

MASSIMO GRILLI

Albo degli Ingegneri Provincia di Roma n.15007

**Applicazioni
di
Acustica**

- Applicazioni, Normative, Sicurezza del Lavoro -

PARTE IV

- Internet Edition -

Per contatti:

E-Mail : mc8812@mclink.it

Personal Web Page: www.mclink.it/personal/MC8812/

INDICE PARTE IV

1. PROGETTO DI SISTEMI SCHERMANTI.....	1
1.1 MODALITA' DI CALCOLO DELLE BARRIERE.....	3
1.1.1 Metodo Semplificato - 1 (da relazione Azzaretto, Giuliani, Pieroni, Chiacchierini).....	3
1.1.3 Abaco di Maekawa (Figura 3 per $N < 1$ ed $N > 1$).....	5
1.1.4 Formula di Kurze e Anderson.....	5
1.2 BARRIERA SPESSA.....	6
1.2.1 Primo metodo.....	6
1.2.2 Secondo metodo.....	7
1.3 SCHERMI MULTIPLI.....	9
1.4 BARRIERE DI LUNGHEZZA FINITA.....	9
1.5 CONFRONTO FRA I VARI METODI DI CALCOLO.....	10
1.5.1 Metodo Semplificato 1.....	10
1.5.2 Metodo Semplificato 2.....	10
1.5.3 Abaco di Maekawa.....	11
1.5.4 Formula di Kurze e Anderson.....	11
1.6 ESEMPIO DI BARRIERA SPESSA.....	12
1.6.1 Esempio sul primo metodo.....	12
1.6.2 Esempio sul secondo metodo.....	13
1.7 ESEMPIO COMPLETO.....	14
1.8 ABACHI.....	18
1.8.1 Abaco di Redfearn.....	18
1.8.2 Schermo di lunghezza finita - CETUR.....	18
1.8.2.1 Metodo semplificato.....	19
1.8.2.2 Metodo approssimato.....	19
1.8.2.3 Metodo esatto.....	19
1.8.3 Abaco dell' EMPA (Svizzera).....	20
1.8.4 Abaco Ente Strade RFT.....	20
1.8.4.1 Esempio.....	21
1.9 CENNI SUI METODI DI PROVA E COLLAUDO ACUSTICO DELLE BARRIERE.....	23
1.9.1 Misure in laboratorio su elementi di barriera.....	23
1.9.2 Misure in campo aperto.....	23
1.9.2.1 Insertion Loss.....	24
1.9.2.2 Metodo Impulsivo.....	24
1.9.3 Misure di collaudo in opera.....	25

PREMESSA (da leggere)

L'idea di questo testo è nata per "mettere in ordine" un insieme di appunti, presi in occasione di un interessantissimo corso di specializzazione in acustica applicata, organizzato dall'Ordine degli Ingegneri di Roma nel 1994 e svolto dal Prof. Ing. E. Azzaretto dell'ISPESL con la collaborazione del Prof. Dr. G. Mario Mattia, cui vanno i miei ringraziamenti per aver contribuito in modo estremamente efficace, non solo a colmare quelle lacune inevitabilmente lasciate dall'insegnamento accademico, ma soprattutto per aver affrontato il tema dal punto di vista del professionista che opera in un contesto sociale fatto di esigenze, norme, problematiche, in altre parole ... nella realtà quotidiana.

Gli argomenti sono stati rielaborati ed integrati da alcune parti di natura generale, con il solo scopo di richiamare le nozioni di matematica e fisica tecnica più utilizzate, facendo riferimento principalmente ai testi citati in bibliografia, nonché fornendo dei metodi pratici, specialmente nelle operazioni con i logaritmi, per una veloce risoluzione manuale dei calcoli.

Questa edizione essendo distribuita solamente mediante canali informatici (es. Internet) e non avendo finalità commerciali, che altrimenti avrebbero richiesto uno sforzo di editing maggiore di quello, già piuttosto impegnativo, che ho potuto approfondire nel mio solo tempo libero, è mancante di alcuni (pochi) grafici ed argomenti disponibili in solo forma cartacea, ma dei quali, se avrò tempo, mi ripropongo di fornire una versione su file.

I contenuti sono stati elaborati nel corso del 1994 e quindi non richiamano la Legge quadro sull'inquinamento acustico n. 447 del 26/10/95, la quale, peraltro, non ha modificato nella sostanza la disciplina di cui al decreto legislativo n. 277 15/08/91 e DPCM 1 marzo 1991; anche per questo aggiornamento mi ripropongo di spenderci in futuro un po' di tempo.

Un tema che mi piacerebbe sviluppare sarebbe quello del rumore aeronautico e del quale ne ho fatto un brevissimo ed introduttivo cenno.

Ritenendo importante arrivare a confezionare un testo, che possa essere di valido ausilio per chi cerca informazione/formazione sul tema dell'acustica, sia in termini generali che sui risvolti normativi negli ambienti lavorativi ed abitativi, non sarebbe male se, tutti coloro che volessero collaborare allo sviluppo degli argomenti, alla segnalazione dei sempre possibili errori sia formali che sostanziali, alla illustrazione di casi pratici ed esperienze dirette, al miglioramento della veste grafica ed altro, inviassero il loro contributo (fosse anche solo un commento per un sostegno morale dell'iniziativa) alla E-Mail del sottoscritto (mc8812@mclink.it) o di chi ha distribuito questo testo, onde poter introdurre le aggiunte/modifiche del caso (con riferimento agli autori).

Buona lettura

Massimo Grilli

PARTE IV

- **Progetto di Sistemi Schermanti**
- **Il Rumore Aeronautico (cenni)**

1. PROGETTO DI SISTEMI SCHERMANTI

In generale definiremo come sistema schermante, qualunque ostacolo solido, acusticamente opaco, che si frappone alla trasmissione dell'onda diretta dalla Sorgente al Ricevitore.

Il ricorso alle barriere acustiche è indicato essenzialmente quando non sia possibile tecnicamente od economicamente intervenire direttamente sulla sorgente del disturbo (la qual cosa darebbe peraltro un risultato migliore).

