



Università degli studi di
Padova



STRUMENTI E TECNICHE DI MISURA

Corso di Acustica applicata

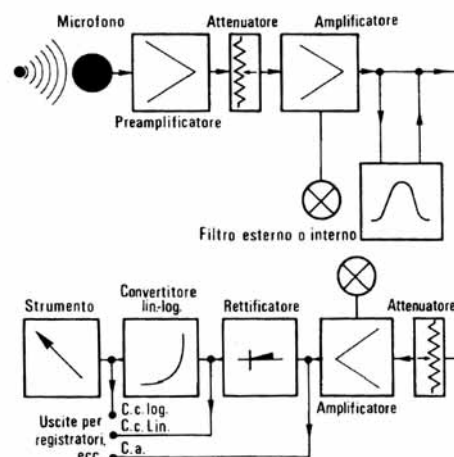
Renato Lazzarin

Dipartimento di Tecnica e Gestione dei
Sistemi industriali

Il fonometro

Il fonometro è lo strumento maggiormente utilizzato nelle misure di rumore. Misura principalmente il livello sonoro mediato su un certo intervallo di tempo o l'esposizione al rumore. Spesse volte è equipaggiato con un analizzatore di spettro. La catena di misura è la seguente:

- un microfono che trasforma le onde sonore in segnali elettrici;
- un preamplificatore che consente di usare cavi anche molto lunghi;
- un amplificatore che consente di operare più facilmente e con minori errori soprattutto in presenza di bassi livelli sonori: esso deve amplificare il suono con amplificazione costante e con basso rumore di fondo.



Il fonometro

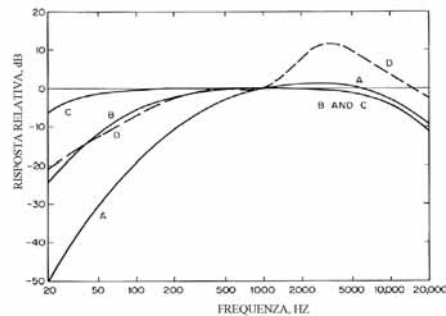
La banda di frequenze in cui deve intervenire l'amplificatore va generalmente da 16 a 16.000 o 20.000 Hz.

All'amplificatore seguono una serie di sistemi di pesatura e di media che calcolano il valore efficace o attuano la pesatura secondo le varie scale.

L'attenuatore riduce l'amplificazione per i livelli più alti e viene di solito inserito manualmente, salvo la presenza di protezione da *overload*.

Dal/allo strumento si possono avere uscite/ingressi da registratori.

Il segnale processato va ad un indicatore che può essere di tipo analogico, ma sempre più spesso è di tipo digitale.



Curve di pesatura in funzione della frequenza di fonometri. La pesatura D qui illustrata non è normalmente presente nei fonometri ed è utilizzata soltanto per misure del traffico aeroportuale

Il fonometro

Il fonometro è dotato di 3 costanti di tempo:

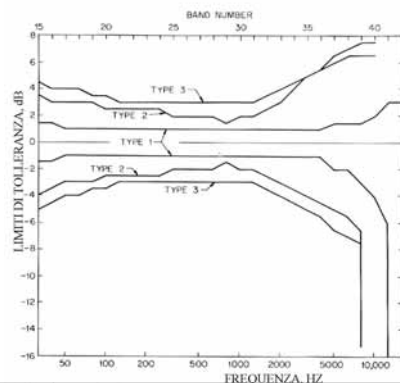
- slow
- fast
- impulse

che mediano il segnale rispettivamente in 1-0,125-0,035 s.

I fonometri sono classificati secondo il grado di precisione in classi (normalmente 1,2 o 3).

Molto spesso si è interessati al L_{eq} ottenibile o con un dosimetro, ovvero con un fonometro che effettua la misura su periodi programmati.

Tolleranza consentita sulla pesatura in scala A per diversi tipi di fonometri



Il microfono

L'elemento più delicato del fonometro è il microfono: esso è assai sensibile agli urti come anche al livello della carica delle batterie.

Risulta così essenziale una frequente calibrazione. Il calibratore è generalmente un pistonofono che produce nella sua cavità un livello ben definito ad una frequenza fissata dal movimento del pistone libero, situata generalmente a 250 Hz. Può essere anche un dispositivo elettronico che genera un segnale a 1.000 Hz. Alcuni microfoni possono essere calibrati con un'accuratezza fino a 0,2 dB.

Idealmente un microfono dovrebbe replicare nel segnale elettrico (di tensione) la pressione sonora. Non dovrebbe disturbare il campo sonoro con la sua presenza e non dovrebbe variare la sua sensibilità nel tempo.

Sensibilità del microfono

La risposta di un microfono è il rapporto fra l'uscita elettrica e la pressione sonora al diaframma. Ad esempio, l'uscita potrebbe essere 1 mV/Pa.

