

I rumori, anche quelli stazionari, presentano sempre delle fluttuazioni; per tale motivo, al fine di meglio valutare l'esposizione al rischio, è stato ricavato il cosiddetto *Livello Equivalente Continuo* (Leq) che rappresenta il livello di un ipotetico rumore costante, della stessa durata ed energeticamente equivalente al rumore variabile misurato: è in pratica la media del fenomeno complessivo.

Poiché l'orecchio umano non presenta la stessa sensibilità alle diverse frequenze, occorre correggere le misure mediante delle curve di ponderazione che tengono conto della minore sensibilità alle alte, e soprattutto alle basse frequenze. La curva utilizzata per le misure di rumorosità ambientale è la curva A: per tale motivo, a meno che non venga richiesta una misura lineare, i risultati verranno sempre indicati come dBA, come dB(A) o semplicemente dB.

Per poter quantificare la percentuale di rischio di danno acustico cui è sottoposto un lavoratore esposto al rumore, occorre conoscere le varie esposizioni nell'arco della giornata lavorativa al fine di calcolare il livello di esposizione quotidiano al rumore (LEP). Esso si esprime con la formula:

$$LEP,d = LA_{eq,Te} + 10 \log \frac{Te}{To}$$

$$\text{Dove: } LA_{eq,Te} = 10 \log \left\{ \frac{1}{Te} \int_0^{Te} \left[\frac{p_A^{(t)}}{p_0} \right]^2 dt \right\}$$

Te = durata quotidiana dell'esposizione personale di un lavoratore al rumore, ivi compresa la quota giornaliera di lavoro straordinario;

$$To = 8 \text{ h} = 28.800 \text{ s};$$

$$p_0 = 20 \text{ } \mu\text{Pa}$$

p_A = pressione acustica istantanea ponderata A

Il LeqA può essere ottenuto sommando i contributi degli Lp per ogni banda di frequenza (ISO 9613-2)

$$LeqA = 10 \log \left\{ \sum_{i=1}^n \left[\sum_{j=1}^8 10^{0,1[L_{pf}(ij) + A_f(j)]} \right] \right\} \quad [\text{dBA}]$$

n = numero delle sorgenti

j = indica le 8 frequenze medie standard: da 8 Hz a 63 KHz

A_f = correzione curva di ponderazione A

Qualora l'attività lavorativa e la conseguente esposizione al rumore, varino molto nel corso della settimana, è possibile calcolare il livello settimanale di esposizione al rumore.

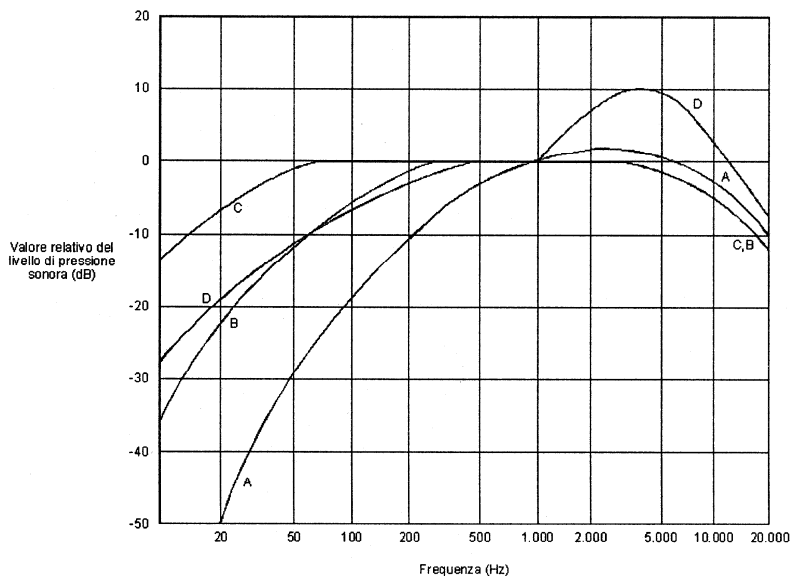
L'esposizione settimanale professionale di un lavoratore al rumore (LEP,w) è la media settimanale dei valori quotidiani LEP,d, valutata sui giorni lavorativi della settimana. Essa è calcolata mediante la formula:

$$LEP,w = 10 \log \left[\frac{1}{5} \sum_{k=1}^m 10^{0,1 (LEP,d)k} \right]$$

Dove (LEP,d)_k rappresentano i valori di LEP,d per ognuno degli m giorni di lavoro della settimana considerata.