L'efficacia di un sistema schermante viene misurata determinando qual'è la riduzione del livello di pressione acustica misurata al ricevitore dopo l'inserzione della barriera; tale differenza viene definita come attenuazione per inserzione "*Insertion Loss*" $\Rightarrow \mathbf{IL}_{\text{barrier}}$:

$$[\text{IV.1}] \quad \mathbf{IL}_{\text{barrier}} = L_{\text{p(prima)}} - L_{\text{p(dopo)}}$$

In base a quanto già detto nella PARTE II (3.3.12), dove vi sia la presenza di altri fenomeni attenuanti, si ha in generale:

$$[\text{IV.2}] \quad L_{\text{p(dopo)}} = L_{\text{w}} - A_{\text{tot}} - \mathbf{IL}_{\text{barrier}}$$

I sistemi schermanti sono di varia natura ad esempio:

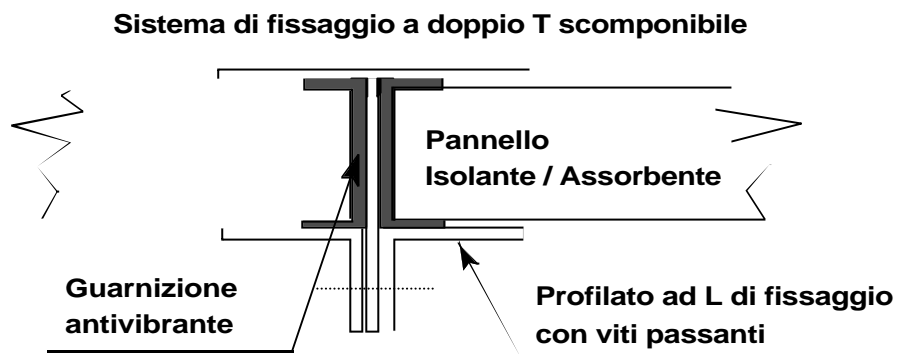
- vegetali costituite da alberi e cespugli
- muratura in cemento o mattoni
- in legno ricopribile con piante rampicanti
- in plastica
- in metallo (Al e Fe) con trattamenti anticorrosivi
- in materiale trasparente (metacrilato, plexiglas..)

In generale i requisiti che devono possedere le barriere, per le ragioni che saranno chiarite in seguito sono:

- efficacia sia per Isolamento che per Assorbimento
- resistenza meccanica (sia per l'effetto del vento che per urto)
- minima riflessione ottico - luminosa
- antivibrante
- resistenza chimica agli agenti atmosferici
- montaggio e smontaggio agevoli

Per le barriere in ferro il trattamento chimico di protezione in genere è la zincatura o la cataforesi; quest'ultima è da preferirsi dato che la zincatura può presentare delle zone in cui lo strato protettivo, depositato mediante immersione, non aderisce perfettamente al metallo; l'aria rimasta intrappolata nella cavità così formata, genera quindi un deleterio processo di ossidazione.

Anche il montaggio e smontaggio devono risultare i più semplici possibili, evitando sistemi aventi la guida di supporto dei pannelli non scomponibile che ne impedisce lo smontaggio parziale in caso di sostituzioni:



1.1 MODALITA' DI CALCOLO DELLE BARRIERE

La letteratura in proposito è varia, con proposte di formulazioni differenti, ma che sostanzialmente identificano delle variabili, per il calcolo dell'attenuazione per inserzione delle barriere, di natura geometrica e correlate alla frequenza della perturbazione incidente.

Prima di passare in rassegna i modelli proposti, è bene osservare che per distanze S - R superiori al centinaio di metri, l'attenuazione della perturbazione è influenzata anche dai parametri, visti nella PARTE II, dovuti al suolo e l'aria con una forte riduzione delle componenti medio-alte; pertanto la barriera dovrà essere dimensionata in modo da realizzare la voluta attenuazione alle basse frequenze che si propagano con una minor attenuazione.

1.1.1 Metodo Semplificato - 1 (da relazione Azzaretto, Giuliani, Pieroni, Chiacchierini)

Barriera sottile la cui attenuazione dipende solo dalla diffrazione dell'onda incidente

Le ipotesi semplificative sono:

1. il rumore si diffonde in campo semilibero senza riflessioni dovute a muri od altre superfici
2. terreno piano e orizzontale, senza gibbosità e con erba bassa
3. rumore ripetibile sia come frequenza che livello

In tale caso l'attenuazione fornita da una barriera isolante, fornita di superficie fonoassorbente rivolta verso la sorgente di rumore e di isolamento maggiore o uguale a 24 dBA (limite pratico superiore ottenibile per barriera di 3m di altezza) può essere stimata con la formula:

$$[IV.3] \quad \mathbf{IL}_{\text{barrier}} = 13 + 10 \log N \text{ dB}$$

$$[IV.4] \quad N = \frac{2(A + B - d)}{l} \quad \text{n. Fresnel}$$

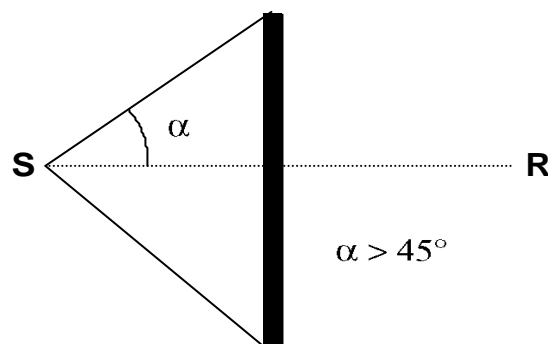
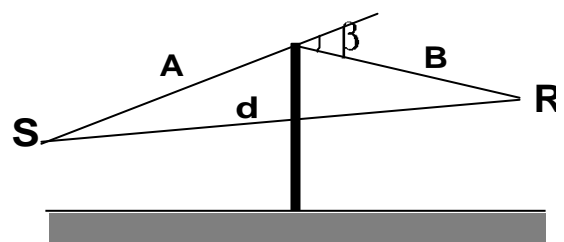
ponendo $f = 500 \text{ Hz}$ quindi

$$l = \frac{c}{f} = 0,68 \Rightarrow \text{lunghezza d'onda di}$$

progetto

Il criterio stabilisce di effettuare il calcolo per la sola frequenza 500 Hz dato che è la più rappresentativa nel campo delle frequenze da schermare.

La pendenza della congiungente S-R è non deve



risultare superiore a $5^\circ \div 6^\circ$, e la lunghezza della barriera dovrà essere tale da garantire una copertura della sorgente con un angolo di almeno 45° .

La presenza di superfici riflettenti o dislivelli notevoli fra S ed R porta a dei valori di attenuazione, in genere, anche parecchio più bassi di quelli calcolati.

Nelle realizzazioni pratiche (come si vedrà nell'esempio 1.5.1) un incremento dell'efficacia della barriera è ottenibile inclinando verso la sorgente la parte superiore della barriera, intervenendo quindi solo sulla geometria e non sui materiali.