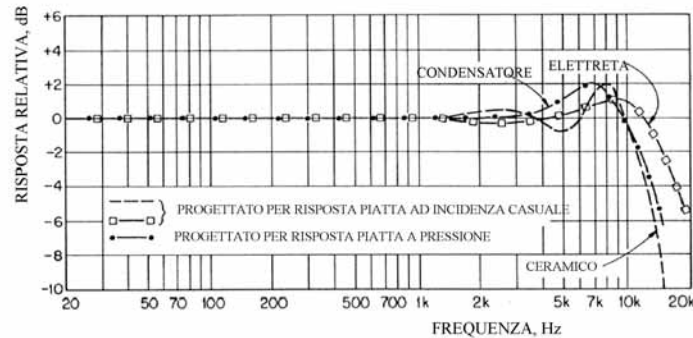
Solitamente la sensibilità è misurata rispetto ad un tono puro generato a 1.000 Hz in un calibratore: essa si può esprimere in decibel con riferimento alla sensibilità di 1 V/Pa. Ad esempio, se si hanno 10 μ V/Pa, il livello di sensibilità è dato da:

$$L_e = 10 \log \frac{e^2}{e_{rif}^2} = 20 \log \frac{e}{e_{rif}} = 20 \log \frac{10 \times 10^{-6}}{1} = -100 \text{ dB re V/Pa}$$

Valori tipici possono andare da -30 a -105 dB re V/Pa. Tutti i microfoni modificano la loro sensibilità nel tempo con valori dell'ordine di 0,4 dB/anno. In particolare gli urti possono modificare fortemente la stabilità dello strumento.

Sensibilità del microfono

La sensibilità è funzione della frequenza: pertanto, la risposta di un microfono (calibrato per esempio a 1.000 Hz) varia con la frequenza.



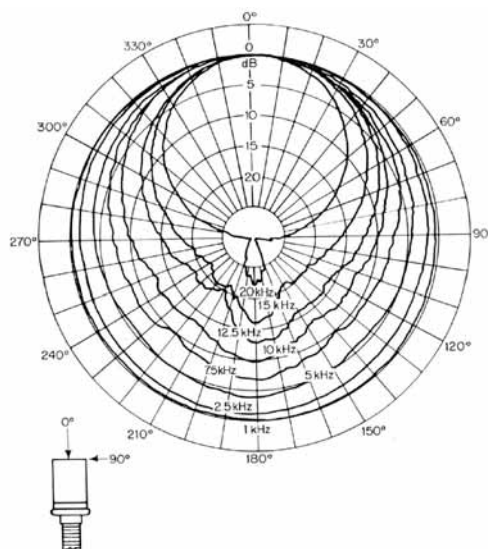
Tipica risposta caratteristica relativa ad incidenza casuale di un microfono da 1' usato nei fonometri

La sensibilità è anche funzione dell'angolo di incidenza dell'onda sonora con il microfono stesso: in tal caso si parla di direzionalità del microfono.

Direzionalità del microfono

Molti microfoni sono essenzialmente non direzionali, cioè al di sotto dei 1.000 Hz la loro risposta è la stessa in tutte le direzioni.

A frequenze più alte, dal momento che le dimensioni del microfono sono confrontabili con la lunghezza d'onda, vi è sempre un certo grado di direzionalità.



Risposta relativa di un microfono a elettretta da 1' in funzione dell'angolo di incidenza del suono sul microfono

Microfono per campo diffuso

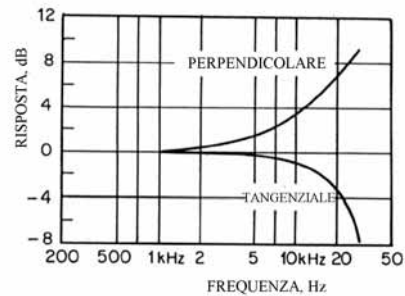
Vi sono principalmente due famiglie di microfoni:

- il microfono a pressione;
- il microfono a gradiente di pressione.

Il primo è sensibile alla pressione acustica prodotta dal fenomeno sonoro: l'onda incidente colpisce una sola faccia della membrana e la sensibilità non dipende dalla direzione di provenienza.

Pertanto, è adatto a misure in campo sonoro diffuso e viene indicato come microfono a incidenza casuale.

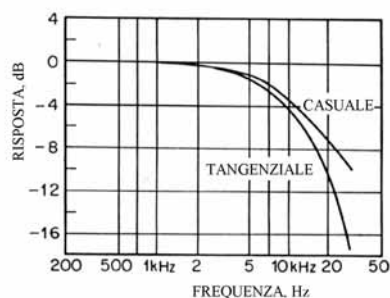
Se usato per misure in campo libero e orientato perpendicolarmente o tangenzialmente, è necessario correggere la risposta.



Correzione da aggiungere algebricamente al livello ottenuto da risposta ad incidenza casuale per ottenere i livelli di incidenza perpendicolare e tangenziale

Microfono per campo libero

L'altra famiglia di microfoni è quella a gradiente di pressione in cui il diaframma mobile ha entrambe le facce esposte all'onda sonora, per cui la forza che agisce è proporzionale alla differenza di pressione fra le due facce. La sensibilità è fortemente direzionale. Questi microfoni sono indicati anche come ad incidenza perpendicolare.



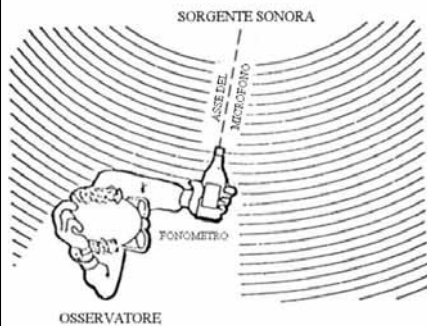
Correzione da aggiungere algebricamente al livello ottenuto da una risposta a incidenza perpendicolare per ottenere i livelli di risposta ad incidenza casuale e tangenziale in un campo libero

Per ottenere la risposta diffusa o tangenziale si dovrebbero operare le correzioni indicate.