La misura del rumore ambientale viene effettuata con uno strumento chiamato misuratore del livello sonoro, ma universalmente conosciuto come fonometro. I fonometri di uso comune vengono chiamati integratori quando possiedono la capacità di calcolare il Leq. Questi strumenti sono dotati di appositi circuiti che permettano di effettuare le misure secondo le curve di ponderazione che rispecchino il più possibile la sensibilità dell'orecchio umano e cioè la curva A.

Curve di ponderazione normalizzate



La sorgente sonora

Dal punto di vista acustico la sorgente sonora viene descritta in termini di livello di potenza e di direttività.

Il livello di potenza sonora L_w misura tutta la potenza acustica irradiata dalla sorgente in tutto il campo di frequenze udibili o nella banda di frequenze di interesse.

La direttività Q è un parametro funzione della frequenza e della direzione secondo la quale viene emessa la potenza sonora. Essa, infatti, indica come la potenza viene irradiata nelle diverse direzioni che si dipartono da centro della sorgente sonora.

Questi parametri sono particolarmente importanti, perché permettono di caratterizzare la sorgente al fine di calcolare il livello di pressione sonora da questa prodotta in ogni punto dello spazio circostante, vale a dire di definire il campo sonoro.

La potenza acustica irradiata da una sorgente può essere determinata valutando il flusso energetico che nell'unità di tempo attraversa un generica superficie (generalmente una sfera) S , che racchiude la sorgente stessa. Se si suddivide la superficie S in n elementi S_i , si può calcolare il livello di potenza della sorgente in decibel:

$$L_w = 10 \log \sum_{i=1}^n S_i * 10^{L_{p_i}/10} + C$$

Dove L_{pi} è il livello di pressione sonora in corrispondenza dell' i -esimo elemento di superficie e $C = -10 \log(\rho_0 c/400) = -10 \log K$ è il termine correttivo che dipende dalla temperatura e dalla pressione dell'aria (è trascurabile in condizione normali).

La direttività di una sorgente, Q , che come risulta dalla definizione è un parametro adimensionale, può essere misurata direttamente facendo funzionare la sorgente in campo libero da ostacoli o da superfici riflettenti. Infatti la direttività Q della sorgente sonora di potenza W è così definita:

$$Q = \frac{p_{eff}^2}{p_{effs}^2} = 10^{\frac{L_p - L_{ps}}{10}}$$

dove

p_{eff} = pressione sonora efficace misurata in un punto individuato dalle coordinate sferiche r , θ e φ

p_{effs} = pressione sonora efficace misurata nello stesso punto di prima se la sorgente fosse non direttiva

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

$$DI = 10 \log Q = L_p - L_{ps}$$

Posizione della sorgente	Direttività Q	Indice di direttività DI
Spazio libero (al centro di un grande ambiente)	1	0
Al centro di una grande superficie piana riflettente	2	3
All'intersezione di due grandi superfici piane riflettenti	4	6
All'intersezione di tre grandi superfici piane riflettenti	8	9

La propagazione del suono all'aperto

Durante la propagazione nell'atmosfera all'aperto, il suono si attenua per effetto di diversi fenomeni.

L'attenuazione causata esclusivamente dalla propagazione delle onde sferiche è un fenomeno conosciuto col nome di divergenza delle onde, ed è particolarmente evidente per sorgenti sonore omnidirezionali.

Durante la propagazione delle onde sonore, all'attenuazione causata dal fenomeno della divergenza vanno aggiunte altre attenuazioni dovute principalmente all'assorbimento dell'aria e del suolo, all'effetto delle barriere e alla riflessione da parte degli ostacoli.

Il campo acustico all'esterno può essere valutato e descritto se si dispone di una relazione in grado di determinare in ogni punto dello spazio il livello di pressione L_p prodotto da una sorgente di caratteristiche note.