1.1.2 Metodo Semplificato - 2

Facendo riferimento alle figure del metodo precedente si ha :

$$[\text{IV.5}] \quad \mathbf{IL}_{\text{barrier}} = 10 \log (3 + 10 \mathbf{N K}) - \mathbf{A}_{\text{ground}} \quad \mathbf{dB} \quad (\text{ev. valori negativi sono posti } = 0)$$

con ancora $N = \frac{2(A + B - d)}{I} \approx 0$ (si pone $N=0$ quando la retta \mathbf{d} lambisce l'estremità superiore della barriera oppure risulta più alta)

Il termine $\mathbf{A}_{\text{ground}}$ è l'attenuazione fornita dal terreno prima dell'installazione della barriera (vedi PARTE II 3.3.3) ed è inserito poichè si considera che complessivamente la barriera riduce l'effetto di attenuazione apportato dal terreno dato che la propagazione avviene per rifrazione dal bordo superiore della barriera; quindi inserendo il termine $-\mathbf{A}_{\text{ground}}$ questo andrà ad elidersi con l'identico valore contenuto in \mathbf{A}_{tot} all'atto della determinazione del livello di pressione sonora dopo l'inserzione dalla barriera $\mathbf{L}_p(\text{dopo})$ (si veda [IV.2] e PARTE II -3.3).

\mathbf{K} = fattore di correzione per gli effetti atmosferici che per $\mathbf{d} \leq 100 \text{ m}$ si pone pari a $\mathbf{K} = 1$; per distanze $\mathbf{d} > 300 \text{ m}$, in genere per effetto delle condizioni ambientali, si ha un valore di attenuazione per inserzione estremamente contenuto; a distanze intermedie $100 < \mathbf{d} < 300 \text{ m}$, considerando la condizione di maggior favore per la propagazione (quindi peggiorative per quel che riguarda l'attenuazione della perturbazione) relativa ad onde che si propagano secondo direttrici ricadenti verso il suolo) il coefficiente \mathbf{K} è dato da:

$$[\text{IV.6}] \quad \mathbf{K} = e^{-0,0005 \sqrt{\frac{\mathbf{A} * \mathbf{B} * \mathbf{d}}{\mathbf{N I}}}}$$

1.1.3 Abaco di Maekawa (Figura 3 per $N < 1$ ed $N > 1$)

Utilizza il numero di Fresnel è di natura sperimentale ed è applicabile nelle ipotesi di:

- distanza S-R grande rispetto la λ considerata (che nel caso di tracciato stradale è tipicamente di 50 cm, posti ad una distanza inferiore a 100 m dal bordo stradale)
- posizione di S ed R non troppo dissimetriche rispetto lo schermo
- effettuare il calcolo per tutte le immagini di S ed R (riflessioni sul suolo e sullo schermo) e cumulare le pressioni acustiche elementari ottenute per ciascuna sorgente: la sorgente reale è l'insieme di quelle immagine
- considerare il reale tragitto diffratto nel caso in cui S ed R non siano contenute nello stesso piano ortogonale allo schermo

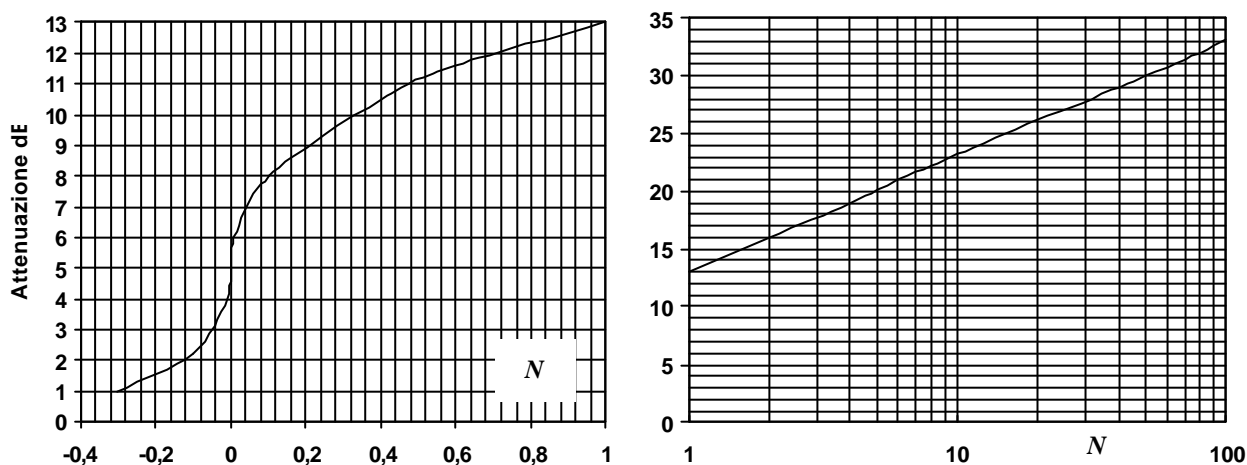


Figura 3

1.1.4 Formula di Kurze e Anderson

Nelle ipotesi di sorgente puntiforme e schermo infinito, e per $N > 0$ è stata proposta la seguente formula:

$$[\text{IV.7}] \quad \mathbf{IL}_{\text{barrier}} = 5 + 20 \log \frac{\sqrt{2pN}}{\tanh \sqrt{2pN}} \quad \text{dB}$$

con il limite pratico superiore di 24

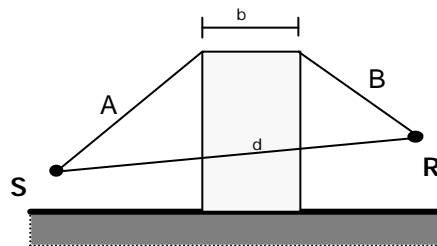
1.2 BARRIERA SPESSA

L'ipotesi vista fino ad ora di schermo sottile può essere considerata applicabile solo se lo spessore della barriera è inferiore alla λ del suono; ad esempio per traffico autostradale il valore predominante di lunghezza d'onda è $\lambda = 50$ cm il che consente tale approssimazione.

Nel caso lo schermo sia realizzato da un terrapieno o un edificio è necessario apportare una correzione al valore di $\mathbf{IL}_{\text{barrier}}$; vengono di seguito proposti due metodi per apportare tale correzione.

Prima di illustrare i due metodi diamo un criterio quantitativo per poter definire una barriera spessa:

- se lo spessore è $\mathbf{b} \geq 3 \text{ m}$ la barriera è da considerarsi spessa per tutte le componenti dello spettro di rumore
- se $\mathbf{b} < 3 \text{ m}$ la barriera andrà considerata spessa solo per le componenti la cui lunghezza d'onda risulta $\lambda < \mathbf{b} / 5$, per le altre ($\lambda > \mathbf{b} / 5$) sarà sottile
- in tutti gli altri casi la barriera si considera sottile



1.2.1 Primo metodo

Si porta in conto nella determinazione del numero di Fresnel, lo spessore \mathbf{b} della barriera:

$$[\text{IV.8}] \quad N = \frac{2(A + b + B - d)}{\lambda} \quad \text{con } N \geq 0$$

($N = 0$ quando la retta \mathbf{d} lambisce l'estremità superiore della barriera oppure risulta più alta)

$$[\text{IV.9}] \quad \mathbf{IL}_{\text{barrier}} = 10 \log (3 + 30 N K) - A_{\text{ground}} \text{ dB} \quad (\text{ev. valori negativi sono posti } = 0)$$

in cui il fattore \mathbf{K} , relativo alla correzione meteorologica, è stato già definito in IV.6.

