

Raffaele PISANI
Studio di Ingegneria Acustica Rivoli (TO)

La progettazione e la determinazione della resa acustica delle barriere

1. Generalità sul dimensionamento delle barriere acustiche

Un metodo di riduzione del rumore di traffico stradale in prossimità di centri abitati è quello di frapporre tra la fonte del rumore (*veicoli*) ed i ricettori (*abitazioni*) un efficace ostacolo alla propagazione del suono. Tale ostacolo è costituito da una barriera acustica, sufficientemente alta e lunga, con idonee caratteristiche fonoisolanti.

L'energia sonora emessa dai veicoli in movimento su una strada si propaga sotto forma di onde cilindriche che hanno per asse quello della strada stessa. La barriera, eretta sul ciglio della strada, in virtù del suo **potere fonoisolante**, costituisce un ostacolo alla propagazione dell'energia sonora verso il ricettore riflettendo indietro buona parte dell'energia (**Fig. 1**).

Altra parte dell'energia sonora, invece, **scavalca** la barriera (*energia diffratta*) oppure la **attraversa** se l'isolamento del manufatto non è adeguato (*energia diretta*).

L'aliquota di energia sonora che scavalca la barriera, o che passa ai suoi lati se è di lunghezza non adeguata, è calcolabile ed è legata alle dimensioni fisiche della barriera (altezza rispetto al piano stradale, distanza dalla sorgente,

distanza dal punto di ricezione, altezza del punto di ricezione rispetto al piano stradale, spessore della barriera) mentre è indipendente dalle caratteristiche acustiche di isolamento.

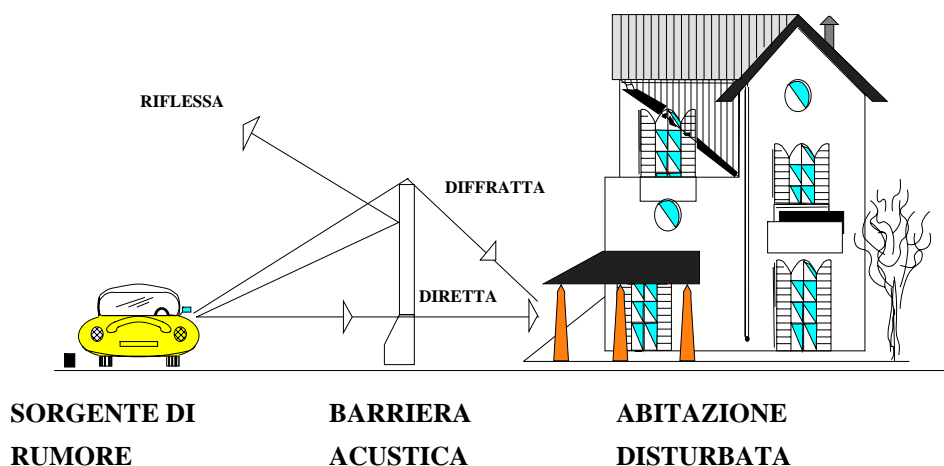


Fig. 1 - *Abbattimento del rumore mediante barriera acustica*

L'aliquota di energia sonora che attraversa la barriera acustica è anch'essa calcolabile se sono note le caratteristiche di isolamento acustico dei pannelli. La quantità di energia sonora che viene **riflessa** indietro verso la sorgente viene tenuta in considerazione solo nel caso in cui vi siano delle abitazioni anche dall'altro lato della strada. Le conseguenze di questo fenomeno possono essere ovviate **inclinando la barriera** di modo che il rumore venga riflesso verso l'alto. Un secondo metodo utilizzabile per ridurre l'aliquota di **energia riflessa** consiste nel rendere **fonoassorbente** la faccia del pannello rivolta verso la sorgente (quella faccia sulla quale incide l'onda sonora).

Quanto detto ha validità in condizioni meteorologiche standard: in assenza di vento ed assenza di gradienti termici con l'altezza. Occorre che non si verifichino fenomeni di **rifrazione** dell'onda sonora in atmosfera che tenderebbero a piegare verso il basso l'onda sonora che normalmente si propaga verso l'alto.

La progettazione acustica delle barriere deve essere effettuata, in primo luogo, con il calcolo seguendo precise norme tecniche. Purtroppo a tutt'oggi

in Italia non esiste una *Norma Tecnica Ufficiale* di Progettazione e Verifica delle barriere acustiche per cui il progettista deve ricorrere a metodi scientifici dimostrando i passi che hanno determinato una scelta piuttosto che un'altra. Il progetto di acustica, infatti, deve portare alla definizione della altezza, lunghezza e posizione della barriera, al calcolo dell'abbattimento di rumore previsto sia nella condizione più favorevole sia in quella meno favorevole; alla definizione del tipo di manufatto da adottare, comprese le caratteristiche acustiche, nonché alla definizione di un metodo di collaudo per la verifica della rispondenza dell'opera alle specifiche imposte e per la verifica acustica del risultato atteso.

In linea di principio un progetto definisce il tipo di intervento e si sviluppa nelle seguenti fasi:

- a) *calcolo degli abbattimenti necessari*
- b) *individuazione dell'opera e posizionamento della barriera, calcolo dell'altezza, lunghezza, ecc.*
- c) *calcolo degli abbattimenti previsti nei punti più favorevoli ed in quelli meno favorevoli*
- d) *revisione delle dimensioni delle barriere per ottimizzarne la resa ed il costo (rapporto costi/benefici)*

Si passa poi alla definizione dell'opera in rapporto al contesto ambientale in cui deve essere inserito con la descrizione:

- a) *della tipologia del manufatto*
- b) *del potere fonoisolante minimo*
- c) *dell'eventuale coefficiente di assorbimento acustico minimo*

In ultimo occorre stabilire i criteri che dovranno essere seguiti per verificare:

- a) *la corrispondenza dell'opera alle specifiche imposte*
- b) *il conseguimento dei risultati attesi.*

2. *Quantificazione della resa acustica delle barriere*

L'abbattimento del rumore introdotto da una barriera acustica deve essere verificato in ciascun punto del territorio ed è espresso in termini di **perdita di inserzione** cioè dalla differenza dei livelli equivalenti L_{eq} misurati prima e dopo la installazione della barriera, previa normalizzazione dei

risultati ottenuti per tenere conto del diverso volume di traffico che può sussistere tra una misura e l'altra.

Si sottolinea che la perdita di inserzione non è tanto legata alla "qualità" del manufatto quanto alla "bontà" del progetto di acustica. Spesso, per poter conseguire abbattimenti elevati ai piani più alti degli edifici posti in prossimità della strada, il calcolo suggerisce la realizzazione di barriere molto alte. In molti casi queste non possono essere realizzate se non con imponenti opere di sostegno, per cui dovrà essere studiata una soluzione diversa (strutture particolari a tunnel ecc.) ovvero potrà essere accettato un minore abbattimento del rumore.

2.1 Sorgente puntiforme

L'effetto schermante delle barriere acustiche **Fig. 2** viene normalmente quantificato con la *relazione di Kurze ed Anderson* secondo l'espressione:

$$\Delta L = 5 + 20 \cdot \text{Log} \frac{\sqrt{2\pi N}}{\tanh \sqrt{2\pi N}} \quad [\text{dB}] \quad [1]$$

dove:

ΔL è la perdita di inserzione

$N = \frac{2\delta f}{c}$ è il numero di Fresnel

$\delta = A + B - r$ è la differenza di percorso indicata in figura

f è la frequenza

c è la velocità di propagazione del suono; nell'aria essa è pari a 343 m/s a 20 °C

L'espressione [1] si riferisce al calcolo della sola energia sonora che viene diffratta dal bordo superiore di una barriera (energia che *scavalca* la barriera) nel caso di una sorgente puntiforme, ma non consente il calcolo della energia sonora che *attraversa* la barriera poichè essa viene considerata completamente fonoisolante.

Nelle situazioni più comuni in pratica si calcolano riduzioni del rumore comprese tra 5 dB(A) e 20 dB(A). Non è necessario, quindi, che le barriere presentino un elevato indice di isolamento acustico in quanto buona parte

dell'energia sonora viene comunque diffratta dal bordo superiore, secondo la legge fisica citata, vanificando l'attenuazione propria introdotta dal manufatto.

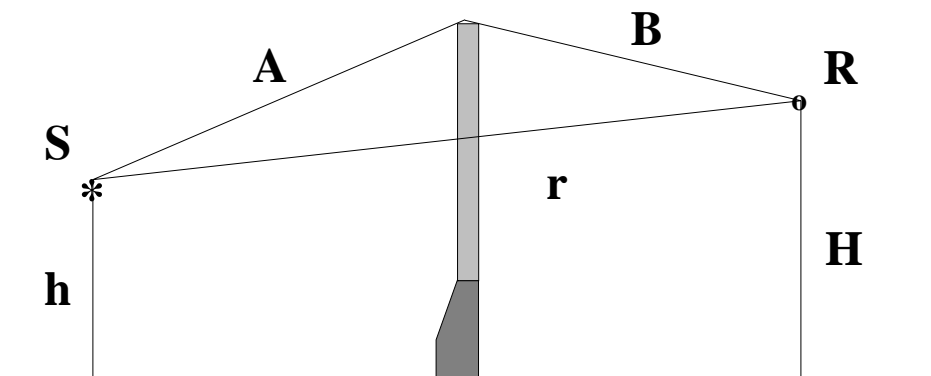


Fig. 2 - *Calcolo degli abbattimenti di rumore mediante barriera acustica (S è la posizione della sorgente puntiforme, R è la posizione del ricevitore).*

2.2 Sorgente lineare

L'espressione [1] è valida per una sorgente poco estesa rispetto alle dimensioni della barriera. Nel caso di una infrastruttura lineare di trasporto la sorgente risulta più lunga della estensione della barriera per cui è necessario implementare un modello di calcolo che tenga conto di questa particolarità.

Sempre con riferimento all'espressione [1] si osserva poi che la perdita di inserzione è funzione della frequenza f per cui i calcoli dell'attenuazione non possono prescindere dallo spettro del rumore.

Infine per la valutazione dei benefici occorre determinare il livello sonoro a fronte dei diversi ricettori applicando il valore di ΔL o allo spettro equivalente del rumore rilevato in R prima dell'intervento ovvero allo spettro del livello sonoro previsto in R se lo studio riguarda un calcolo di previsione nell'ambito della progettazione di una nuova infrastruttura di trasporto. Comunque sia l'estensione della sorgente nei confronti dell'estensione della barriera (solitamente più corta) impone un metodo di calcolo

dell'attenuazione per tenere conto non solo della diffrazione del bordo superiore della barriera ma anche dei contributi laterali apportati in R dai segmenti lineari non coperti dalla barriera stessa.

Nella **Fig. 3** si riporta, in pianta, una situazione tipica dove la barriera acustica copre in parte l'infrastruttura di trasporto da mitigare: in R perverranno i contributi del segmento S1 libero, del segmento S2 coperto dalla barriera e del segmento S3 anch'esso libero. Con il calcolo occorre prevedere i tre contributi in R per ottimizzare la lunghezza della barriera.