Nel caso di propagazione del suono in campo libero in un mezzo di trasmissione ideale, senza assorbimento, si può determinare L_p , prodotto dalla sorgente (di tipo sferico) nel punto individuato dalle coordinate sferiche r , θ e φ :

$$L_p = L_w + DI - 20 \log r - 11 \quad [\text{dB}]$$

per una sorgente di forma cilindrica (es. un treno o una successione di automezzi che percorrono una traiettoria rettilinea) si ha:

$$L_p = L_w + DI - 10 \log r - 11$$

dove L_w [dB] è il livello di potenza della sorgente, DI [dB] è il suo indice di direttività nella direzione individuata dagli angoli θ , φ e r [m] è la distanza del punto considerato dalla sorgente stessa. Va notato che $20 \log(r)+11$ e $10 \log(r)+11$ rappresentano l'attenuazione dovuta alla divergenza geometrica delle onde che provocano una attenuazione di 6 dB ad ogni raddoppio della distanza per le sorgenti sferiche, una diminuzione di 3 dB per quelle lineari.

Si può allora ricavare un'espressione generale per la propagazione del suono all'esterno, concentrando in un termine A_{a} tutte le attenuazioni aggiuntive causate dalle più complesse condizioni ambientali:

$$L_p = L_w + DI - [10]20 \log r - 11 - A_{ra} \quad [\text{dB}]$$

Si descrivono di seguito le attenuazioni aggiuntive principali:

Effetto dell'impedenza acustica dell'aria:

se $\rho_0 c \neq 400 \text{ [Pa s m}^{-1}\text{]}$ (condizioni standard di pressione e temperatura) \Rightarrow

$$A_{ra} = 10 \log \frac{\rho_0 c}{400} = 10 \log K \quad [\text{dB}]$$

il valore A_{ra} può essere determinato partendo dalla conoscenza della temperatura e della pressione atmosferica.

Effetto dell'assorbimento dell'aria:

l'attenuazione dovuta all'assorbimento acustico dell'aria durante la propagazione del suono può essere calcolata con la relazione:

$$A_{ra} = \alpha r / 1000 \quad [\text{dB}]$$

dove $r \text{ [m]}$ è il cammino percorso dal suono, coincidente con la distanza tra sorgente e ricevitore, e α è il coefficiente di assorbimento acustico dell'aria in dB m^{-1} .

Il coefficiente α dipende fortemente dalla frequenza del suono, dalla temperatura e dall'umidità relativa dell'aria, mentre è poco influenzato dalla pressione.

		Coefficiente di assorbimento dell'aria α [dB/m]							
		Frequenze centrali delle bande di ottava							
T[°C]	U.R.[%]	63	125	250	500	1000	2000	4000	8000
10	70	0,12	0,41	1,04	1,93	3,66	9,66	32,80	117,00
15	20	0,27	0,65	1,22	2,70	8,17	28,40	88,80	202,00
15	50	0,14	0,48	1,22	2,24	4,16	10,80	36,21	129,00
15	80	0,09	0,34	1,07	2,40	4,15	8,31	23,70	82,80
20	70	0,09	0,34	1,13	2,80	4,98	9,02	22,90	76,60
30	70	0,07	0,26	0,96	3,14	7,41	12,70	23,10	59,30

Nel caso di condizioni atmosferiche non contemplate dalla tabella, i valori di α possono essere determinati con il metodo di calcolo riportato nella norma ISO 9613-1.

Effetto della presenza del suolo

La presenza del suolo influisce sulla propagazione del suono all'aperto a causa dell'interferenza tra il suono riflesso dal suolo e il suono trasmesso direttamente tra sorgente e ricevitore. Questo fenomeno che può essere sinteticamente rappresentato da un'attenuazione acustica, dipende in particolare dalle quote della sorgente (h_s) e del ricevitore (h_r), nonché dalle caratteristiche dello strato superficiale del suolo.