1.2.2 Secondo metodo

Questo secondo metodo consiste nel calcolare l'attenuazione dovuta ad uno schermo sottile virtuale posizionato in corrispondenza dello spigolo **E** considerando la sorgente virtuale **S'** (il segmento **S-S' = b**) e di sommare un termine correttivo pari a :

$$[\text{IV.10}] \quad \mathbf{DIL}_{\text{barrier}} = \mathbf{k} \log \frac{2Pb}{I}$$

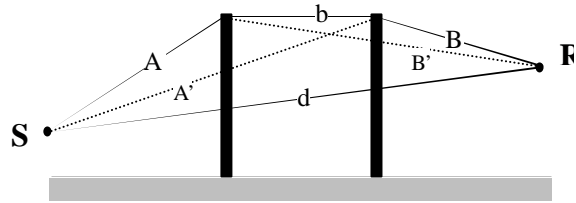
in cui il termine **k** si ricava dall'abaco di Fig. 6 noti gli angoli, come da figura a pagina successiva, formati dai segmenti uscenti da **S** ed **R** e tangenti gli spigoli superiori della barriera.

Figura 6

[FIGURA NON ANCORA DISPONIBILE GRAPH_02]

1.3 SCHERMI MULTIPLI

Un metodo per calcolare l'efficacia di un sistema schermante costituito da due barriere è quello di considerare una doppia diffrazione, una prima $d_1 = A + B' - d$ la seconda $d_2 = A' + B - d$ quindi cumulare (logaritmicamente) le due attenuazioni calcolate secondo un'espressione del genere [IV.11] (con le opportune modifiche).



1.4 BARRIERE DI LUNGHEZZA FINITA

In caso l'estensione sul piano orizzontale dello schermo non offra la dovuta copertura della sorgente, è necessario calcolare anche l'effetto della diffrazione presente ai bordi, la quale riduce complessivamente l'efficacia dello schermo.

Il calcolo è comunque semplice dato che bisogna determinare il valore di attenuazione realizzato da ciascuno dei tre cammini acustici: sopra (a), sinistra (b) e destra (c) della barriera.

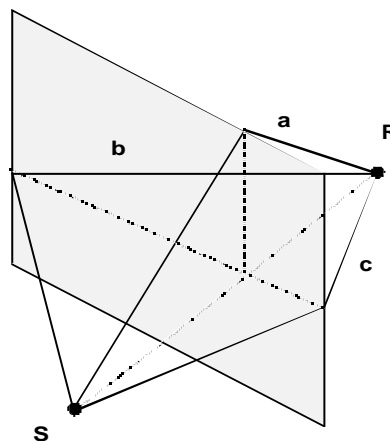
Per il cammino (a) si procede esattamente come per barriera infinita sottile o spessa è IL_a

Per i cammini laterali (b) e (c) si determinano i valori di A, B, b, d (relativi agli spigoli laterali) ed usando le formule viste per i casi di barriera infinita sottile o spessa si determinano $\Rightarrow IL_b, IL_c$ ponendo $K = 1$ ed $A_{ground} = 0$.

E' anche possibile trascurare un cammino laterale se l'altezza effettiva di questo (distanza della congiungente S-R con il bordo) è almeno 4 volte superiore a quella dell'altro cammino laterale.

A questo punto note le attenuazioni per ciascun percorso il valore di $IL_{barrier}$ sarà:

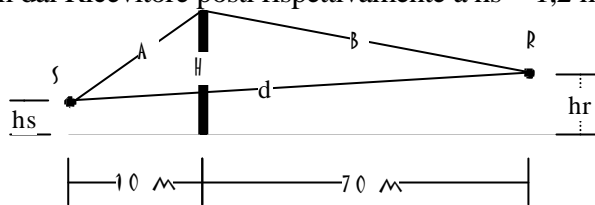
$$[IV.11] \quad IL_{barrier} = -10 \log (10^{-0,1 IL_a} + 10^{-0,1 IL_b} + 10^{-0,1 IL_c})$$



1.5 CONFRONTO FRA I VARI METODI DI CALCOLO

Vediamo un esempio di calcolo per una data barriera

Calcolare la perdita per inserzione di una barriera sottile alta $H = 5$ m, posta su terreno erboso, posta a 10m dalla Sorgente e 70 m dal Ricevitore posti rispettivamente a $h_s = 1,2$ m e $h_r = 1,8$ m dal suolo:



1.5.1 Metodo Semplificato 1

$$A = \sqrt{(H - h_s)^2 + 10^2} = \sqrt{3,8^2 + 10^2} = 10,697663$$

$$B = \sqrt{(H - h_r)^2 + 70^2} = \sqrt{3,2^2 + 70^2} = 70,073105$$

$$d = \sqrt{(h_r - h_s)^2 + 80^2} = \sqrt{0,6^2 + 80^2} = 80,00225$$

$$\delta = A + B - d = 0,768518$$

$$\lambda = \frac{c}{f} = \frac{340}{500} = 0,68 \quad N = \frac{2d}{\lambda} = 2,260347$$

$$IL_{\text{barrier}} = 13 + 10 \log N = 13 + 3,5 = 16,5 \text{ dB}$$

1.5.2 Metodo Semplificato 2

In questa formulazione viene considerata la riduzione dovuta al termine A_{ground} poichè alla perdita per inserzione viene dato più il significato di efficacia dello schermo acustico facendo immediatamente "scontare" il fatto che non c'è attenuazione (o riflessione) del suolo; ciò comporta, per le frequenze dove $A_{\text{ground}} > 0$, una anche drastica riduzione di IL_{barrier}

Per rendere confrontabili i valori non consideriamo A_{ground} con $K = 1$ otteniamo, sempre a 500 Hz,:

$$IL_{\text{barrier}} = 10 \log (3 + 10 N) = 10 \log(25,6) = 14,1 \text{ dB}$$

1.5.3 Abaco di Maekawa

Si entra nel diagramma di Figura 3 con il numero di Fresnel $N = 2,26$

Si rileva $IL_{\text{barrier}} = 16,5 \text{ dB}$

1.5.4 Formula di Kurze e Anderson

Per $N = 2,26$ si ha utilizzando la [IV.7]:

$$IL_{\text{barrier}} = 5 + 20 \log \frac{\sqrt{2pN}}{\tanh(\sqrt{2pN})} = 5 + 20 \log \frac{3,768}{\tanh(3,768)} = 16,5 \text{ dB}$$

In sostanza (verificando i risultati per diversi valori di N) si può osservare che :

- Il metodo 1 non è applicabile per $N < 0,3$ poichè tende a dare valori negativi di perdita di inserzione
- Il metodo 2 è applicabile in tutto il campo degli $N > 0$ realizzando uno scostamento dai valori forniti con il metodo 1 di $- 2 \text{ dB} \div - 3 \text{ dB}$
- la formula di Kurze e Anderson è applicabile in tutto il campo degli $N > 0$; il metodo 1 ne approssima molto bene l'andamento per $N > 0,3$
- l' abaco di Maekawa è l'unico a fornire valori di attenuazione per $N < 0$; nel campo $N > 0$ coincide praticamente (salvo che nell'immediato intorno di $N = 0$) con l'andamento espresso dalla formula di Kurze e Anderson.