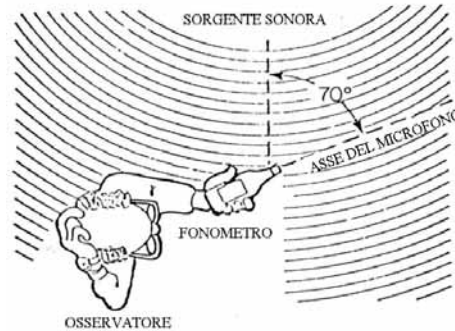
Come si è visto, le correzioni risultano importanti solo nei confronti di suoni di frequenza elevata e superiori a 4.000 Hz.

Orientazione del microfono

La misura in campo libero richiede una corretta orientazione dei due tipi di microfono.



Modo corretto di tenere un fonometro relativamente alla sorgente sonora quando esso sia dotato di un microfono ad incidenza perpendicolare



Modo corretto di tenere un fonometro relativamente alla sorgente sonora quando esso sia dotato di un microfono ad incidenza casuale

Altrimenti, in caso di utilizzo di microfono per campo diffuso orientato verso la sorgente in campo libero, si sottostima il livello sonoro. Viceversa, si ha una sovrastima con un microfono per campo libero usato in campo diffuso.

Interferenza del microfono nel campo acustico

In campo libero ed alle alte frequenze, cioè quando la lunghezza d'onda è dello stesso ordine di grandezza del microfono, si verificano degli effetti di riflessione sulla superficie del microfono e quindi la pressione che eccita il diaframma non è più quella esistente in quel punto prima dell'introduzione del microfono, ma bensì maggiore.

Affinché la risposta in frequenza sia lineare nel microfono per campo libero sono introdotte delle correzioni meccaniche che compensano gli incrementi di pressione: in altre parole si aumenta lo smorzamento della membrana.

Viceversa, l'immissione di un microfono in campo riverberante non comporta alcun effetto collaterale: i fenomeni di riflessione non provocano incrementi di pressione proprio perché il campo è già riverberante.

Ecco perché l'uso di microfoni per campo libero nelle misure in campo riverberante determina una sottostima del livello sonoro in quanto la pressione acustica viene attenuata dallo smorzamento meccanico.

Le dimensioni del microfono

Sia la sensibilità che la risposta in frequenza sono legate alle dimensioni del microfono.

La sensibilità decresce al diminuire del diametro (in ragione del diaframma più rigido), mentre la gamma utile in frequenza e l'omnidirezionalità aumentano (in ragione della dimensione confrontabile con lunghezze d'onda minori).

Ecco che l'uso di un microfono che abbia una banda passante molto ampia paga il prezzo in termini di sensibilità e viceversa.

Per quanto riguarda la risposta in ampiezza, per ogni tipo di microfono esiste un livello di pressione massimo misurabile. Esso è dovuto al limite di elasticità della membrana, oltre il quale si verifica il fenomeno della distorsione.

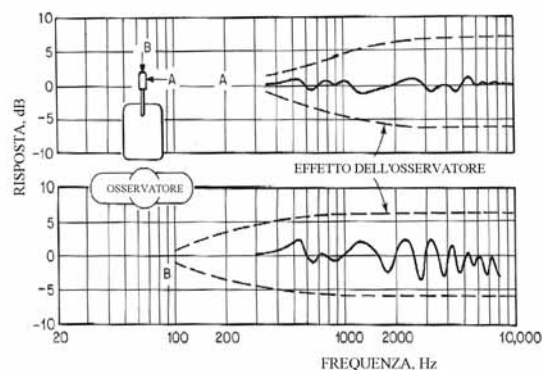
Ecco che per livelli elevati è opportuno l'uso di microfono di diametro ridotto, a spese però della sensibilità.

Si capisce quindi che non esiste il microfono adatto a tutte le misure: un buon compromesso è un diametro di 1/2 pollice.

Influenza dell'operatore

Qualora lo strumento sia tenuto in mano, il corpo del rilevatore può influenzare la misura, soprattutto quando egli è prossimo al microfono. Per minimizzare quest'effetto lo strumento va tenuto con il braccio teso di fronte al rilevatore con il suono proveniente. L'effetto è rilevante vicino alla sorgente in campo libero ed in ambienti chiusi molto fonoassorbenti.

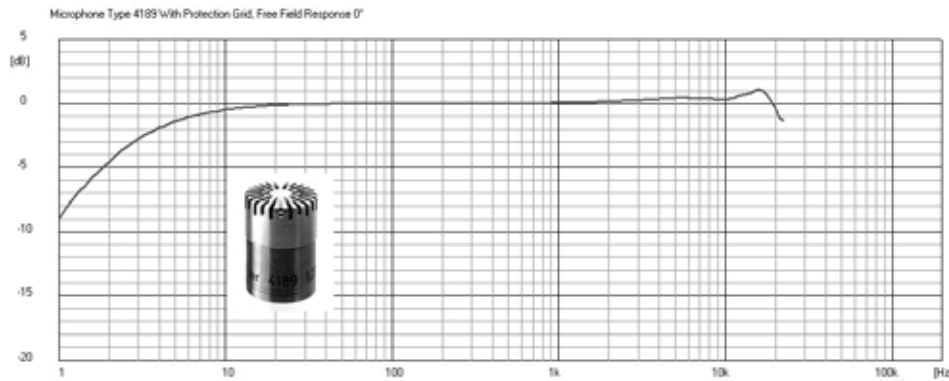
L'ideale è collegare il microfono ad un cavo di estensione soprattutto quando si misurino alte frequenze. La figura quantifica l'effetto.