Una metodologia per il calcolo dell'attenuazione A_{u3} , è quella proposta dalla norma ISO 9613-2. Seguendo questa normativa lungo il percorso del suono dalla sorgente al ricevitore si possono individuare tre diverse zone. L'estensione di queste zone dipende oltre che dalla lunghezza della proiezione al suolo del percorso, d_p , anche da h_s e da h_r . Si avrà che:

1. la zona della sorgente individua un'area estesa dalla sorgente verso il ricevitore per una lunghezza pari a $30h_s \leq d_p$;

2. la zona del ricevitore individua un'area estesa dal ricevitore verso la sorgente per una lunghezza pari a $30hr \leq d_p$;
3. la zona intermedia individua un'area intermedia tra le due zone precedenti da considerare solo se $d_p > (30hs + 30hr)$;

queste tre zone intervengono nell'attenuazione del suono attraverso le loro caratteristiche acustiche che sono sintetizzate nel parametro G, per il quale si ha:

1. $G = 0$ nel caso di suolo duro, zone pavimentate, acqua, ghiaccio, calcestruzzo e altre superfici con bassa porosità;
2. $G = 1$ per suolo poroso, zone coperte di erba, alberi o altro tipo di vegetazione, terreni coltivati;
3. $0 < G < 1$ per suolo misto, stimando la frazione della superficie totale che può essere considerata come suolo poroso.

Determinati i valori di G per le varie zone, note hs, hr, d_p , si possono determinare per bande di ottava le attenuazioni A_s , A_r e A_m prodotte dalle tre zone considerate.

L'attenuazione totale dovuta al suolo sarà:

$$A_{n3} = A_s + A_r + A_m \quad [\text{dB}]$$

Frequenze centrali delle bande di ottava [Hz]	A_s o A_r ¹⁾ [dB]	A_m [dB]
63	-1,5	-3q ²⁾
125	-1,5 + G*a'(h)	-3q(1-Gm)
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)	

Note

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

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

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

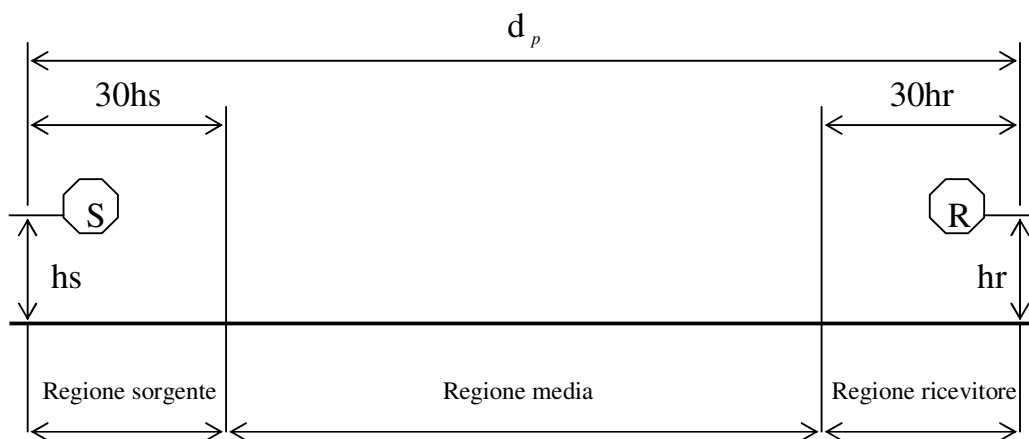
$$d'(h) = 1,5 + 5,0 * e^{-0,9h^2} (1 - e^{-d_p/50})$$

1) per calcolare A_s porre $G = G_s$ e $h = h_s$. Per calcolare A_r porre $G = G_r$ e $h = h_r$

2) $q = 0$ quando $d_p \leq 30(h_s + h_r)$;

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

d_p è la proiezione della distanza sorgente ricevitore [m] sulla superficie.



Effetto delle barriere acustiche

Per barriere acustiche si intendono schermi di varia natura, quali pareti massive, edifici, terrapieni, che inseriti nella linea di vista tra sorgente e ricevitore attenuano notevolmente la propagazione del suono diretto. Infatti si ottiene una riduzione del livello sonoro percepito nella zona in ombra, dalla parte del ricevitore al di sotto del prolungamento della congiungente la sorgente con la sommità dello schermo, poiché il suono raggiunge il ricevitore quasi esclusivamente per diffrazione in corrispondenza delle estremità della barriera.