In sintesi prendendo a riferimento i valori forniti dalla formula di Kurze e Anderson si ha:

Scostamenti in dB	Numero di Fresnel			
	< 0	0,0 ÷ 0,3	0,3 ÷ 10	> 10
Metodo - 1	N.A.	$-\infty \div -1$	~ 0	
Metodo - 2	N.A.	- 0,5	- 2,5	- 3
<i>Kurze e Anderson</i>	N.A.	0	0	0
Maekawa		+ 1 ÷ ~ 0	~ 0	

1.6 ESEMPIO DI BARRIERA SPESSA

In riferimento alla figura ed i simboli visti nel corrispondente paragrafo ipotizziamo una sorgente posta ad un'altezza di $h_s = 0,3$ m e distante 10 m da un ostacolo alto $H = 3$ m e profondo $b = 5$ m, il ricevitore è a 100 m dalla sorgente ad un'altezza $h_r = 1,2$, calcoliamo l'attenuazione a 500 Hz applicando i due metodi visti in precedenza (1.2.1 e 1.2.2):

Verifichiamo innanzitutto che risulti $\mathbf{l} < \mathbf{b} / 5$

Alla frequenza di 500 Hz si ha in effetti $\lambda = 0,68$ m $< 5 / 5$ ed è quindi corretto considerare spessa la barriera

1.6.1 Esempio sul primo metodo

Non considerando al solito A_{ground} (che andrà invece computato una volta che si sia scelto di adottare un metodo piuttosto che un altro) e ponendo $K = 1$, avremo:

$$A = \sqrt{(H - h_s)^2 + 10^2} = 10,358088 \quad ; \quad B = \sqrt{(H - h_r)^2 + 85^2} = 85,019056$$

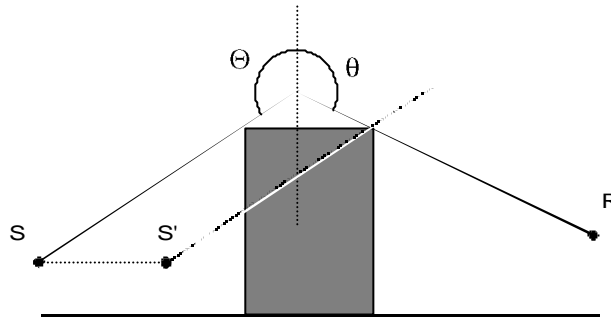
$$d = \sqrt{(h_r - h_s)^2 + 100^2} = 100,00405$$

$$\delta = A + B + b - d = 0,3730954 \quad ; \quad \lambda = \frac{c}{f} = \frac{340}{500} = 0,68$$

$$N = \frac{2d}{l} = 1,0973$$

$$\mathbf{IL}_{\text{barrier}} = 10 \log (3 + 30 N) = 13 + 3,5 = 16,5 \text{ dB}$$

1.6.2 Esempio sul secondo metodo



per lo schermo sottile virtuale si ha:

$$A = \sqrt{(H - hs')^2 + 10^2} = 10,358088 \quad ; \quad B = \sqrt{(H - hr)^2 + 85^2} = 85,019056$$

$$d = \sqrt{(hr - hs')^2 + 95^2} = 95,004263$$

$$\delta = A + B - d = 0,3728809 \quad ; \quad \lambda = c / f = 340 / 500 = 0,68$$

$$N = 2 \delta / \lambda = 1,0967$$

dalla [IV.3] si ha

$$IL_{\text{barrier}} = 13 + 10 \log N = 13 + 10 \log (1,0967) = 13,4 \text{ dB}$$

a cui andrà aggiunto il termine correttivo DIL_{barrier} (fig. 6), che essendo $\theta \approx 92$ e $k = 1,5$ risulterà

$$DIL_{\text{barrier}} = k \log (2pb / l) = 1,5 \log (2p5 / 0,68) = 2,6 \text{ dB} ; \text{ quindi si ha:}$$

$$IL_{\text{barrier}} = 13,4 + 2,6 = 16 \text{ dB} \text{ che è in buon accordo con il valore del primo metodo}$$

1.7 ESEMPIO COMPLETO

Vediamo ora un caso completo con calcolo delle attenuazioni nelle diverse bande di ottava del rumore utilizzando la di Formula di Kurze e Anderson e considerando lo schermo finito, quindi con cammini laterali di propagazione:

Si abbia una torre evaporativa installata sul tetto di un edificio e per la quale siano dati i seguenti livelli di potenza per bande d'ottava:

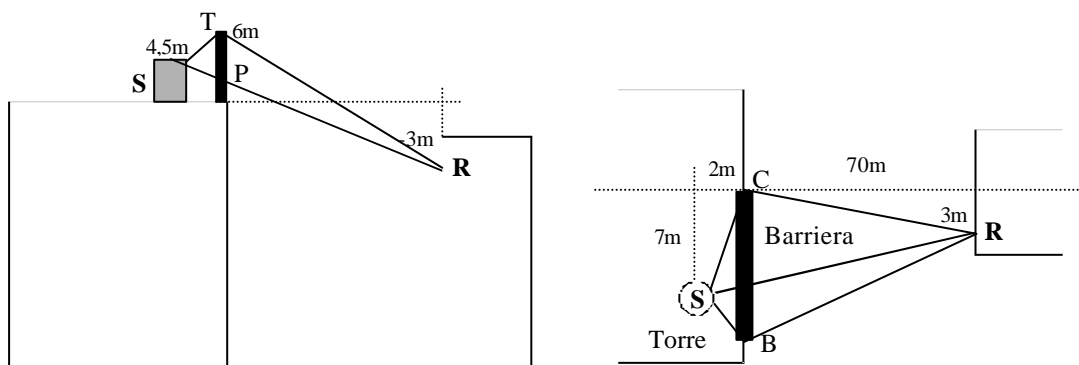
f	63	125	250	500	1000	2000	4000	8000
L_w dB	108	106,5	104	103	95,5	89	83,5	81,5

Si vuole determinare la perdita per inserzione di una barriera posta a schermare tale torre evaporativa, ed il livello di attenuazione rilevato presso un appartamento sito in un edificio di fronte.