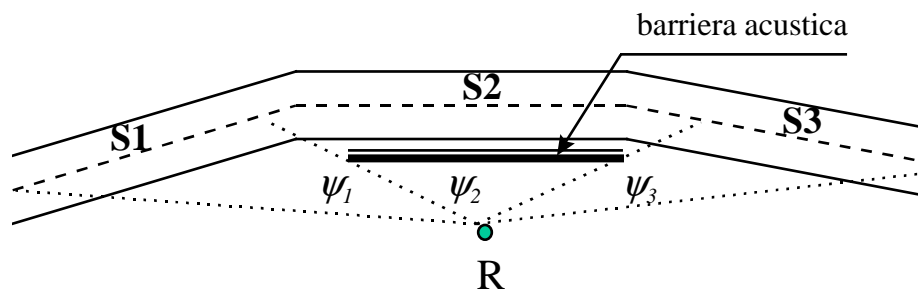


Fig. 3 - *Rappresentazione dei contributi in R dei tre segmenti con i quali è stata suddivisa la sorgente lineare.*

L'approccio modellistico per il calcolo dell'energia sonora in R senza barriera e con barriera fa riferimento alla geometria della **Fig.4**: l'infrastruttura lineare viene suddivisa in segmenti S1-S2, S2-S3,..Si-Sk ciascuno dei quali è visto dal punto di ricezione R secondo gli angoli $\alpha_{12}, \alpha_{23} \dots \alpha_{ik}$. ed ognuno di essi contribuisce alla rumorosità complessiva in R con gli andamenti temporali di una singola sorgente in movimento evidenziati nella stessa figura.

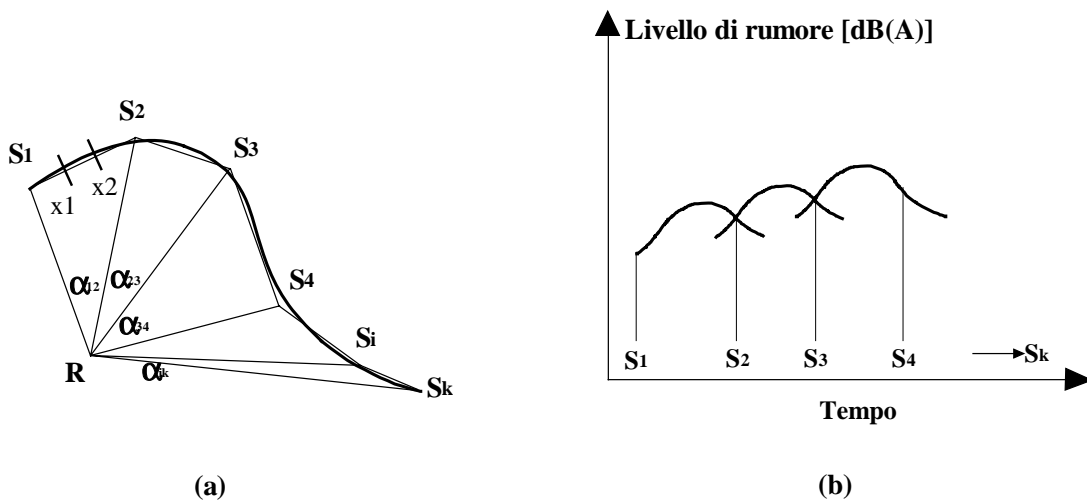


Fig.4 - *Approssimazione di una tratta di strada con segmenti rettilinei*

a) *segmenti considerati*

b) *andamenti temporali di una sorgente che si muove sulla retta sulla quale giace ciascun segmento.*

Nella maggior parte dei programmi di calcolo commerciali ogni segmento viene suddiviso ulteriormente in un elevato numero di segmenti elementari di uguale lunghezza e per ciascuno di essi si calcola la densità di energia sonora nel punto ricevitore R nota la potenza sonora irradiata per unità di lunghezza di sorgente W . La densità di energia sonora in R emessa dal segmento "i" lungo x_2-x_1 è data da:

$$E = \int_{x_1}^{x_2} \frac{W}{2\pi r^2} dx = \frac{W}{2\pi dc} \psi_i = \frac{W}{2\pi c} \cdot \frac{\psi_i}{d} \quad \text{ws} / \text{m}^3 \quad [2]$$

dove Wdx è la potenza sonora emessa dall'elemento dx di sorgente. Il livello di pressione sonora nel punto ricevitore si ricava dall'espressione seguente che richiede la conoscenza del livello di potenza sonora per metro di sorgente

$$L_{pi} = L_w - 8 - 10 \cdot \log d_i + 10 \cdot \log \psi_i \quad \text{dB} \quad [3]$$

Il contributo di tutte le energie sonore emesse dai segmenti in cui è divisa l'intera tratta fornisce il livello globale nel punto considerato. A ciascun segmento elementare di lunghezza molto minore della lunghezza della barriera, se facente parte del segmento S2 della Fig.2, si applica l'espressione [1].

Il livello di potenza sonora per metro di lunghezza di sorgente è un dato non disponibile se non ricavato attraverso idonee misure. Il problema è di facile soluzione se il progetto riguarda una infrastruttura di trasporto esistente. In questo caso si misura lo spettro del livello di pressione sonora equivalente (su un periodo sufficientemente lungo conteggiando anche il volume del traffico) in un determinato punto alla distanza d dalla sorgente. Ipotizzando che la potenza sonora emessa da un segmento di sorgente sia uguale a quella emessa dai segmenti contigui di pari lunghezza, il contributo in R di ciascun elemento sarà attenuato unicamente dalla propria distanza da R.

E' conveniente, per economia di calcolo, ricavare la potenza sonora pesata secondo la curva fonometrica "A"; in questo modo si risparmia nel modello il tempo di pesatura di ciascuno spettro ricavato per ciascun segmento di sorgente. Con riferimento alla **Fig. 5** è conveniente riferire la misura del livello di pressione sonora in R ad una geometria di quella rappresentata con asse di simmetria perpendicolare al tracciato stradale

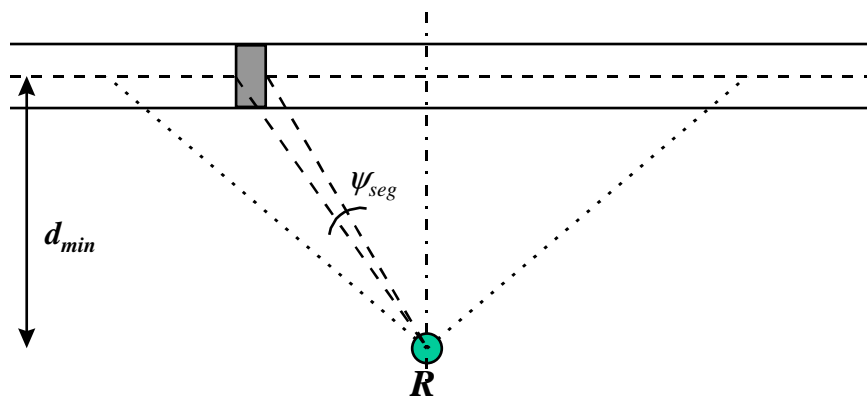


Fig. 5 - *Schema geometrico per il calcolo della potenza sonora apparente per unità di lunghezza di una sorgente lineare*

La potenza sonora per ogni metro di sorgente può essere calcolata con la seguente relazione:

$$L_W = L_p + 8 - 10 \cdot \log \sum_{segm.1}^{segm.N} 10^{\frac{Livello_{segm}}{10}} \quad \text{dB(A)} \quad [4]$$

dove

L_W è il livello di potenza sonora per metro di sorgente (pesato "A")
 L_p è il livello di pressione misurato in un punto distante d dalla strada (pesato "A")

$$Livello_{segm.} = 10 \cdot \log \psi_{segm.} - 10 \cdot \log(dist. \min. segm.) \quad \text{dB (A)}$$

dove $dist. \min. segm.$ è la distanza minima di R dalla retta su cui giace il segmento.

Lo spettro di potenza sonora equivalente viene ricavato in ciascun punto di misura applicando la relazione [4] allo spettro di pressione sonora misurato. Poiché il calcolo viene effettuato partendo dal livello di pressione sonora misurato alla distanza d la potenza ricavata non sarà quella effettivamente irradiata dalla sorgente per cui verrà denominata *potenza apparente* in quanto tiene conto delle attenuazioni dovute all'assorbimento dell'atmosfera, al tipo di terreno, alla pendenza della strada, all'altezza del ricevitore rispetto al piano strada, etc.

Il livello di potenza sonora apparente per metro di strada consente di ricostruire il livello nel punto di ricezione attraverso la relazione [3]. Nel modello di calcolo si applica la relazione [1] al livello di pressione per banda ricostruito in R dalla somma dei contributi energetici dei segmenti elementari mascherati dalla barriera acustica. Se il livello di pressione è un livello equivalente su base oraria, anche il livello di potenza sarà un livello equivalente di potenza su base oraria, per cui fornirà il livello equivalente di pressione in un punto R anch'esso su base oraria.

Si osserva, infine, che uno spettro di potenza apparente misurato ad una determinata distanza dalla strada può essere utilizzato per calcolare il livello di pressione sonora in altri punti dello stesso territorio che possono anche discostarsi del 50% dalla distanza in cui esso è stato rilevato. L'espressione per il calcolo del livello di rumore di una infrastruttura lineare di trasporto con la presenza di una barriera acustica solo per una determinata lunghezza si ottiene attraverso la somma energetica dei singoli contributi, dei segmenti i non coperti da barriera e dei segmenti k coperti dalla barriera. Per questi ultimi il livello è fornito dalla relazione seguente:

$$L_{pk} = L_W - 8 - 10 \cdot \log d_k + 10 \cdot \log \psi_k - \Delta L_k \quad \text{dB(A)}$$

dove con k si indicano tutti i segmenti nei quali è stata divisa la sorgente.

ΔL_k è l'attenuazione del livello generato dal k elemento coperto dalla barriera.

Con la suddivisione in segmenti della sorgente lineare si può calcolare, separatamente, anche i contributi nel punto di ricezione del tratto coperto da barriera e del tratto scoperto. In questo modo è possibile dimensionare correttamente la lunghezza della barriera per ottimizzare il risultato con la minor lunghezza possibile.

3. *Requisiti acustici delle barriere*

Le caratteristiche acustiche dei manufatti, intese come valori del potere fonoisolante e del coefficiente di assorbimento, entrambe in funzione della frequenza, devono essere documentate da appositi certificati. I parametri più importanti che classificano il prodotto e lo rendono accettabile sono misurati nei laboratori sperimentali di acustica. La verifica di una corretta esecuzione dei lavori che garantisca il mantenimento dei risultati attesi dal progetto deve essere effettuata con misure in opera.

3.1 Prove di laboratorio

Le proprietà fonoisolanti e fonoassorbenti di una barriera acustica possono essere certificate mediante prove di laboratorio. Queste proprietà sono intrinseche alle barriere e non dipendono dal luogo in cui vengono installate.

3.1.1 Determinazione delle proprietà fonoisolanti

La principale proprietà dei pannelli che costituiranno la barriera acustica è l'*isolamento acustico* che, per misure normalizzate di laboratorio (Norma ISO 140 III), è espresso dal **potere fonoisolante** cioè dalla perdita di inserzione corretta per tenere conto delle caratteristiche acustiche delle camere di misura. Il potere fonoisolante è indicato con R e si esprime in dB per ciascuna banda di frequenze.

