il livello $L_{AF95,T}$ sono usati come misura del rumore di fondo.

Notare che la ponderazione temporale (di norma Fast) deve essere specificata.



Il livello del rumore aeroportuale

è definito dalla seguente espressione:

$$L_{VA} = 10 \log \left[\frac{1}{N} \sum_{j=1}^N 10^{L_{VAj}/10} \right] dB(A)$$

in cui:

L_{VA} rappresenta il livello di valutazione del rumore aeroportuale;

N è il numero dei giorni del periodo di osservazione del fenomeno

L_{VAj} è il valore giornaliero del livello di valutazione del rumore aeroportuale.

Numero di giorni N del periodo di osservazione deve essere ventuno, pari a tre settimane, ciascuna delle quali scelta nell'ambito dei seguenti periodi:

1° ottobre - 31 gennaio;

1° febbraio - 31 maggio;

1° giugno - 30 settembre.

La settimana di osservazione deve essere quella a maggior numero di movimenti

Il valore giornaliero del livello di valutazione del rumore aeroportuale (LVAj) si determina mediante la relazione sotto indicata, considerando tutte le operazioni a terra e di sorvolo che si manifestano nell'arco della giornata compreso tra le ore 00:00 e le 24:00:

$$L_{VAj} = 10 \log \left[\frac{17}{24} 10^{L_{Vsd}/10} + \frac{7}{24} 10^{L_{Vsn}/10} \right] dB(A)$$

Livello di valutazione del rumore aeroportuale nel periodo diurno

$$L_{Vsd} = 10 \log \left[\frac{1}{T_d} \sum_{i=1}^{N_d} 10^{SEL_i/10} \right] dB(A)$$

in cui $T_d = 61.200$ s è la durata del periodo diurno

N_d è il numero totale dei movimenti degli aeromobili in detto periodo

SEL_i è il livello dell'i-esimo evento sonoro associato al singolo movimento.

Livello di valutazione del rumore aeroportuale nel periodo notturno

$$L_{Vsn} = \left[10 \log \left(\frac{1}{T_n} \sum_{k=1}^{N_k} 10^{SEL_k/10} \right) + 10 \right] dB(A)$$

in cui $T_n = 25.200$ s è la durata del periodo notturno

$$SEL_i = 10 \log \left[\frac{1}{T_0} \int_{t_1}^{t_2} \frac{p_{A,i}^2(t)}{p_0^2} dt \right] = \left(L_{>eq,T_i} + 10 \log \frac{T_i}{T_0} \right) dB(A)$$

$T_0 = 1$ s è il tempo di riferimento

t_1 e t_2 rappresentano gli istanti iniziale e finale della misura, ovvero la durata dell'evento $T_i = (t_2 - t_1)$ in cui il livello L_A risulta superiore alla soglia $L_{AFmax} - 10dB(A)$;

$p_{A,i}(t)$ è il valore istantaneo della pressione sonora dell'evento i-esimo ponderata A;

$P_0 = 20$ μ Pa rappresenta la pressione sonora di riferimento;

L_{Aeq,T_i} è il livello continuo equivalente di pressione sonora ponderata A dell'i-esimo evento sonoro.

L_{AFmax} è il livello massimo della pressione sonora in curva di ponderazione «A», con la costante di tempo «Fast», collegato all'evento.