Dati geometrici:

- Schermo altezza 6m , lunghezza 10 m
- posizione di S rispetto lo schermo: distanza 2 m, altezza dal piano di appoggio 4,5 m, posta a 7 m da uno spigolo laterale
- posizione di R rispetto lo schermo: distanza 70 m, altezza dal piano di appoggio - 3 m, posta a 3 m dallo stesso spigolo laterale

Si ha inoltre una temperatura ambiente 20°C ed una umidità relativa del 70%



Per prima cosa calcoliamo la pressione acustica L_p in assenza dello schermo impiegando la nota espressione (PARTE II) $L_{p(\text{prima})} = L_w - A_{\text{tot}}$

In questo caso si ha $A_{tot} = A_{div} + A_{air}$:

A_{div} : si ricava per tutte le frequenze dello spettro dalla $A_{div} = -10 \log \frac{\pi Q \bar{\sigma}}{4 \rho d^2 \bar{\sigma}} - C$; essendo $C = 0$

e sorgente isotropa $Q = 1$, dai calcoli geometrici (si veda il foglio allegato relativo al programma di calcolo automatico barriere) si ha $d = 72,5$ m quindi:

$$A_{div} = -10 \log \frac{\pi}{4 \rho 72,5^2 \bar{\sigma}} = 48,2 \text{ dB}$$

Noto che $A_{air} = Ra \cdot d / 1000$ e ricavando i coefficienti di attenuazione per le date condizioni di temperatura e umidità da PARTE II, si ha:

f	63	125	250	500	1000	2000	4000	8000
Ra	0,1	0,34	1,1	2,8	5	9	23	90
A_{air} dB	0	0	0	0,2	0,4	0,7	1,7	6,5

che si vede essere trascurabile nel campo delle frequenze medio basse data l'esiguità della distanza.

Quindi si ha arrotondando l'attenuazione totale a 0,5 dB ed applicando la ponderazione A:

f	63	125	250	500	1000	2000	4000	8000	Hz
A_{div}	48,2	48,2	48,2	48,2	48,2	48,2	48,2	48,2	dB
A_{air}	0	0	0	0,2	0,4	0,7	1,7	6,5	dB
- Atot	- 48	- 48	- 48	- 48,5	- 48,5	- 49	- 50	- 54,5	dB
Lw	108	106,5	104	103	95,5	89	83,5	81,5	dB
Lp	60	58,5	56	54,5	47	40	33,5	27	dB
(A)	- 26,2	- 16,1	- 8,6	- 3,2	0	1,2	1	- 1,1	dB(A)
Lp	33,8	42,4	47,4	51,3	47	41,2	34,5	25,9	dB(A)

il livello complessivo, senza schermo, misurabile nel sito disturbato sarà quindi:

$$Lp(\text{prima}) = 63,9 \text{ dB} \quad \text{ovvero } Lp(\text{prima}) = 54,4 \text{ dB(A)}$$

La differenza fra i due valori è dovuta alla prevalenza nel rumore di frequenze basse che vengono notevolmente attenuate dalla ponderazione A.

Si noti anche come il picco di livello lo si ha intorno ai 500 Hz.

A questo punto si deve:

1. determinare la perdita per inserzione relativamente ai tre cammini possibili (IL_{top} , IL_{dx} , IL_{sx});
2. calcolare in base alla [IV.11] il valore di IL_{tot} per ciascuna ottava;
3. determinare per ciascuna ottava il livello L_p (sia in dB che dB(A))
4. sommare i livelli così ottenuti determinando $L_p(dopo)$
5. ricavare l'attenuazione per inserzione della barriera mediante la

$$[IV.1] \quad IL_{barrier} = L_p(prima) - L_p(dopo)$$

Viene a tal proposito allegato l'output della procedura di calcolo automatico della barriera, per l'esempio in questione.

unità di misura [m]

Geometria Barriera			
$l1$	$l2$	b	L
6.00	0.00	0	10.00

Posizione Sorgente S		
x_s	y_s	z_s
2.00	7.00	4.50

Posiz. Ricevitore R		
x_r	y_r	z_r
70.00	3.00	-3.00

V. di propagazione suono $c =$		340	
h	dH	d_{xs}	Y
6	0.00	0.00	2
		x_r	70
			0.111111111

verifica coperture		PT		Z	
vr_{min}	vr_{max}	1.708	-0.208		
-245.0	115.0	OK copertura sinistra		OK copertura destra	

zr_{max}	
58.5	OK copertura verticale

d	A	B	gct
72.5	2.50246792	70.695836	0.6983
	SB	RB	gcd
	3.61156514	70.7260094	1.8376
	SC	RC	gcs
	7.28309019	70.4426604	5.2258

grado di copertura top
grado di copertura destra
grado di copertura sinistra

Spettro di Rumore nel punto R

f	62,5	125	250	500	1000	2000	4000	8000
Filtro (A)	-26,2	-16,1	-8,6	-3,2	0	1,2	1	-1,1
L_p	60	58,5	56	54,5	47	40	33,5	27
L_p dB(A)	33,8	42,4	47,4	51,3	47	41,2	34,5	25,9

Lp(prima) applic. schermo	63,9 dB	54,4 dB(A)	prevalenza di BASSE f
----------------------------------	----------------	-------------------	-------------------------

Attenuazione per la presenza dello schermo

f	62,5	125	250	500	1000	2000	4000	8000
$2f/c$	0,367647	0,735294	1,470588	2,941176	5,882353	11,764706	23,529412	47,058824
IL_{top}	8,4	10,6	13,2	16,1	19,1	22,1	24,0	24,0
IL_{dx}	11,6	14,3	17,3	20,3	23,3	24,0	24,0	24,0
IL_{sx}	15,8	18,8	21,8	24,0	24,0	24,0	24,0	24,0
IL_{tot}	6,2	8,6	11,4	14,2	16,8	18,5	19,2	19,2

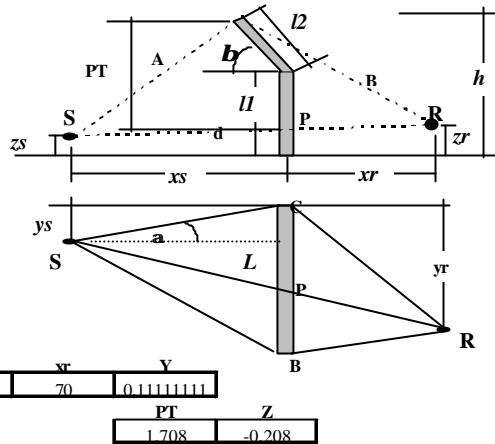
Livelli risultanti per inserzione barriera

L_p dB	53,8	49,9	44,6	40,3	30,2	21,5	14,3	7,8
L_p dB(A)	27,6	33,8	36,0	37,1	30,2	22,7	15,3	6,7

Lp(dopo) applic. schermo	55,8 dB	41,2 dB(A)	prevalenza di BASSE f
---------------------------------	----------------	-------------------	-------------------------