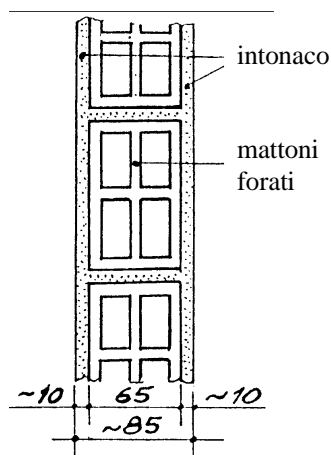
Nella prova di laboratorio la barriera, comprensiva del proprio montante, viene installata e sigillata tra due camere riverberanti contigue di cui la barriera costituisce la parete divisoria. In una camera (*trasmissione*) viene generato il rumore, nell'altra camera (*ricezione*) viene misurato il rumore che attraversa la barriera. La differenza dei livelli, corretta per tenere conto delle unità fonoassorbenti del locale di ricezione e della superficie del pannello in prova, fornisce il valore del potere fonoisolante in funzione della frequenza. Si noti che la barriera viene sigillata su tutti e quattro i lati di modo che il rumore che raggiunge la camera di ricezione attraversa unicamente la barriera. Si può calcolare un **Indice di valutazione** delle proprietà fonoisolanti della barriera mediante un calcolo normalizzato come proposto dalla Norma ISO 717/1. Si ottiene, così, un valore unico che esprime l'isolamento globale del manufatto; questo valore può essere utilizzato solo come valore di confronto tra prodotti diversi.

Ai fini della progettazione è da precisare che il potere fonoisolante viene misurato in laboratorio per una incidenza del suono diffusa (proveniente cioè da tutte le direzioni) e non per una incidenza obliqua definita da un solo angolo. In pratica, invece, la barriera acustica posta all'aperto è investita da un'onda sonora piana con un angolo di incidenza ben preciso.

Nella **Fig. 6** si riporta la sezione di una barriera acustica in metallo con interposta lana minerale. Le caratteristiche di isolamento acustico vengono

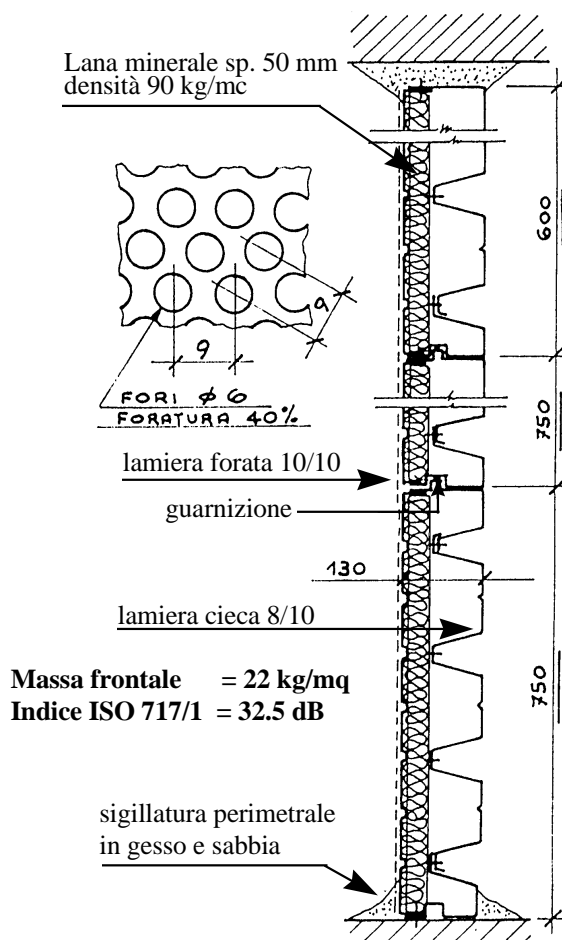
confrontate con quelle di un muro tradizionale in mattoni forati ed intonacato.

Muro in mattoni forati



Massa frontale = 100 kg/mq
Indice ISO 717/1 = 40.5 dB

Barriera acustica in acciaio



Massa frontale = 22 kg/mq
Indice ISO 717/1 = 32.5 dB

Fig. 6 . Barriera acustica e muro in mattoni forati di confronto

La barriera acustica dell'esempio è realizzata accoppiando tra loro una lamiera di acciaio grecata dallo spessore di 8/10 con una lamiera piana in acciaio forata dallo spessore di 10/10. Il materassino di lana minerale interposto tra le due lamiere unitamente alla lamiera forata costituisce l'elemento fonoassorbente del manufatto. L'elevata densità del materassino e la massa della lamiera cieca forniscono le proprietà fonoisolanti del pannello.

L'indice di valutazione secondo la ISO 717/1 è più elevato per il muro rispetto a quello della barriera: 40,5 dB per il primo contro 32,5 dB per il secondo.

Nella Fig. 7 si confrontano tra loro i valori del potere fonoisolante ricavati in laboratorio. Il grafico mette in evidenza valori più elevati del potere fonoisolante del muro in mattoni di confronto rispetto a quelli misurati per la barriera in lamiera d'acciaio in tutta la gamma delle frequenze medio basse (fino a 1000 Hz). Per le bande di frequenza superiori a 1000 Hz i valori del potere fonoisolante dei due manufatti si equivalgono.

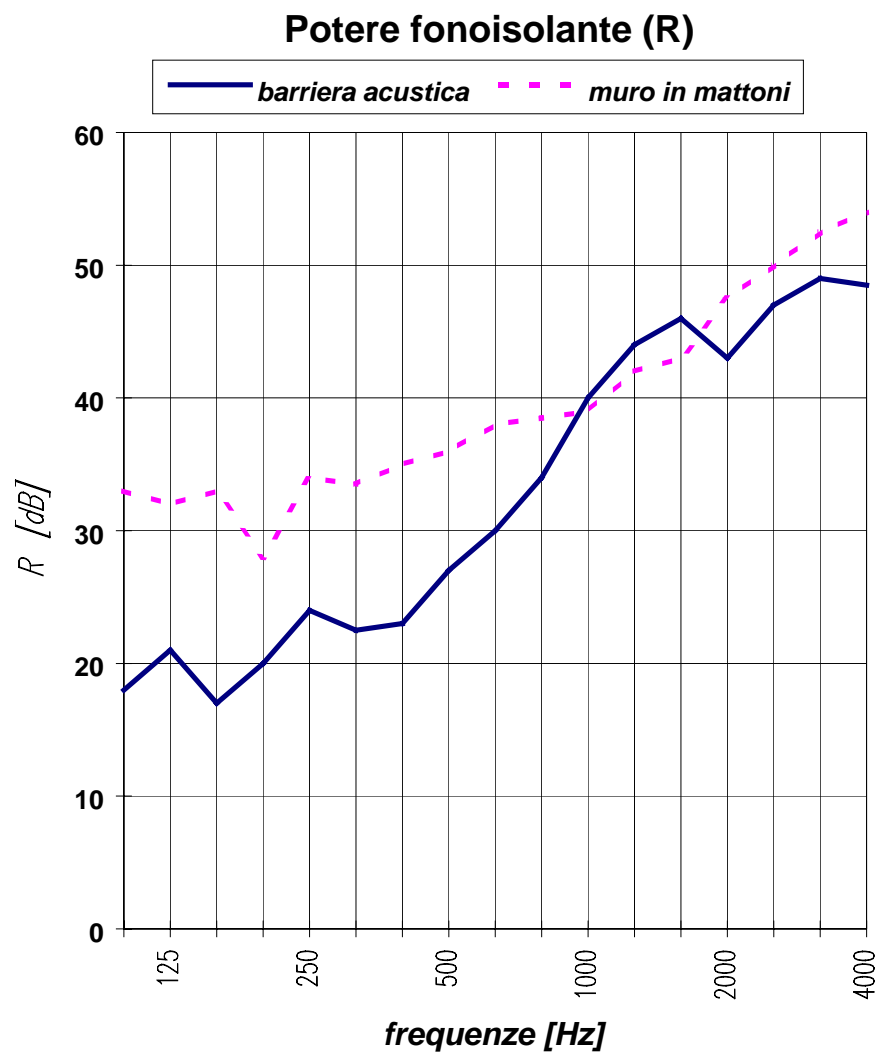


Fig. 7 . Confronto tra il potere fonoisolante della barriera acustica e quello del muro in mattoni forati.

3.1.2 Determinazione delle proprietà fonoassorbenti

Per quanto riguarda la capacità di assorbire il suono che può presentare una faccia della barriera, essa è espressa dal **Coefficiente di assorbimento acustico α in campo diffuso** anch'esso funzione della frequenza e misurato in laboratorio secondo la Norma ISO 354. La misura viene effettuata in una camera riverberante adagiando sul pavimento i pannelli che costituiscono la barriera con il lato fonoassorbente rivolto verso l'alto. Le proprietà di assorbimento del suono, in funzione della frequenza, si deducono dalle misure dei tempi di riverberazione della camera con e senza i pannelli da utilizzarsi per realizzare la barriera.

Il coefficiente di assorbimento misurato nella camera riverberante (*campo diffuso*) è utilizzato nei calcoli di acustica che riguardano la progettazione negli ambienti chiusi, nei quali il suono giunge sul pannello provenendo da molteplici direzioni. Poiché il rumore da traffico stradale incide sui pannelli delle barriere con un angolo limitato è necessario conoscere i valori del coefficiente di assorbimento acustico non solo in funzione della frequenza ma anche in funzione dell'angolo di incidenza.

In opera la barriera viene installata con il lato fonoassorbente rivolto verso la sorgente di rumore per ridurre principalmente l'aliquota di energia sonora respinta indietro verso la sorgente stessa. Il calcolo dell'energia sonora riflessa dalla barriera consente di valutare l'incremento di rumore prodotto sul lato rivolto verso la strada. Per una riflessione totale del rumore (muro di cemento con assorbimento nullo) l'incremento del livello di rumore viene calcolato considerando le sorgenti immagini (raddoppio del numero delle sorgenti) e corrisponderà perciò ad un valore massimo di 3 dB (caso della sorgente di rumore rasente il muro).

Se la superficie della barriera è fonoassorbente, l'aliquota di energia sonora che viene riflessa sarà, al massimo, inferiore di 3 dB di quella diretta e dipenderà dal coefficiente di assorbimento in ciascuna banda di frequenza e per un determinato angolo di incidenza, nonché dall'altezza della barriera e dalla sua distanza dalla sorgente. Se la riflessione del rumore interessa le abitazioni poste sull'altro lato della strada e se esse sono vicine alla sede stradale, allora occorrerà inserire delle ulteriori barriere acustiche per intercettare l'onda diretta, che è comunque la maggiore responsabile del disturbo anche da questo lato della strada. In questo caso la strada risulterà chiusa da due barriere laterali, e si verranno a produrre delle riflessioni di

rumore tra una barriera e l'altra. Queste riflessioni producono una diminuzione della resa delle barriere in quanto sui loro bordi incidono onde con angoli diversi riducendo la zona d'ombra. Per ridurre l'inconveniente delle riflessioni multiple è opportuno allora utilizzare barriere con la faccia interna fonoassorbente.