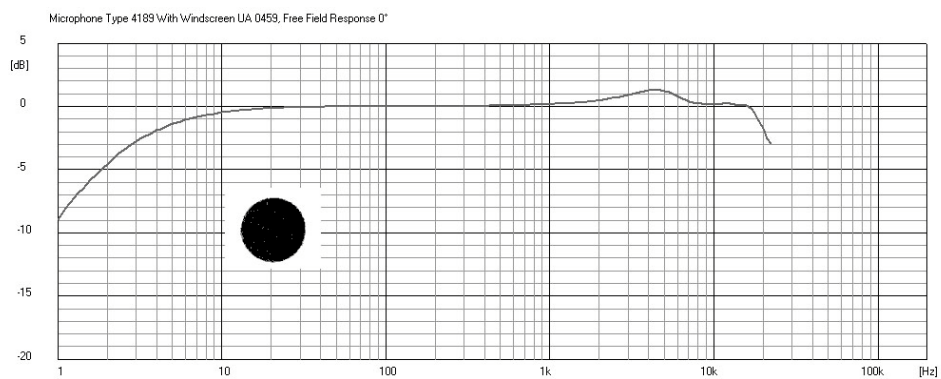
Differenza fra la risposta di un microfono da solo in un campo libero e la sua risposta quando sono presenti il suo astuccio e un osservatore. I risultati sono illustrati per onde piane che colpiscono il microfono (A) tangenzialmente e (B) ad incidenza perpendicolare

Influenza del vento

Il vento produce sul microfono un rumore che può influenzare seriamente l'accuratezza della misura. Si usa allora una schermo antivento (palla di plastica schiumata porosa) che influenzi scarsamente la risposta in frequenza e la sensibilità del microfono.

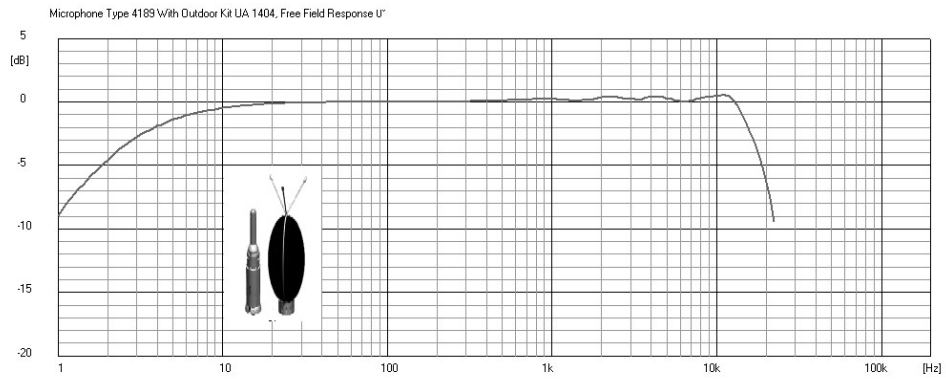


Influenza dello schermo antivento



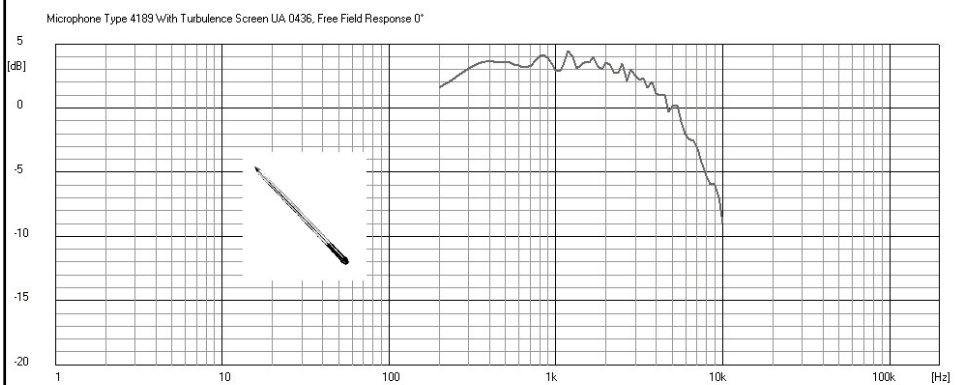
Lo schermo antivento ha un'influenza di circa 1 dB a 4.000 e 5.000 Hz. Si nota una leggera riduzione nella banda passante alle altissime frequenze.

Influenza dello schermo antivento



Il kit per esterno ha un'influenza trascurabile nelle frequenze centrali, ma si nota una riduzione marcata nella risposta alle alte frequenze.

Influenza dello schermo antivento



Il kit per la misura in condotti di aerazione ha un'influenza marcata.

Tipologie di microfoni

I microfoni più diffusi sono:

- a condensatore;
- ad elettretta;
- piezoelettrici.

Un microfono a condensatore è basato sulla variazione di capacità elettrica C indotta dall'onda sonora. È costituito da un diaframma sottile esposto alle onde sonore e protetto da una griglia adeguatamente forata dietro il quale è disposto un elettrodo perforato a formare un condensatore. Le onde sonore comportano con il movimento del diaframma un cambiamento di capacità.

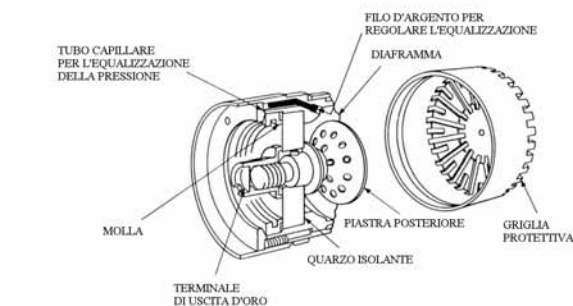
$$Q = C \times V \qquad C = E \frac{S}{d}$$

Q è la quantità di carica, V il voltaggio di polarizzazione, E la costante dielettrica, d la distanza fra gli elettrodi, S la superficie degli elettrodi.