Valutazione complessiva efficienza barriera

ILbarrier = Lp(prima) - Lp(dopo) =	13,2 dB(A)
---	-------------------



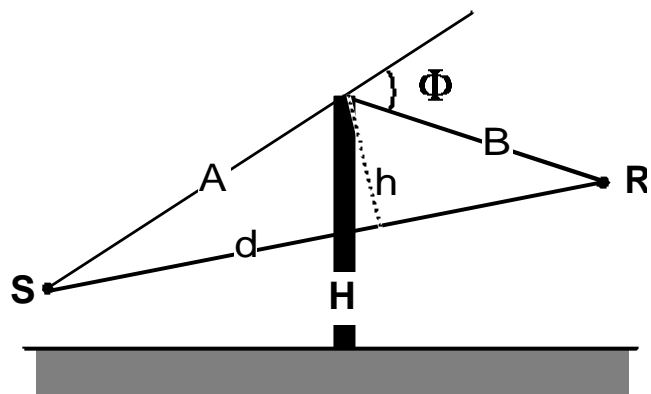
1.8 ABACHI

Per arrivare ad un calcolo rapido e semplice dell'efficacia di un sistema schermante sono stati proposti diversi abachi, tipicamente realizzati per rumore da traffico stradale per il quale la lunghezza d'onda media è di 50 cm; proponiamo di seguito alcuni dei più utilizzati.

1.8.1 Abaco di Redfearn

E' molto comodo per il progettista ma ha il limite di considerare schermi di lunghezza infinita e di condurre spesso a risultati alquanto ottimistici.

L'abaco (Fig. 9.1.1) consente di scegliere i parametri di progetto che possono essere : $\delta = A + B - d$ od il numero di Fresnel $N = 2\delta/\lambda$, da leggersi nel diagramma superiore che riporta nelle ordinate di destra e sinistra l'attenuazione dello schermo per sorgenti puntiformi e lineari; oppure i parametri di Redfearn $h =$ altezza efficace dello schermo ed angolo di diffrazione ϕ (come da figura).



Quando lo spettro di rumore sarà modificato o da assorbimento aereo per distanze Sorgente Rumore maggiori di 100 m (diverso a seconda delle frequenze) o da diffrazione su di un primo schermo, il calcolo dell'attenuazione dello schermo dovrà essere effettuato ottava per ottava in base al numero di Fresnel.

In genere le bande normalizzate per traffico veicolare sono 6 da 125 Hz a 4000 Hz

1.8.2 Schermo di lunghezza finita - CETUR

In riferimento al traffico veicolare lungo una strada, il computo dell'efficacia di uno schermo di estensione l posto a protezione di una ubicazione ricevente R (si veda figura 9.1.8), può essere computato con tre metodi:

1.8.2.1 Metodo semplificato

Si calcola l'efficacia dello schermo per sola diffrazione, secondo le modalità viste per schermo di lunghezza infinita, quindi impiegando l'abaco di fig. 9.1.7, entrando con tale valore di attenuazione e l'angolo di "mascheramento" ϕ misurato in R e relativo allo schermo di lunghezza l , si determina l'efficacia dello schermo finito.

1.8.2.2 Metodo approssimato

In riferimento alla fig. 9.1.8, si abbia una strada distante d dal punto ricevente R e vista sotto un angolo di 180° ($\alpha + \beta + \phi$) da questo e sia L il livello di rumore percepito ed l la lunghezza dello schermo da installare.

Il piano si può suddividere in tre parti:
sotto l'angolo α e β , si ha la propagazione dell'energia sonora senza diffrazione dello schermo:

$$L(\alpha+\beta) = L + 10 \log (\alpha + \beta / 180)$$

sotto l'angolo ϕ , la diffrazione sullo schermo la si può assimilare a quella ottenuta da una sorgente lineare infinita su uno schermo di lunghezza infinita:

$$L(\phi) = L + 10 \log (\phi / 180) - \Delta L$$

Il livello risultante in R sarà dato dalla somma (logaritmica) dei livelli ora determinati

$$L(R) = L(\alpha+\beta) + L(\phi)$$

1.8.2.3 Metodo esatto

La linea sorgente va scomposta in sorgenti puntiformi, per ciascuna coppia sorgente - ricevitore si deve calcolare l'attenuazione fornita dallo schermo e quindi farne la somma nel punto ricevente (rif. guide du bruit des transports terrestres - cetur).

1.8.3 Abaco dell' EMPA (Svizzera)

In riferimento alla figura 9.3.1 si procede come segue:

- determinare i collegamenti visivi Sorgente - Ricevitore (Q-E)
- stabilire le posizioni di sorgente e ricevitore rispetto l'ostacolo (A e B) e ricavare il fattore X dalla curva 1
- in base all'effetto ΔL voluto ed il fattore X ricavare dalla curva 2 il valore h_{eff} necessario alla barriera
- determinare dalla curva 3, entrando con DL, il fattore K per ricavare la lunghezza della barriera con la $W = B \cdot K$

Si nota che:

- Più è grande X (cioè tanto più vicina è la sorgente alla barriera) tanto più efficace è l'effetto schermante della barriera.
- La lunghezza effettiva della barriera W aumenta con l'aumentare della distanza ostacolo - ricevitore B e naturalmente con il ΔL richiesto

1.8.4 Abaco Ente Strade RFT

Si fa riferimento alla figura 9.4.12

- si defisce il ΔL_e che si vuole realizzare con la barriera
- nota la distanza $e =$ (sorgente - ricevitore), dal diagramma di fig. 9.4.12 si determina la h_{eff} dello schermo
- si calcola la altezza minima h_m dello schermo partendo dai seguenti dati geometrici:
H = differenza di quota fra sorgente e altezza massima da proteggere, Q = larghezza strada, b = distanza della barriera dal ciglio stradale

$$h_m = H (Q / 2 + b) / e \quad [m]$$

- L'altezza totale necessaria dello schermo sarà quindi:

$$h = h_m + h_{eff}$$

- Dal grafico di fig. 9.4.13 la lunghezza minima di schermo da applicare ad ambedue i lati rispetto la congiungente Sorgente - Ricevente si ottiene entrando con ΔL_e ed e quindi leggendo in ordinate la semilunghezza minima d_{min} .

1.8.4.1 Esempio

Strada a due corsie di $Q = 10$ m, barriera posta a $b = 2$ m dal ciglio stradale, quota 54 m s.l.m.; casa da proteggere di due piani posta al Km 35.200 di detta strada ad una distanza dall'asse carreggiata di $e = 30$ m, con altezza massima da proteggere di 5,6 m dalla base e posta a 52 m s.l.m.