Nella **Fig. 8** si riporta, a titolo di esempio, l'andamento del coefficiente di assorbimento della barriera metallica di Fig. 6 misurato in laboratorio secondo la norma citata. Valori prossimi all'unità indicano un assorbimento quasi totale del suono a quelle determinate frequenze; valori molto bassi (ad esempio inferiori a 0,1) indicano una riflessione quasi totale del suono verso la sorgente. Per questo motivo il coefficiente di assorbimento di un muro intonacato è quasi nullo come possiamo osservare battendo le mani in un ambiente chiuso con pareti nude ed intonacate (riverberazione molto lunga del colpo di mani).

Per la barriera in esempio la caratteristica di assorbimento del suono è ottenuta accoppiando il materassino fonoassorbente ad una lamiera forata. L'esaltazione dell'assorbimento alle basse frequenze è dovuta alla profondità dell'intercapedine tra materassino in lana minerale e lamiera grecata retrostante che è cieca. Gli elementi da dimensionare correttamente per migliorare l'assorbimento verso le basse frequenze, quindi, sono: il diametro dei fori, la trama di foratura, lo spessore e la densità del materassino fonoassorbente, la profondità dell'intercapedine retrostante. Nella stessa figura, per evidenziare meglio il ruolo dei parametri elencati, si riportano i valori del coefficiente di assorbimento di un materassino in lana minerale direttamente disteso sul pavimento della camera riverberante.

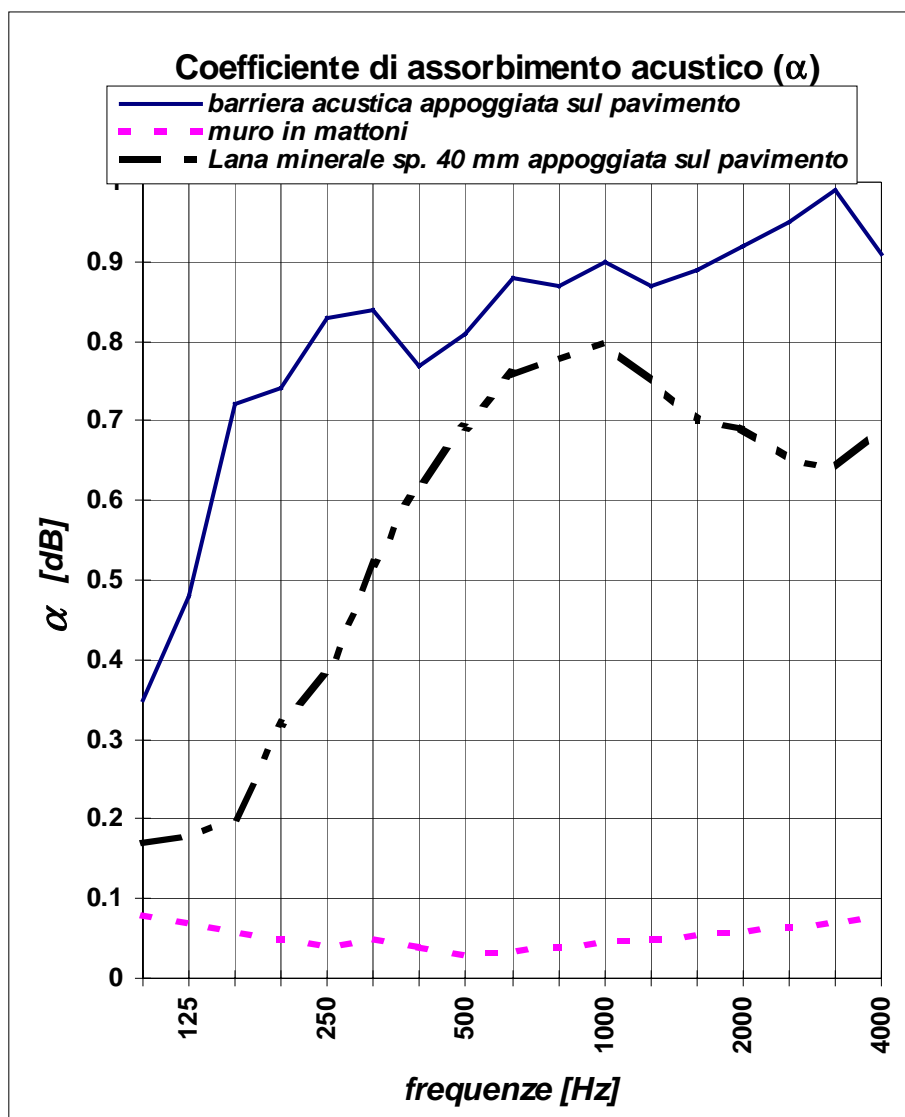


Fig. 8 - Coefficiente di assorbimento di una barriera metallica con una faccia realizzata con lamiera forata con fori diametro 6mm trama di foratura 40%. Il coefficiente di assorbimento è confrontato con quello di un materassino in lana di vetro spessore 40 mm appoggiato sul pavimento con densità di 16 kg/mc.

3.2 Prove in opera

La necessità delle prove in opera è evidente nelle situazioni in cui è previsto il collaudo della realizzazione. La misura del rumore **dopo** la realizzazione dell'opera ed il confronto con il rumore misurato **prima** della posa delle barriere, a parità di condizioni e flusso di traffico, fornisce il valore

della perdita di inserzione che in molti casi dipende più dal progetto che dalla barriera stessa. Da una prova di questo tipo possono emergere due risultati:

- a) L'abbattimento del rumore è superiore o uguale a quello previsto, ed allora sia il progetto, sia le barriere sono adeguate.
- b) L'abbattimento del rumore è inferiore a quello atteso, ed allora può risultare inadeguato il progetto, o la barriera oppure entrambi.

Per verificare se è inadeguato il manufatto di cui è realizzata la barriera acustica si può misurare in opera la perdita di inserzione utilizzando come sorgente di rumore o un altoparlante o lo stesso traffico stradale ovvero un rumore impulsivo (colpi di pistola).

Ovviamente le misure devono essere effettuate in assenza di fenomeni atmosferici quali vento, pioggia, gradienti termici ecc. per poter valutare la perdita di inserzione in condizioni standard.

La misura della perdita di inserzione deve essere finalizzata alla determinazione dell'aliquota di energia sonora che attraversa la barriera: questa può essere rilevante se i pannelli, ad esempio, non sono ben sigillati nei loro montanti o se la consistenza del pannello stesso è inadeguata.

Per quanto riguarda la metodologia da seguire per il collaudo del manufatto in opera trova un largo consenso quella che prevede l'uso di un altoparlante che irradia un rumore di caratteristiche note (si usa in pratica un segnale sintetizzato costituito da una sequenza periodica pseudo casuale). La misura della funzione di trasferimento dell'energia sonora attraverso il manufatto (retro - fronte) che determina la perdita di inserzione, risulta con questo metodo facilmente calcolabile anche in presenza del rumore di traffico stradale. Infatti la sequenza contenuta nel segnale irradiato è nota mentre è casuale il rumore del traffico. La funzione di convoluzione tra il segnale ricevuto da un microfono posto dietro la barriera e quello irradiato dall'altoparlante è la risposta all'impulso del sistema barriera. Dalla risposta all'impulso si ricava la funzione di trasferimento (nel dominio della frequenza) e da questa per rapporto con quella ricavata alla stessa distanza dall'altoparlante ma in assenza di barriera si ricava la perdita di inserzione del manufatto.

3.3 Il valore del potere fonoisolante limite

La proprietà di uno schermo acustico di impedire il passaggio attraverso di esso dell'energia sonora è espressa, come detto, dal valore del potere fonoisolante (ricavato in campo diffuso) o dalla perdita di inserzione (ricavato per incidenza perpendicolare). La barriera acustica in pratica presenta un valore finito del potere fonoisolante per cui una aliquota di energia sonora che la attraversa si somma all'energia sonora diffratta dal bordo superiore e dai bordi laterali.

In fase di progetto occorre calcolare, nel punto di ricezione, sia le energie sonore diffratte dai bordi della barriera stessa sia quella che la attraversa.

Può definirsi potere fonoisolante limite il valore del potere fonoisolante che realizza l'incremento di livello sonoro nel punto ricettore di soli 0.1 dB per effetto dell'aliquota di energia che lo attraversa.

Se si indica con ΔL_D l'attenuazione dell'energia sonora dovuta alla diffrazione del bordo della barriera e con ΔL_T l'attenuazione dell'energia sonora che attraversa la barriera, l'attenuazione totale del rumore nel punto ricettore è dato dalla relazione:

$$\Delta L = \Delta L_D - 10 \log \left(1 + 10^{-\Delta L_T - \Delta L_D / 10} \right) \quad \text{dB}$$

La scelta del valore limite di ΔL_T viene operata rendendo pari a 0.1 dB il valore del secondo addendo. L'attenuazione della barriera, in questo modo dipende in larghissima parte dalla diffrazione del bordo. Questa condizione si mantiene se il valore del potere fonoisolante della barriera è superiore a ΔL_T . Si ricorda che la diffrazione è funzione della geometria del sito (distanza sorgente barriera, altezza barriera, distanza ricettore barriera, altezza ricettore etc.) e quindi dipende dai dati del progetto. Barriere che possono andare bene per alcune situazioni non sono, ad esempio, adatte per altre.

Si riporta, di seguito, un caso reale di verifica di una barriera acustica alta 3 m e lunga 200 m posta al bordo di un'autostrada a due corsie di marcia per carreggiata. Il ricettore è distante 42 m dalla barriera ed è alto 4 m.

Si è misurato lo spettro di pressione sonora nel punto ricettore per bande di ottava. Si è calcolato lo spettro di potenza sonora apparente e da questo con le formule sopra descritte si è ricavato lo spettro del rumore a fronte del

ricevitore alto 4 m dal piano di campagna con e senza barriera. I risultati per bande di ottava sono riportati nella seguente tabella:

Frequenze Hz	Senza barriera dB	Con barriera dB	potere fonoisolante minimo dB
63	46.6	41.8	14.0
125	51.3	46.3	14.3
250	58.4	52.9	14.7
500	65.2	58.9	15.5
1000	66.3	59.0	16.6
2000	62.7	54.1	18.2
4000	53.1	42.7	20.4
“A”	70.2	63.2	

Nel grafico che segue si confronta il valore del potere fonoisolante della barriera di Fig. 7 con il valore del potere fonoisolante minimo determinato per la barriera in progetto.