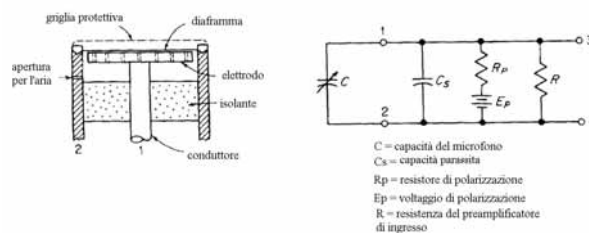
Microfono a condensatore

Se un voltaggio in corrente continua (detto di polarizzazione) è applicato al condensatore attraverso una forte resistenza (il voltaggio è spesso dell'ordine di 200 V), la variazione di capacità produce un segnale elettrico proporzionale alla pressione sonora.

Disegno schematico e circuito equivalente per un microfono a condensatore



Esplosione semplificata di un microfono a condensatore con evidenziate alcuni dettagli di costruzione



Microfono a condensatore

I microfoni a condensatore

- hanno una stabilità superiore a qualsiasi altro microfono,
- sono poco sensibili alla temperatura e
- presentano un'ampia risposta in frequenza.

È il classico microfono da laboratorio:

- molto delicato,
- risente dell'umidità ed
- è costoso.

Microfono ad elettreta

Il microfono ad *elettreta* è simile a quello a condensatore, ma non richiede il voltaggio di polarizzazione. La struttura base consiste in un diaframma sottile ($20\ \mu\text{m}$) di polimero la cui parte esposta è rivestita di un film metallico. Esso è teso sopra una piastra posteriore. Il polimero è elettricamente carico (elettreta) sì che non è necessario un voltaggio applicato.

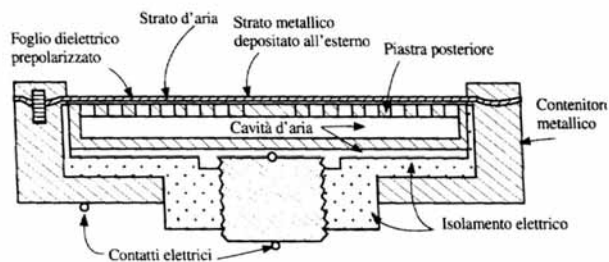


Figura 8.4 Schema in sezione di microfono electret.

Microfono ad elettreta

I vantaggi del microfono ad elettreta sono

- il basso costo,
- l'elevata sensibilità acustica,
- la buona risposta in frequenza,
- la robustezza,
- la scarsa sensibilità all'umidità,
- nessun voltaggio di polarizzazione.

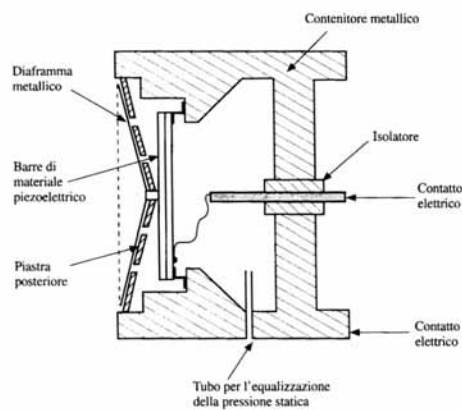
Per questo è uno dei microfoni più diffusi per le misure sul campo.

I suoi problemi sono connessi

- alla sensibilità alla temperatura e
- alla conservazione della carica.

Microfono piezoelettrico

Nei microfoni piezoelettrici il diaframma è connesso meccanicamente ad un elemento piezoelettrico che produce un voltaggio elettrico quando l'elemento è sollecitato dal diaframma.

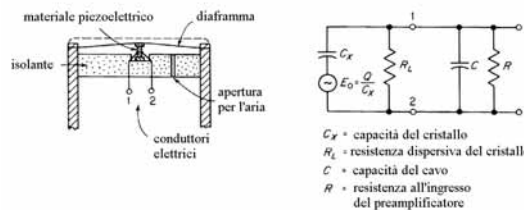


Schema in sezione di microfono piezoelettrico.

Microfono piezoelettrico

- Vantaggi:**
- non è sensibile all'umidità;
 - è molto robusto;
 - ha un'ampia risposta in frequenza;
 - non richiede polarizzazione;
 - è molto stabile.
- Svantaggi:**
- risente delle vibrazioni più degli altri;
 - varia la sua sensibilità con la temperatura.

Disegno schematico e circuito equivalente di un microfono piezoelettrico

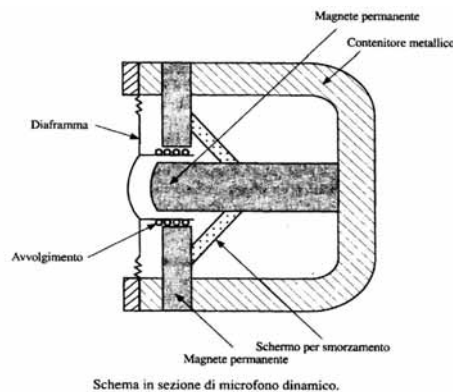


Anche le caratteristiche elettriche variano con la temperatura soprattutto sotto i 10°C. Questo può dare fastidio se il microfono è connesso con un lungo cavo all'apparecchiatura, tanto più che il microfono piezoelettrico è spesso connesso allo strumento senza preamplificatore.