Si vuole ridurre il livello di rumore dagli attuali 77 dB(A) ai 65 dB(A) previsti per norma.

$$H = 54 - 52 + 5,6 = 7,6 \text{ m}; \quad h_m = 7,6 (10 / 2 + 2) / 30 = 1,77 \text{ m}; \quad DL_e = 77 - 65 = 12 \text{ dB(A)}$$

Dalla fig. 9.4.12 con $DL_e = 12$ dB(A) ed $e = 30$ si ottiene $h_{eff} = 2,2$ m

L'altezza totale dello schermo (riferita al piano stradale) sarà $h = h_m + h_{eff} = 3,97$ m

Dalla figura 9.4.13 sempre con $DL_m = 12$ dB(A) ed $e = 30$ si trova $d_{min} = 125$ m

Quindi la barriera di lunghezza complessiva di 250 m andrà posizionata dal Km 35.075 al Km 35.325 della strada in questione.

[ABACHI CITATI IN 1.8 NON ANCORA DISPONIBILI GRAPH_03]

Si veda Romani - Ventura citato in bibliografia

1.9 CENNI SUI METODI DI PROVA E COLLAUDO ACUSTICO DELLE BARRIERE

In Italia da un punto di vista procedurale ancora non sono univocamente definite delle modalità di determinazione dell'efficacia di un sistema schermante, quindi la certificazione acustica delle barriere, sebbene rivesta una importanza fondamentale sia per il committente che per il fornitore dell'opera nella esplicitazione e nel soddisfacimento dei requisiti di fornitura di un sistema, è un capitolo ancora aperto.

L'UNI, attraverso il gruppo di lavoro "sistemi schermanti" ed il confronto con analoghi lavori in ambito ISO, sta procedendo alla definizione delle procedure che riguardano le prove di certificazione acustica in laboratorio (fonoassorbimento e fonoisolamento) degli elementi costituenti la barriera, le prove in campo aperto di campioni di barriera, le misure di collaudo in opera per accertare l'effettiva attenuazione acustica della barriera.

1.9.1 Misure in laboratorio su elementi di barriera

Sono volte a determinare i valori di fonoassorbimento e fonoisolamento dei materiali impiegati; ciò si attua in base alle modalità descritte dalle ISO 140/3/4 - 1978, ISO 717/1 - 1982, ISO R354 - 1985 (come già affrontato nella PARTE II) con la considerazione che le condizioni di prova messe a punto dalla ISO riguardano pareti interne agli edifici che quindi mal si adattano alle condizioni di uno schermo esterno (infatti per questi risultano assenti le trasmissioni laterali per via solida attraverso l'incastro ai bordi, il campo acustico in cui si viene a trovare la barriera non è di tipo diffuso con raggi sonori uniformemente distribuiti).

1.9.2 Misure in campo aperto

I metodi sono due l'*Insertion Loss*, che consiste nel misurare la differenza di livello continuo equivalente rilevato in un punto P con e senza la barriera, ed il *Metodo Impulsivo*, come proposto dall'AFNOR (S31-089 modificata), che impiega un segnale acustico transitorio e per la valutazione dei risultati delle tecniche di trattamento del segnale del tipo FFT (fast fourier transform).

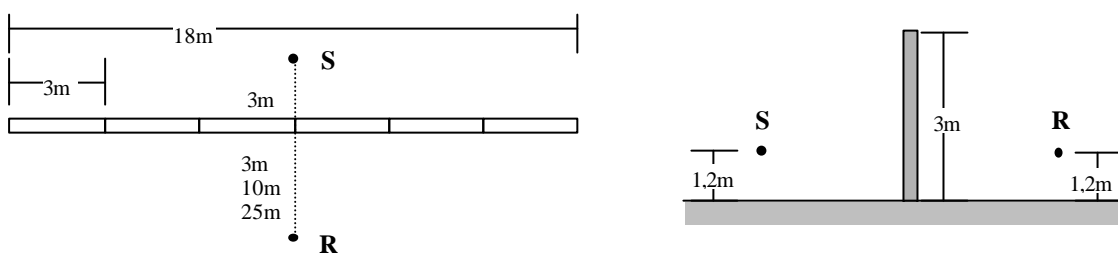
1.9.2.1 Insertion Loss

Si deve predisporre una sorgente (S) di rumore bianco ad una distanza di 3m ed altezza 1,2 m dallo schermo antirumore ed il microfono (R) sarà posizionato a distanze di 3, 10, 25 m d altezza di 1,2 m dallo stesso schermo.

La superficie su cui è posta la barriera è piana riflettente o con prato di altezza inferiore a 5 cm, non vi sono ostacoli acustici nel raggio di almeno 50 m dalla barriera ed il vento è < 4 m/s.

La barriera è composta di pannelli della lunghezza di 3m realizzando una dimensione complessiva di 18 m di lunghezza e 3 m di altezza; i pannelli di base andranno posti su sabbia o terreno vegetale livellato onde garantire un'adeguata tenuta acustica.

La congiungente S-R passa per il punto di mezzo della barriera in corrispondenza del montante verticale centrale di sostegno.



Le misure vengono eseguite in presenza ed in assenza della barriera determinando il valore differenza espresso in dBA e tenendo conto delle reali condizioni della risposta acustica ambientale.

La determinazione dei valori di attenuazione è da considerarsi accettabile se i livelli rilevati sono di almeno 10 dB superiori al rumore di fondo ivi presente.

1.9.2.2 Metodo Impulsivo

Ha il vantaggio di impiegare un campione di barriera di dimensioni ridotte (3 x 4 m) ed attraverso una opportuna disposizione di due microfoni e l'impiego di un analizzatore FFT a due canali con memoria ed un generatore di rumore impulsivo della durata di 1 ms vengono determinate le proprietà acustiche dei pannelli impiegati (fonoisolamento, fonoassorbimento).

1.9.3 Misure di collaudo in opera

Esiste una norma ANSI S 12.8 del 1987 che identifica tre metodologie per la caratterizzazione delle barriere acustiche; il parametro individuato è la perdita per inserzione **IL** determinato da rilievi eseguiti in assenza ed in presenza della barriera.

Il metodo consigliato è quello "diretto" ove si misura, in funzione di una sorgente di rumore, il livello sonoro in due posizioni: **R**, relativa ad una postazione non influenzata dalla presenza della barriera e **P**, in corrispondenza del sito ricevitore disturbato.

Il valore di **IL** è determinato da:

$$\mathbf{IL} = (\mathbf{L}_{ar} - \mathbf{L}_{ap}) - (\mathbf{L}_{br} - \mathbf{L}_{bp}) \text{ dB(A)}$$

dove \mathbf{L}_{ar} e \mathbf{L}_{br} sono i livelli sonori relativi alla posizione **R** rispettivamente in presenza e in assenza della barriera

dove \mathbf{L}_{ap} e \mathbf{L}_{bp} sono i livelli sonori relativi alla posizione **P** rispettivamente in presenza e in assenza della barriera

Qualora non sia determinabile il livello sonoro in assenza della barriera, la norma, attraverso le altre metodologie proposte, indica come procedere in modo indiretto.