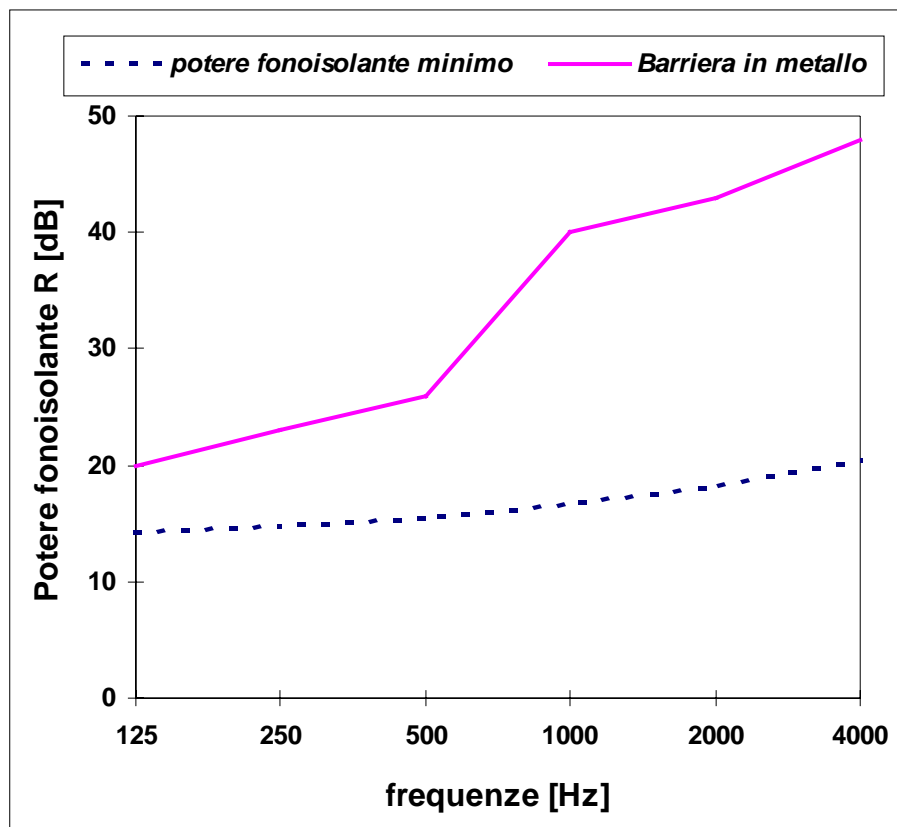


Fig. 9 - *Confronto tra il valore del potere fonoisolante minimo richiesto nell'esempio ed il valore del potere fonoisolante di una barriera in metallo*

Il risultato dell'esempio conferma l'idoneità della barriera utilizzata per il caso in esame. Vi sono però situazioni di ricettori molto vicini al ciglio dell'autostrada che subiscono elevati livelli di rumore e che, per la geometria del luogo, richiedono valori del potere fonoisolante più elevati in quanto risultano più alti i valori dell'isolamento limite.

3.4 Le diverse fasi per la stesura di un progetto di barriera acustica

Per eseguire correttamente un progetto di barriera acustica occorre affrontare i seguenti punti:

1. ***Calcolo della potenza sonora apparente emessa da un metro di lunghezza di strada.*** Ricordando che la potenza sonora emessa da una sorgente è esclusivamente legata alla sorgente stessa ed è indipendente dalla distanza di osservazione e da tutte le condizioni al contorno quale l'attenuazione dell'atmosfera, l'attenuazione del terreno, l'umidità, la temperatura, il vento ecc. occorre definire uno *spettro di potenza sonora apparente*, vista dal ricettore, che tiene conto di tutte le attenuazioni del rumore introdotte nel percorso di propagazione e che sono esclusive del territorio in esame. Il calcolo si effettua tenendo conto dell'angolo di vista del nastro stradale dal punto di ricezione e dello spettro della pressione sonora rilevato per un determinato flusso di traffico e normalizzato per il flusso di traffico di progetto.
2. ***Calcolo dell'attenuazione della barriera acustica.*** Il calcolo dell'attenuazione introdotta da una barriera acustica da collocarsi sul bordo della strada in sostituzione o dietro la barriera di sicurezza viene effettuato ricorrendo allo spettro di potenza sonora apparente misurato. Si definisce una posizione della barriera e si ottimizza la sua lunghezza ed altezza in modo da ottenere il massimo abbattimento di rumore. In questo modo si determina l'abbattimento massimo conseguibile con ragionevoli altezze e lunghezze dell'impianto.

3. Definizione delle caratteristiche acustiche delle barriere; Appendice al capitolato speciale d'appalto e computo metrico.

Le barriere acustiche devono rispondere a precisi requisiti d'isolamento acustico e di assorbimento del suono. Il progetto, quindi, deve fornire i valori minimi del potere fonoisolante in funzione della frequenza al fine di garantire il conseguimento delle attenuazioni calcolate. Il potere fonoisolante è un dato ricavabile in laboratorio con la misura normalizzata ISO 140 parti I, II e III. Le barriere acustiche da accettarsi devono possedere un valore del potere fonoisolante superiore a quello minimo definito dal progetto. In fase di offerta di una barriera acustica deve essere presentato un certificato o un rapporto di prova, rilasciato da un ente pubblico o riconosciuto SINAL, attestante i valori del potere fonoisolante dei pannelli comprensivi del montante e misurati in camera riverberante secondo la Norma ISO 140 parte III. Deve infine essere fornito il valore dell'indice di valutazione R_w espresso in dB e calcolato secondo la norma ISO 717/1.

In alcuni casi particolari può essere utile installare una barriera acustica con il lato rivolto verso la strada reso fonoassorbente. In questo caso deve essere fornita la documentazione delle proprietà di assorbimento acustico della faccia rivolta verso la sorgente sonora. In fase di offerta, quindi, se richiesto, deve essere presentato un rapporto di prova del coefficiente di assorbimento acustico rilevato in camera riverberante secondo la Norma internazionale ISO 354.

4. Norme tecniche di collaudo delle barriere acustiche.

I requisiti di isolamento acustico dei pannelli e di un campione di barriera accertati in laboratorio devono essere mantenuti mediante una posa in opera accurata e che rispetti tutte le prescrizioni relative ai montanti, guarnizioni, manufatti ecc. contenute nel certificato allegato all'offerta. In opera, purtroppo, non possono essere ripetute le prove di laboratorio in camera riverberante per cui occorre definire un metodo di misura delle qualità fonoisolanti del manufatto indipendentemente dalle scelte progettuali seguite

(altezza e lunghezza della barriera). Un punto importante da risolvere è la rispondenza del potere fonoisolante misurato in laboratorio e la perdita di inserzione misurata in opera. C'è da attendersi una notevole differenza tra i due risultati se non altro per la differenza di metodo. In laboratorio potrebbero essere svolte le certificazioni con lo stesso criterio definito per il collaudo in opera. Occorre, quindi, che la normativa per quest'ultimo criterio sia approvata e che lo stesso si consolidi presso i diversi laboratori di certificazione anche attraverso prove sugli stessi campioni effettuati da più enti preposti alla certificazione.

4. *Sperimentazioni su barriere acustiche*

Le sperimentazioni che si presentano di seguito sono volte alla caratterizzazione del campo sonoro dietro barriere altamente fonoisolanti e di adeguata lunghezza al fine di ridurre al minimo i contributi di energia sonora diffratta dai bordi laterali ed il contributo dell'onda diretta (quella che attraverserebbe la barriera). Lo scopo della sperimentazione è quello di determinare la perdita di inserzione fino alla distanza di 36 m dalla barriera al fine di quantificare l'influenza della forma della barriera sui risultati.

Per la sperimentazione sono state appositamente realizzate, nello stesso sito, la *barriera sottile* in c.l.s. **Fig. 10** alta 3 m e lunga 24 m; la barriera definita *muro verde* costituita da una struttura a gabbia in cls riempita di terra dallo spessore di 1.5 m di altezza e lunghezza pari alla precedente. Il lato rivolto verso la sorgente è stato finito con piante di varie essenze in modo da riproporre una situazione reale di impiego **Fig.12**. Infine è stata realizzata la barriera definita *muro verde rastremato* di costituzione e lunghezza pari alla precedente ma di altezza pari a 4 m **Fig. 14**.

Nelle figure successive, **Fig. 11**, **Fig. 13 e Fig. 15** si riportano le sezioni ed i punti di misura delle tre sperimentazioni effettuate.



Fig. 10 - *Barriera acustica sottile con lato rivestito in pomice. L'altro, rivolto verso la sorgente, è rivestito di materiale fonoassorbente (lana minerale).*

La sperimentazione è stata eseguita anche scambiando tra loro la posizione della sorgente sonora con quella dei microfoni per valutare l'influenza del diverso rivestimento fonoassorbente.

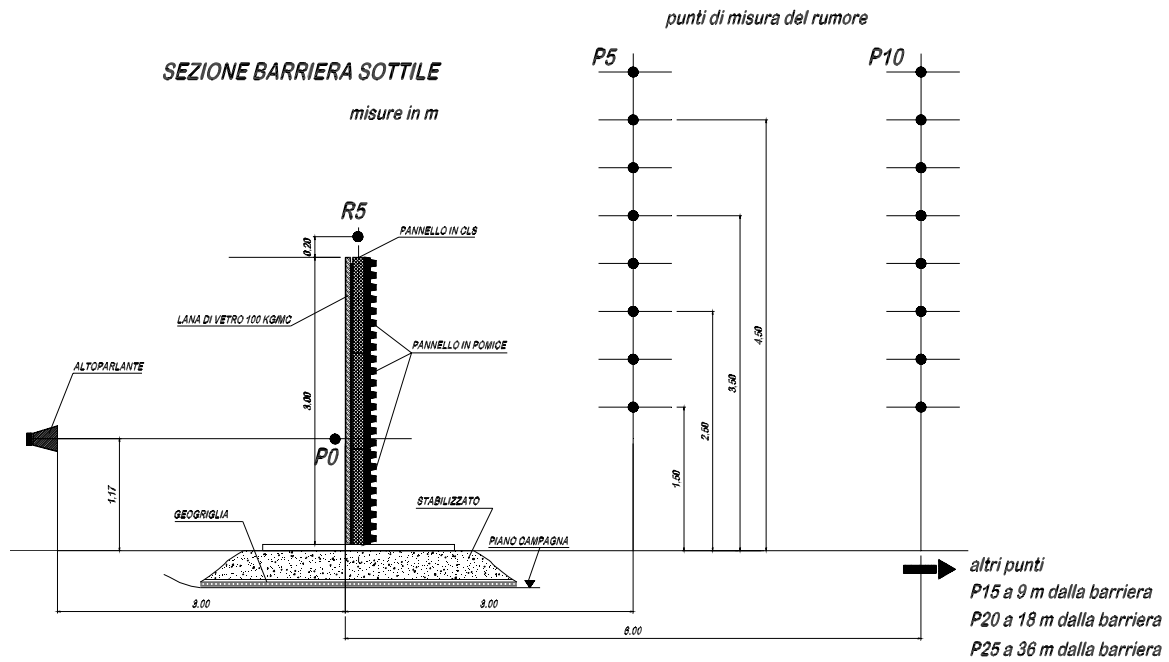


Fig. 11 - *Barriera acustica sottile: composizione e punti di misura della perdita di inserzione.*



Fig. 12 - *Barriera muro verde costituita da un muro cellulare a gabbia a reticolo spaziale tridimensionale (a sezione rettangolare) riempita di terra. Il lato rivolto verso la sorgente è tappezzato con piante di diversa essenza.*