Microfono dinamici

Nei microfoni dinamici o a conduttore mobile il diaframma muove un avvolgimento in un campo magnetico, producendo una corrente nell'avvolgimento: sono caratterizzati da bassa impedenza elettrica che consente lunghi cavi di collegamento con basso rumore elettrico interno.

Sono molto sensibili ai campi magnetici e alle vibrazioni, inoltre hanno una scadente risposta alle basse frequenze, per cui risultano di non frequente impiego.

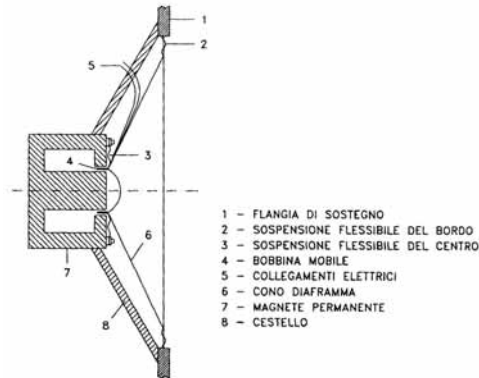


Altoparlanti

Si può fare un cenno a questo punto agli altoparlanti che convertono un segnale elettrico in un suono.

I più comuni sono a radiazione diretta di un diaframma vibrante. L'accoppiamento fra il segnale elettrico e quello meccanico avviene per mezzo di un avvolgimento mobile (bobina) immerso in un campo magnetico.

Se la bobina mobile è attraversata da una corrente elettrica si produce una forza per l'interazione con il magnete permanente che mette in movimento la bobina e la membrana ad essa solidale.



Generatori di rumore

L'altoparlante è l'elemento terminale dei generatori di rumore amplificati che sono in grado di produrre sia rumore bianco che rumore rosa che rumore in banda di ottava.

Il rumore rosa ha uno spettro continuo di frequenza con una potenza costante entro un'ampiezza di banda proporzionale alla frequenza centrale di banda: in parole povere ogni banda di ottava o di terzo di ottava presenta eguale potenza.

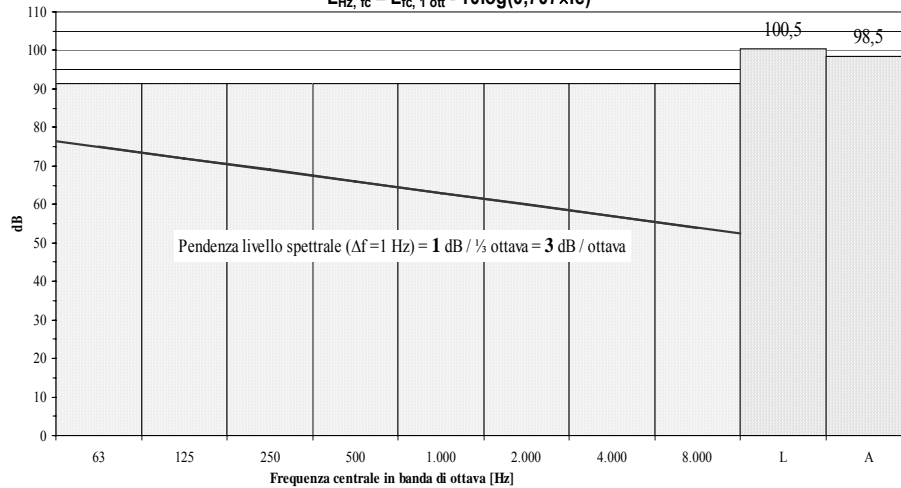
Il rumore bianco viceversa presenta uno spettro continuo di frequenza con potenza costante in bande di eguale ampiezza, così che è spostato verso alte frequenze rispetto al rumore rosa.

Rumore rosa in banda di ottava

Rumore rosa: uguale intensità su ogni banda ($L_{fc} = \text{cost}$)

$L_{fc, 1 \text{ ott}} = 91,5 \text{ dB}$ pari a $L_{\text{glo}} = 100,5 \text{ dB}$

$L_{\text{Hz}, fc} = L_{fc, 1 \text{ ott}} - 10 \log(0,707 \times fc)$

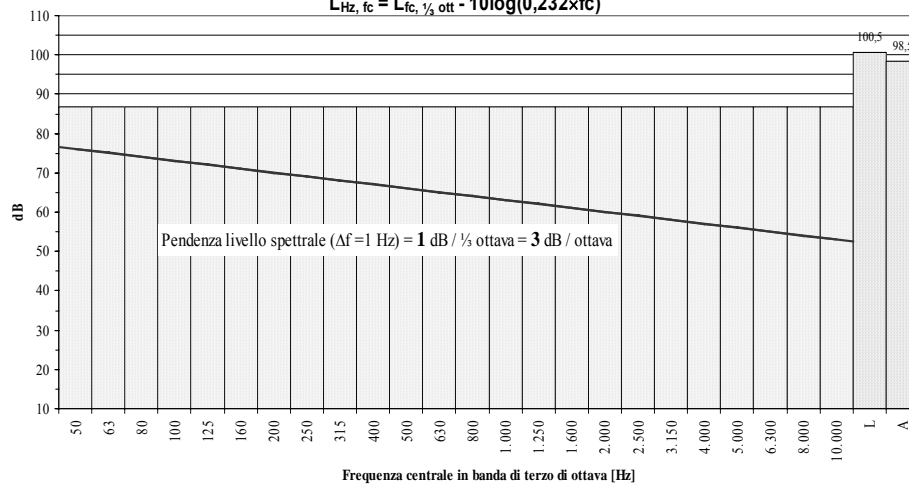


Rumore rosa in banda di terzo di ottava

Rumore rosa: uguale intensità su ogni banda ($L_{fc} = \text{cost}$)