L'attenuazione delle barriere acustiche è l'unica, tra le varie riscontrabili nella propagazione dei suoni all'esterno, che può essere tecnicamente controllata.

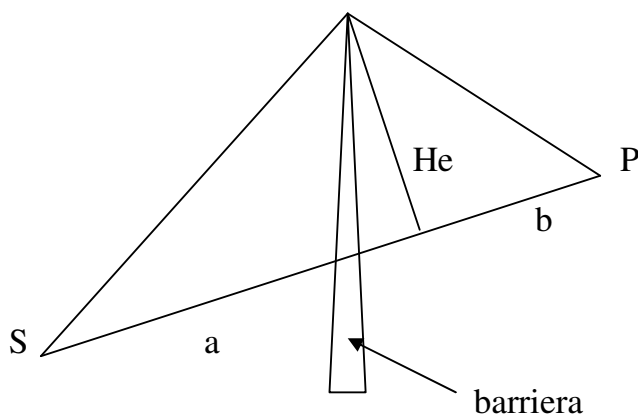
Il suono interagisce con la barriera per riflessione sulla sua superficie, per trasmissione attraverso la barriera stessa e per diffrazione ai bordi, in particolare alla sommità.

Ci sono diverse teorie per il calcolo del fattore di attenuazione A_{n4} per lo schermo rigido semi-infinito:

Secondo la teoria di Kirchhoff si ha:

$$A_{n4} = -10 \log \left\{ \left[\frac{1}{2} - C(v) \right]^2 + \left[\frac{1}{2} - S(v) \right]^2 \right\} \text{ [dB]}$$

dove la variabile $v = \pm H_e \sqrt{\frac{2}{\lambda} \left(\frac{1}{a} + \frac{1}{b} \right)}$ e $C(v)$ e $S(v)$ sono gli integrali di Fresnel.



Secondo la teoria di Keller, si ricava:

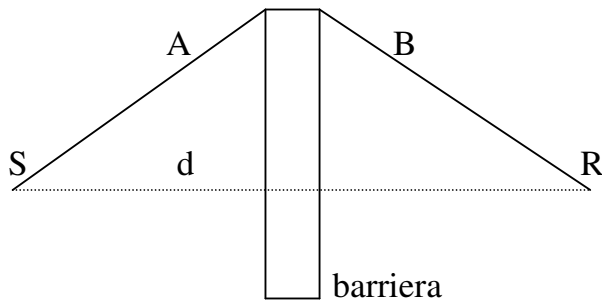
$$A_{n4} = 5 + 20 \log \frac{\sqrt{2\pi|N|}}{\tanh \sqrt{2\pi|N|}} \quad \text{per } N \geq -0,2$$

$A_{n4} = 0$ in tutti gli altri casi

dove N è l'indice di Fresnel, numero adimensionale fornito dalla relazione:

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

in cui λ [m] è la lunghezza d'onda del suono, d [m] la distanza in linea retta tra sorgente e ricevitore, $A+B$ la lunghezza in metri del percorso più breve compiuto dal suono tra sorgente e ricevitore superando la sommità dello schermo.



Effetto del fogliame

L'attenuazione prodotta dal fogliame di alberi o cespugli è molto piccola e si verifica soltanto in presenza di vegetazione particolarmente densa, tanto da non permettere la vista nella direzione di propagazione del suono.

In generale vengono tabellati i valori dell'attenuazione in dB che si verifica quando il suono percorre nel fogliame distanze d_f tra i 10 e i 20 metri e i valori in dB/m quando questa distanza d_f è compresa tra 20 e 200 m, valore limite quest'ultimo anche per distanze superiori percorse nel fogliame denso.

	Coefficiente di attenuazione del fogliame							
	Frequenze centrali delle bande di ottava [Hz]							
	63	125	250	500	1000	2000	4000	8000
Attenuazione [dB] per d_f da 10 a 20 m	0	0	1	1	1	1	2	3
Attenuazione [db/m] per d_f da 20 a 200 m	0,02	0,03	0,04	0,05	0,06	0,08	0,09	0,12