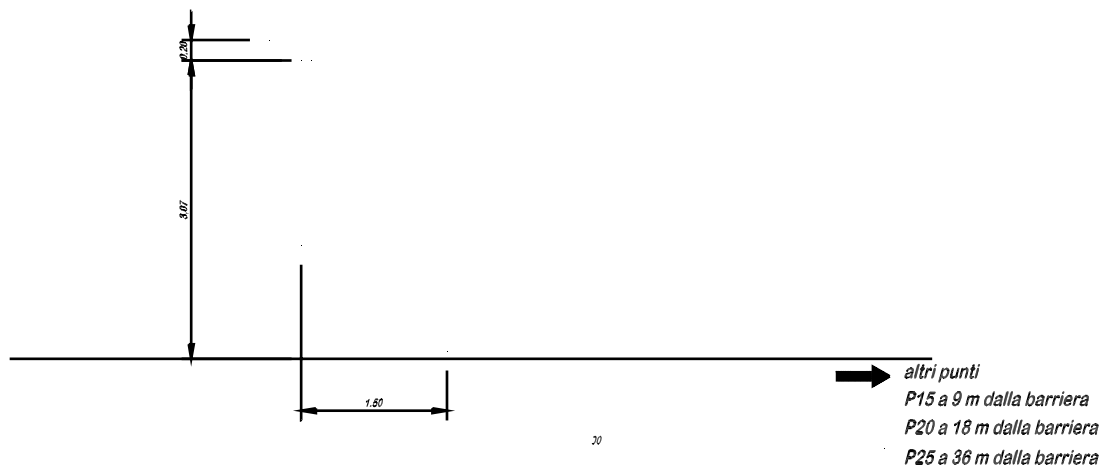


Fig. 13 - Sezione della barriera acustica Muro verde e disposizione dei punti di misura della perdita di inserzione



Fig. 14 - *Barriera muro verde rastremato (a sezione trapezia) costituita da un muro cellulare a gabbia a reticolo spaziale tridimensionale riempita di terra. Il lato rivolto verso la sorgente è tappezzato con piante di diversa essenza.*

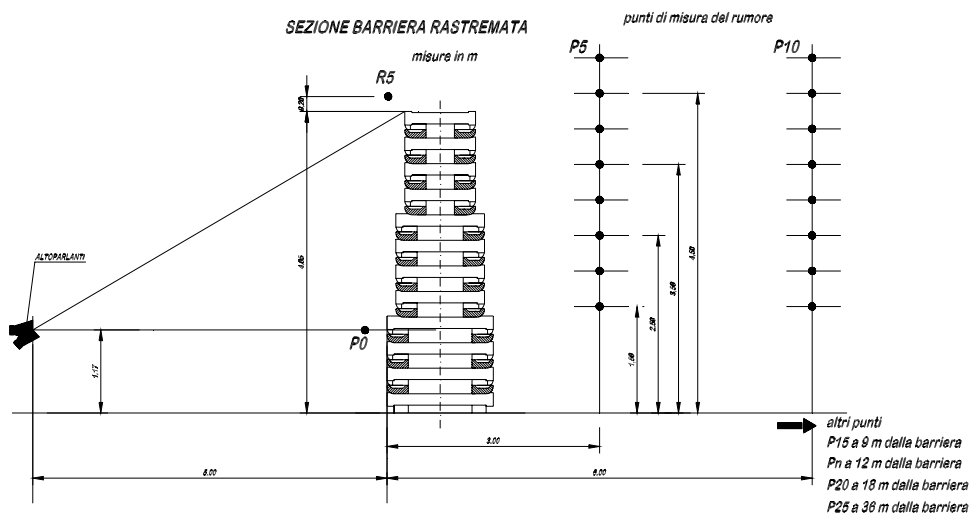


Fig. 15 - *Sezione della barriera acustica Muro verde rastremato e disposizione dei punti di misura della perdita di inserzione*

Le misure acustiche sono state eseguite rigorosamente nelle medesime condizioni di dimensioni geometriche, inerbimento del terreno di prova, tipo di sorgente puntiforme e condizioni metereologiche. Per questo motivo le tre barriere acustiche sono state elevate nello stesso punto di un prato aperto e le sperimentazioni sono avvenute nell'arco di pochi giorni.

6. Modalità di esecuzione delle misure

Le misure di acustica sono state condotte utilizzando una sorgente sonora posizionata nel semispazio definito dal lato “fonoassorbente” della barriera ed il microfono posizionato nell'altro semispazio nei diversi punti di misura indicati nelle figure precedenti. Le condizioni di campo libero (rilievi in assenza di barriera) sono state determinate con apposite misure ripetute in un'area dello stesso terreno privo di barriera.

E' stata determinata, per ciascuna barriera, la perdita di inserzione in campo acustico simulato alle diverse distanze ed altezze indicate nelle sezioni

precedenti. È stata seguita l'impostazione voluta dalla norma UNI 9435 , 1989.

I dati raccolti per ciascun punto di misura sono stati immagazzinati in una banca dati sia in forma grezza sia in forma elaborata secondo le normative utilizzate. In questa relazione si riportano i risultati delle misure eseguite sulla mezzeria delle barriere provate e si confrontano gli stessi con quelli rilevati in campo libero.

6.1 calcolo della perdita di inserzione della barriera

Le condizioni di irraggiamento della sorgente sonora utilizzata per le misure della perdita di inserzione sono state verificate in campo libero sullo stesso terreno di prova. Si è rilevata una deformazione del diagramma di radiazione alle basse frequenze dovuta alla interferenza del terreno (ben evidenziata dalla teoria di Van der Pol). Per ridurre l'inconveniente si è reso necessario determinare il campo acustico simulato nei punti di ricezione dietro la barriera come descritto dalla norma UNI 9435: Il campo acustico nel punto di ricezione dietro la barriera rilevato, però, in assenza della stessa si determina attraverso la misura del rumore in campo libero in una posizione corrispondente all'altezza e distanza della barriera dalla sorgente e riportando il livello alla distanza del punto di misura attraverso un coefficiente che tiene conto della diversa distanza **Fig. 16**.

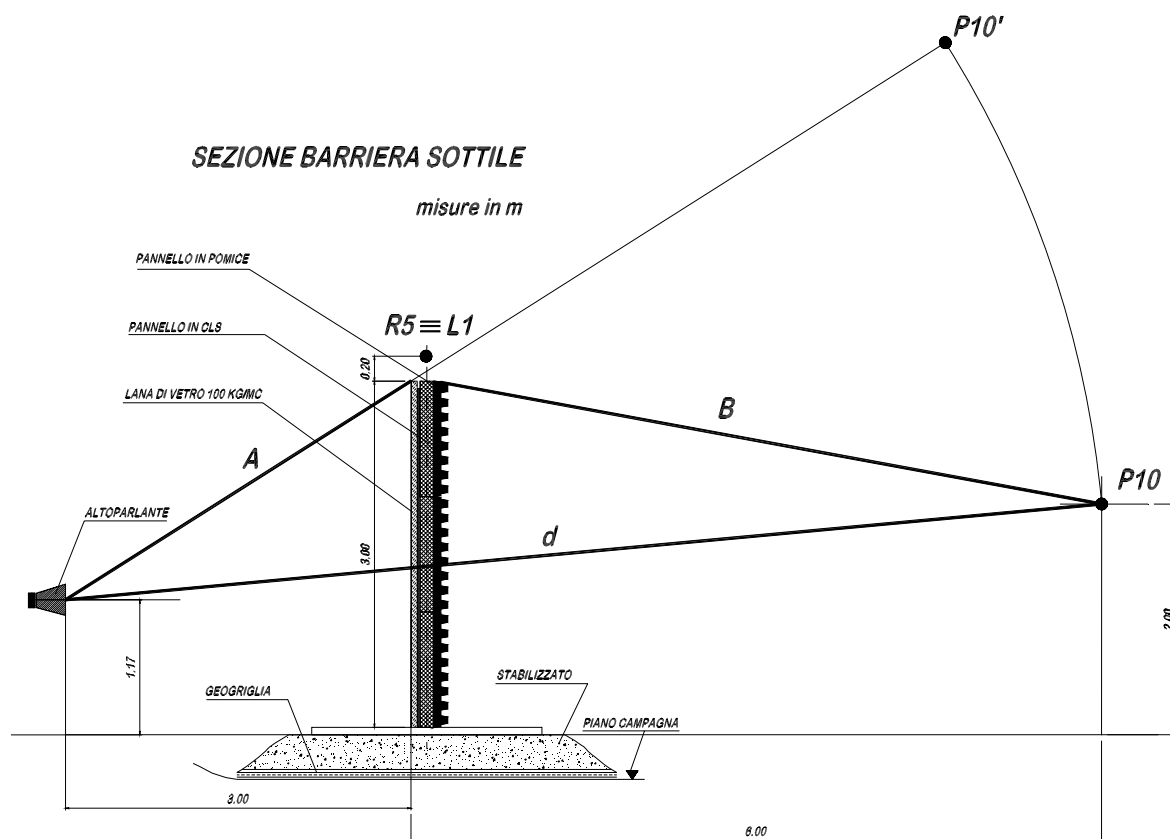


Fig. 16 - *barriera sottile*: Schema di misura per la determinazione del campo acustico simulato in P10.

La sperimentazione si conduce generando, con l'altoparlante un rumore rosa di intensità tale da superare il rumore di fondo. Per un confronto immediato dei risultati sono stati rilevati anche i valori globali della perdita di inserzione.

Nei grafici che seguono si riportano, a titolo di esempio, le perdite di inserzione rilevate alla distanza di 9 m dalla barriera ed all'altezza di 2 m dal terreno. I valori dedotti sperimentalmente vengono confrontati con i valori di attenuazione calcolati utilizzando la relazione [1] proposta da Kurze ed Anderson.

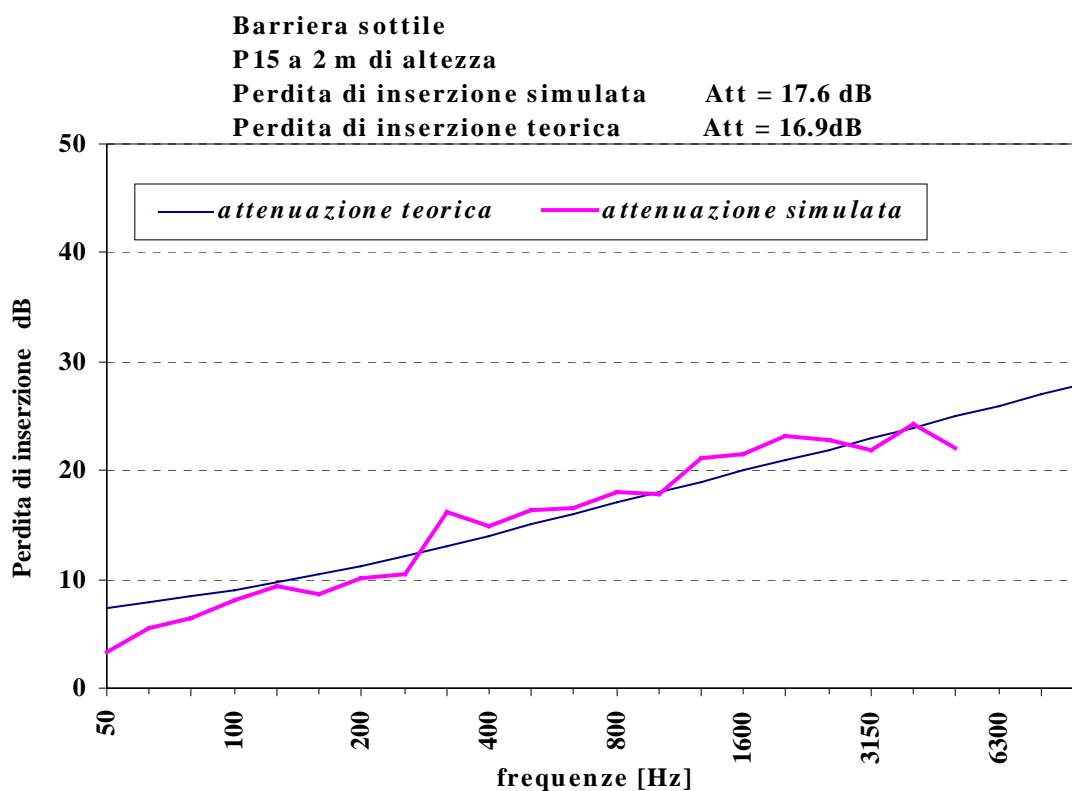


Fig. 17 - barriera sottile: Confronto tra la perdita di inserzione teorica calcolata in P15 alla distanza di 9m dalla barriera e quella misurata in P15 entrambe riferite all'altezza di 2 m.