$L_{fc, 1/3 \text{ ott}} = 86,7 \text{ dB}$ pari a $L_{\text{glo}} = 100,5 \text{ dB}$

$L_{\text{Hz}, fc} = L_{fc, 1/3 \text{ ott}} - 10 \log(0,232 \times fc)$



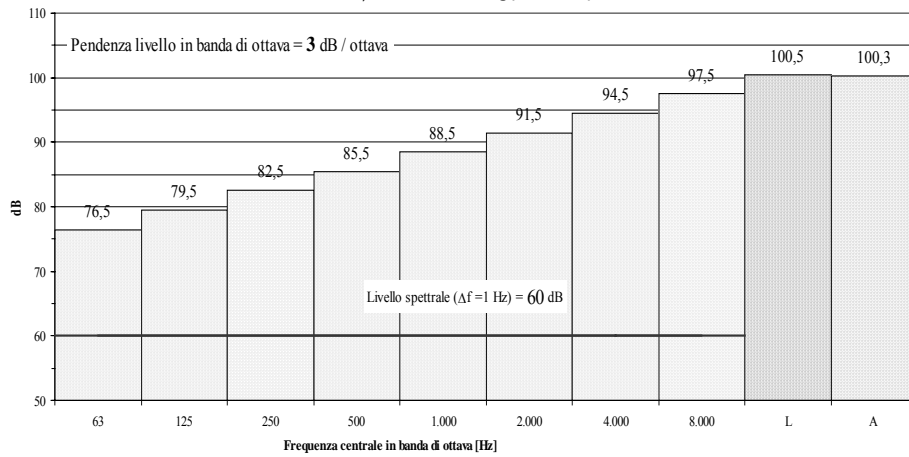
Rumore bianco in banda di ottava

Rumore bianco: uguale intensità su ogni frequenza con $\Delta f = 1 \text{ Hz}$

($L_{\text{Hz}} = \text{cost}$)

$L_{\text{Hz}} = 60 \text{ dB}$ pari a $L_{\text{glo}} = 100,5 \text{ dB}$

$L_{\text{fc, 1 ott}} = L_{\text{Hz}} + 10\log(0,707 \times f_c)$



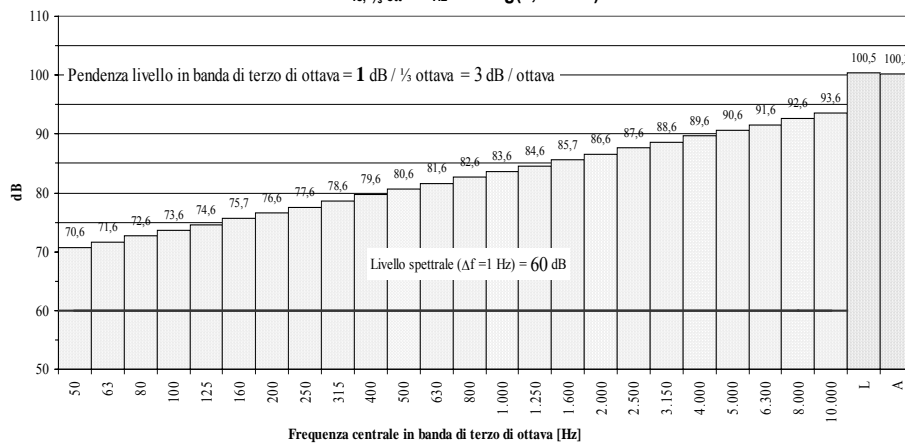
Rumore bianco in banda di terzo di ottava

Rumore bianco: uguale intensità su ogni frequenza con $\Delta f = 1 \text{ Hz}$

($L_{\text{Hz}} = \text{cost}$)

$L_{\text{Hz}} = 60 \text{ dB}$ pari a $L_{\text{glo}} = 100,5 \text{ dB}$

$L_{\text{fc, } 1/3 \text{ ott}} = L_{\text{Hz}} + 10\log(0,232 \times f_c)$

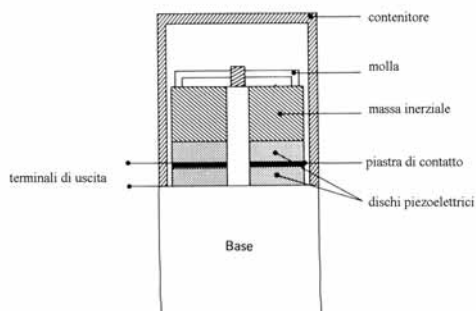


Accelerometri

Servono per la misura delle vibrazioni. Sono generalmente basati sull'effetto piezoelettrico provocato dallo sforzo esercitato su dei dischi piezoelettrici da una massa sismica.

Il voltaggio in uscita è proporzionale all'accelerazione rilevata che è proporzionale allo spostamento e alla (frequenza)².

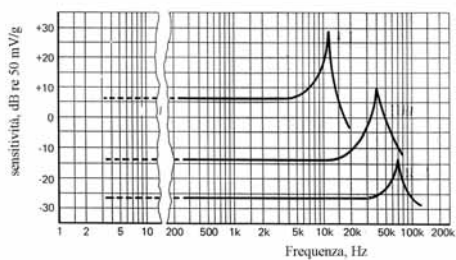
Il tutto è contenuto entro un blocco metallico robusto che va collegato all'elemento vibrante.