Nella **Fig. 18** si riporta il risultato della misura per la barriera muro verde mentre nella **Fig. 19** è riportato il risultato per la barriera muro verde rastremata.

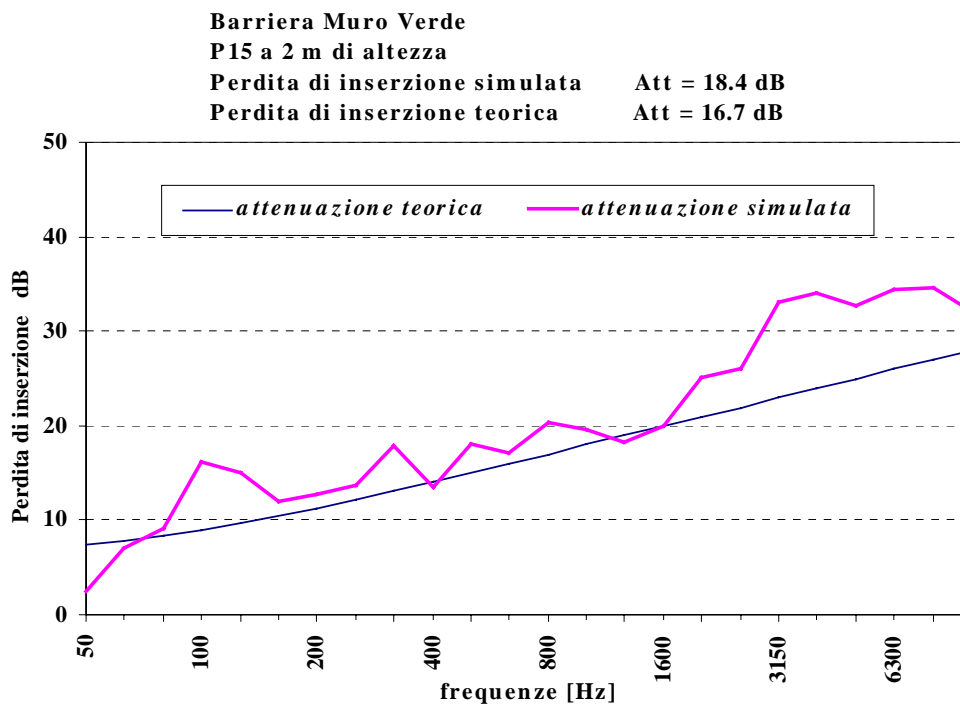


Fig. 18 - Muro verde: Confronto tra la perdita di inserzione teorica calcolata in P15 e quella misurata in P15 entrambe riferite all'altezza di 2 m-

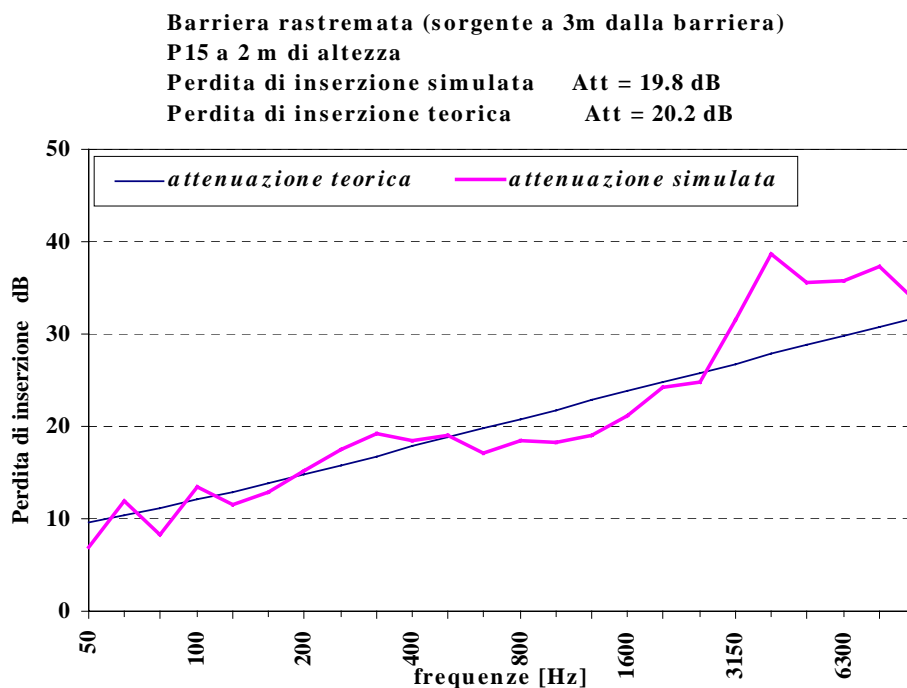


Fig. 19 - Muro verde rastremato: Confronto tra la perdita di inserzione teorica calcolata in P15 e quella misurata in P15 entrambe riferite all'altezza di 2 m-

Nella figura che segue **Fig. 20** si riportano, per confronto, le curve relative alla perdita di inserzione per bande di terzi di ottava della barriera

sottile ottenute scambiando la posizione tra sorgente e ricevitore. Si precisa che i punti P sono quelli relativi alla posizione del microfono sul lato della barriera sottile trattato con rivestimento fonoassorbente in pomice. L'altoparlante, invece, è posto a 3 m dall'altro lato della barriera trattato con materassino di lana di roccia. I punti di misura, alla diversa distanza dalla barriera, sono collocati su un campo con fieno alto 25 cm. Le posizioni Q, invece, sono quelle relative al microfono posto nel lato della barriera trattato con materassino di lana di roccia ed altoparlante posto nel lato della barriera rivestito con pomice. I punti di misura, alla diversa distanza dalla barriera, sono collocati su un campo di grano alto 50 cm.

Il terreno tra altoparlante e barriera, invece, è costituito da un battuto di terra privo di vegetazione.

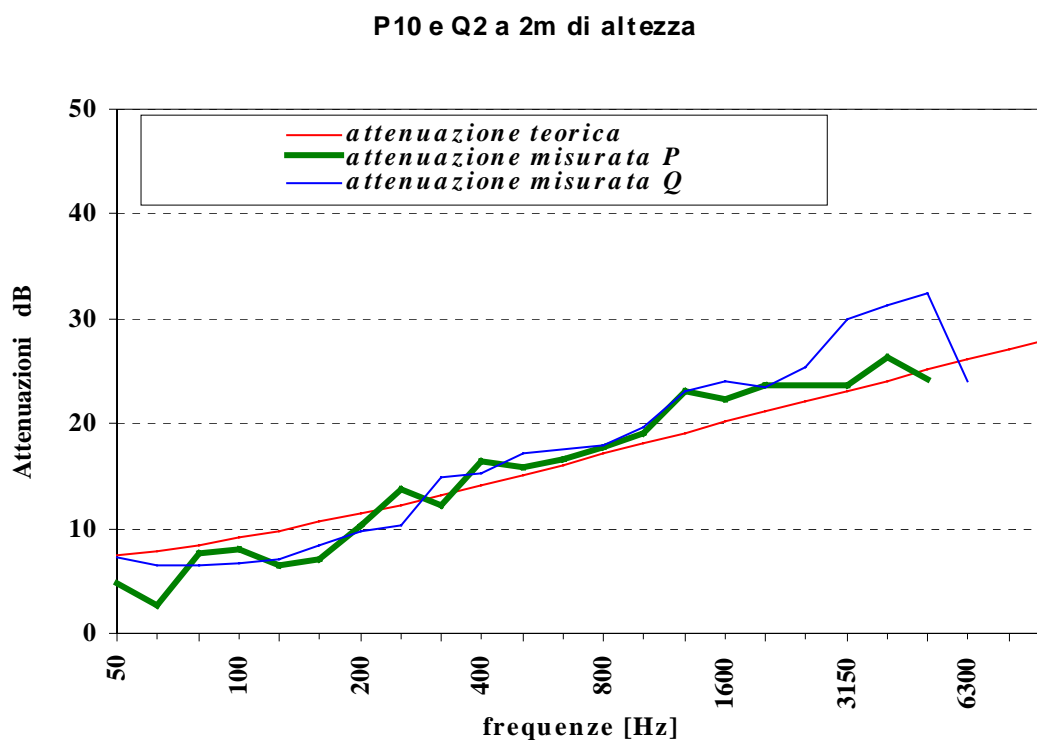


Fig.20 - Barriera Sottile: Confronto tra la perdita di inserzione teorica calcolata in P10 a 6 m dalla barriera e quelle misurate scambiando i lati in cui si posiziona l'altoparlante ed i microfoni (punti P10 e Q2) Rilievi a 2 m di altezza.

Le due curve del grafico si sovrappongono entro una ristretta fascia di incertezza e denotano la medesima perdita rispetto ai valori teorici nella gamma delle basse frequenze (inferiore a 250 Hz).

Per la barriera Muro Verde dallo spessore di 1.5 m il confronto tra le perdite di inserzione scambiando le posizioni della sorgente e ricevitore porta ai grafici di **Fig. 21**. Si precisa che per la misura nei punti P l'altoparlante è rivolto verso la parete tappezzata di verzura; per la misura nei punti Q l'altoparlante è rivolto verso la parete lasciata volutamente incolta.

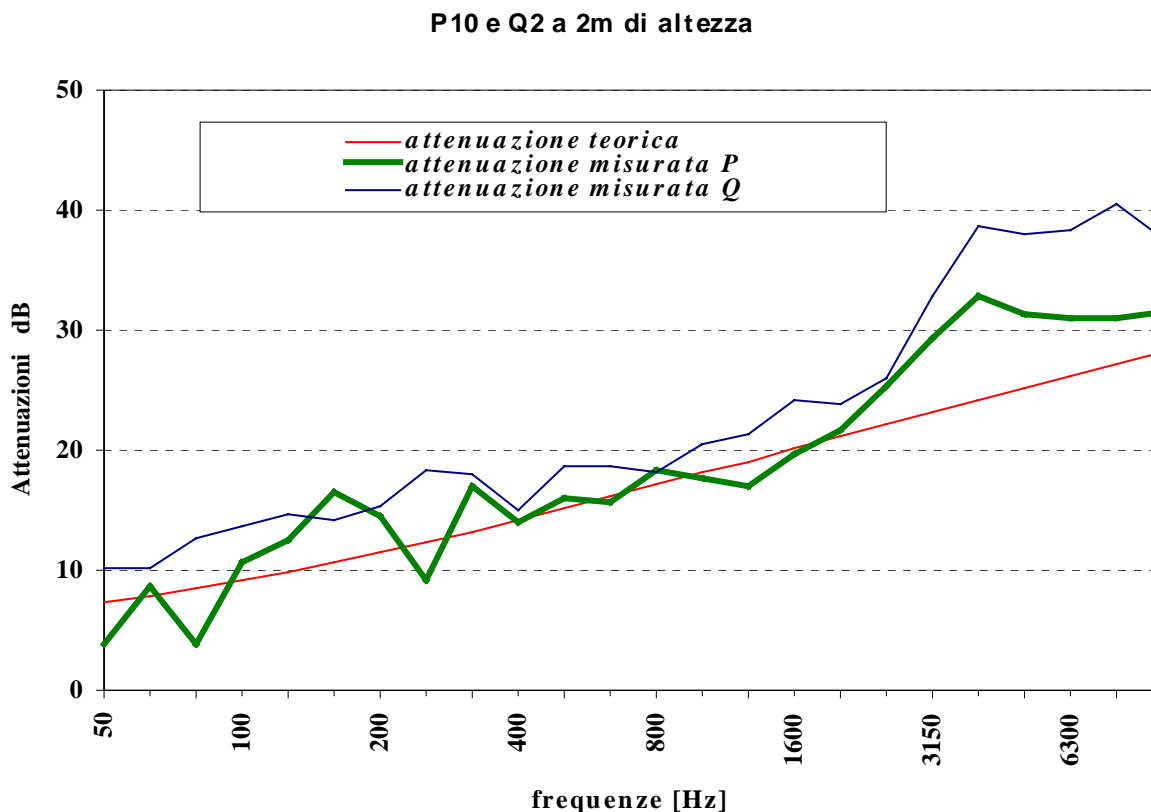


Fig. 21 - Muro verde: Confronto tra la perdita di inserzione teorica calcolata in P10 a 6 m di distanza dalla barriera ed all'altezza di 2 m e quelle misurate in P10 e Q2 alla stessa all'altezza di 2 m.

La perdita di inserzione risulta sostanzialmente diversa a seconda che la sorgente di rumore sia rivolta verso la parete tappezzata di verzura o verso quella incolta. Nel primo caso i valori si avvicinano a quelli teorici, nel secondo caso essi sono sempre più elevati.

Nel grafico di **Fig. 22** si confrontano le perdite di inserzione della barriera sottile con quella della barriera Muro verde con l'altoparlante rivolto verso la parete incolta.

Q2 a 2 m di altezza

Perdita di inserzione barriera sottile Att =18.0 dB(A)

Perdita di inserzione Muro Verde Att = 19.5 dB(A)

Indice barriera sottile I =1.0 dB

Indice Muro verde I =2.6 dB

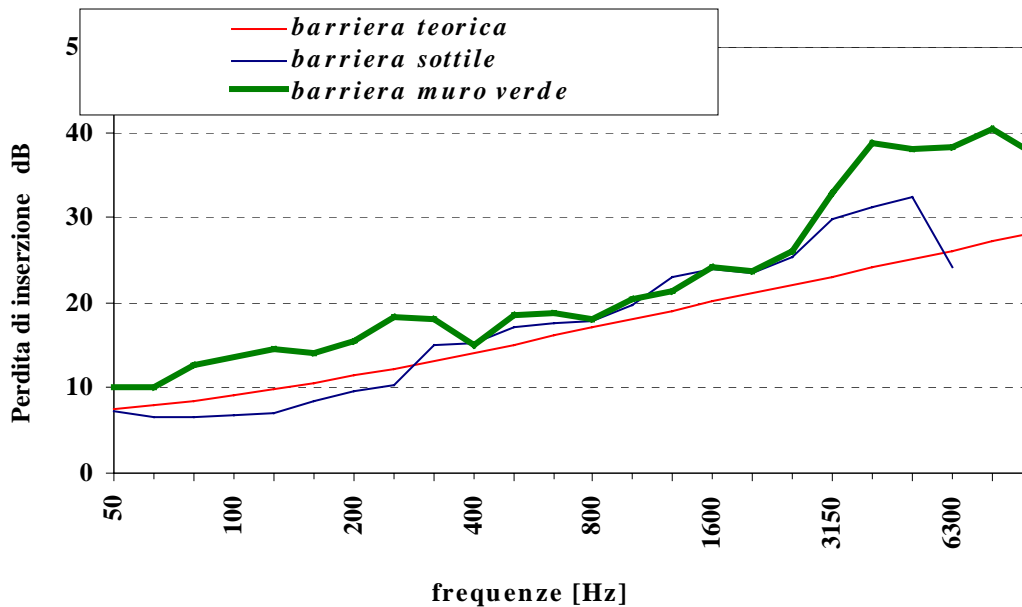


Fig. 22 - Confronto tra la perdita di inserzione teorica calcolata in P10 e quelle misurate in P10 per la **Barriera sottile** e per il **Muro verde** a 2 m di altezza

La perdita di inserzione alle basse frequenze per il muro verde è superiore ai valori teorici, per la barriera sottile risulta invece inferiore ai valori teorici. Questo fenomeno è rilevabile solo per angoli di diffrazione elevati.

Se si vogliono confrontare le caratteristiche acustiche della barriera rastremata (alta 4 m) con quelle della barriera acustica muro occorre eseguire le misurazioni in condizioni geometriche simili. Le condizioni di similitudine possono essere ottenute per la posizione della sorgente e per la posizione del ricevitore tali da realizzare lo stesso numero di Fresnel per le due situazioni (muro verde alto 3 m e barriera rastremata alta 4 m).

Le condizioni più simili come sopra detto si verificano per il punto P15 a 9 m dalla barriera sottile all'altezza di 2m dal suolo ed altoparlante a 3 m dalla barriera e con il punto P25 a 36 metri dalla barriera rastremata, all'altezza di 5m dal suolo e per la posizione della sorgente a 5m dalla barriera. I risultati del confronto sono riportati nella **Fig. 23**

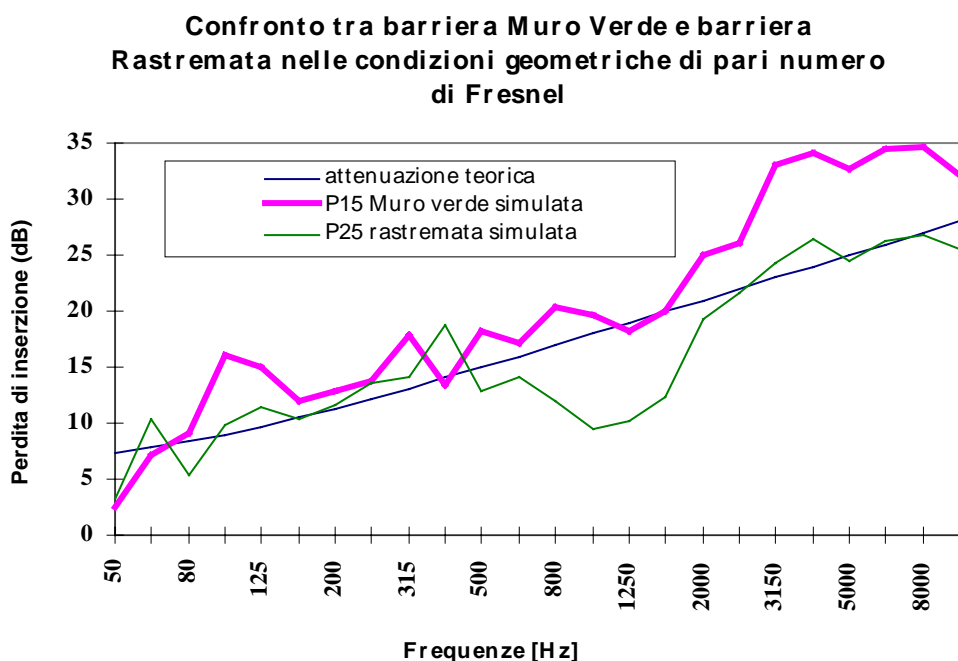


Fig. 23 - *Confronto tra la perdita di inserzione della barriera rastremata e la barriera muro verde in condizione di similitudine (a pari numero di Fresnel)*

Il grafico evidenzia il comportamento penalizzante di una struttura a gradoni per le frequenze centrali dello spettro acustico. Questa anomalia viene mitigata dalla presenza della verzura che tappezza il lato rivolto verso la sorgente creando diffrazioni per lunghezze d'onda molto diverse.

Si può concludere che:

- La **barriera sottile** produce la stessa attenuazione nelle due condizioni di misura che si ottengono scambiando microfoni ed altoparlante. La deviazione standard tra le attenuazioni P e Q a 2 m di altezza risulta pari a 0.8 dB. A 5 m di altezza la deviazione standard risulta pari a 0.8 dB. Si deduce che la superficie fonoassorbente originaria in pomice si equivale alla superficie trattata con materassino di lana di roccia presa a riferimento. L'impedenza acustica del terreno (diversa nelle due condizioni di misura) non interviene significativamente nella determinazione della perdita di inserzione. Per angoli di diffrazione elevati (posizioni del microfono ad una altezza di 2 m) si rileva costantemente carenze alle basse frequenze rispetto ai valori attesi dalla teoria della diffrazione.

- La barriera **Muro verde** produce mediamente a tutte le frequenze e per i diversi angoli di diffrazione attenuazioni maggiori se l'altoparlante illumina la superficie non inerbita (posizione Q). Infatti la deviazione standard tra le attenuazioni P e Q a 2 m di altezza per il muro verde risulta pari a 1.8 dB. A 5 m di altezza la deviazione standard risulta pari a 3.4 dB. La vegetazione, specialmente in prossimità del bordo superiore, interferisce negativamente con la diffrazione dello spigolo creando zone d'ombra meno intense di quelle create da uno spigolo più netto. Il fenomeno, più volte segnalato in letteratura, sconsiglia per questo motivo, la piantumazione delle dune in terra realizzate per l'abbattimento del rumore. Alle basse frequenze la perdita di inserzione si mantiene superiore ai valori teorici.
- Le attenuazioni introdotte dal **Muro verde** e **muro verde rastremato** risultano essere più consistenti delle analoghe prodotte dalla **Barriera sottile** specialmente alle basse frequenze e con angoli di diffrazione elevati. Il muro verde mantiene valori più elevati della perdita di inserzione rispetto ai corrispondenti della barriera sottile anche alle frequenze superiori a 1600 Hz. Con la sorgente rivolta verso la parete inerbita si osservano valori coincidenti della perdita di inserzione con quelli misurati per la barriera sottile nella gamma delle frequenze medie da 400 a 3.000 Hz. In generale i valori della perdita di inserzione del Muro verde si mantengono più elevati dei corrispondenti valori della barriera sottile per gli angoli di diffrazione più elevati.