Tipico accelerometro piezoelettrico

Accelerometri

La sensibilità è espressa in mV/g e dovrebbe essere piatta. Di solito la sensibilità è costante fino a valori oltre i 10.000 Hz.



Risposta di frequenza tipica di un accelerometro




Relative dimensions			
Height mm	24	20	11
Weight gm	43	11	2
Sensitivity mV/g	98	10	3
Capacitance pF	1200	1200	650
Free resonance kHz	16	42	55
Maximum shock g	2000	20000	25000
Transverse sensitivity %	<4	<4	44
Temperature sensitivity ms ⁻² /°C	0.04	0.4	5
Magnetic sensitivity g/K gauss	0.01	0.04	3
Acoustic sensitivity ms ⁻²	0.001	0.01	0.04
Max. acceleration with mounting magnet g	60	150	-

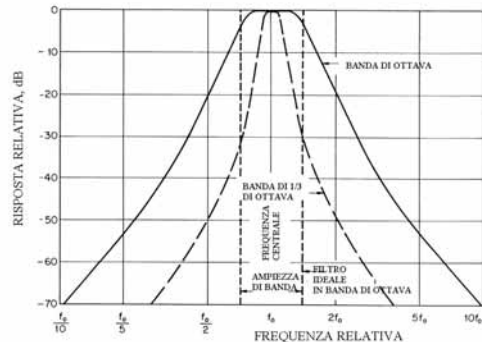
Figure 6. Comparisons of three different sizes of accelerometer after Bruel & Kjaer

I filtri

A valle di microfono, di preamplificatore e di amplificatore si trovano le reti filtranti per la ponderazione e per le integrazioni.

Un tempo si lavorava con un analizzatore di spettro costituito da un banco di filtri in banda di ottava o 1/3 di ottava commutabili singolarmente manualmente per il rilievo dello spettro di un segnale stazionario. Oggi i filtri sono montati in parallelo, il che permette un'analisi in real-time.

Il filtro ideale dovrebbe avere risposta uniforme entro la banda desiderata e nessuna risposta al di fuori. I filtri reali possono solo approssimare i filtri ideali nel senso che non vi è uniformità completa entro la banda e del rumore passa anche se al di fuori della banda.



Risposta normalizzata di un filtro reale a banda di ottava e a banda di terzo di ottava. Viene rappresentata anche la risposta di un filtro "ideale"

I filtri

Analizzatori di maggiore qualità e costo operano con un banco di filtri, ciascuno dei quali con un canale indipendente (analizzatori in tempo reale). Anche questo processo richiede un certo tempo di elaborazione, per cui lo spettro non è quello istantaneo, ma quello relativo ad un certo intervallo di tempo δT che ha un valore minimo legato alla max velocità di elaborazione dell'apparecchio e dal valore minimo di frequenza f_{\min} che si vuole analizzare.

$$\delta T \times f = 1$$

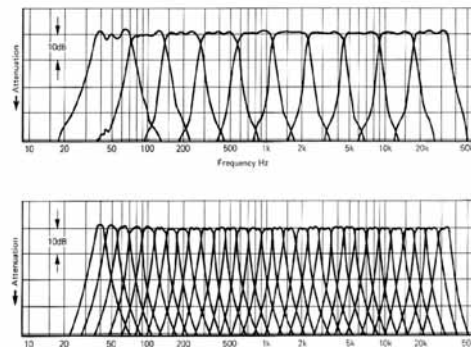
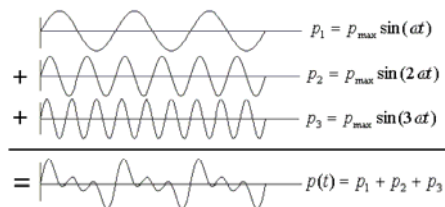


Figure 7. Octave and one third octave filters in a frequency analyser after Bruel & Kjaer

La trasformata di Fourier

Un'altra categoria di analizzatori di spettro è basata sul calcolo della trasformata di *Fourier*. Richiede processori molto veloci che effettuano il calcolo della trasformata discreta di *Fourier* sui campioni immagazzinati (FFT - *Fast Fourier Transform* si tratta di un metodo veloce di calcolo della DFT - *Discrete Fourier Transform*).

Il processo può essere praticamente svolto in tempo reale se il processore è molto veloce.



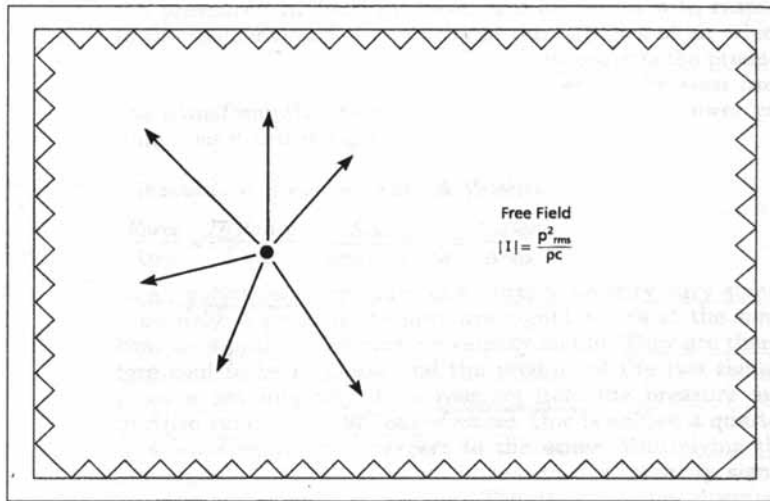
Registrazione su DAT o HD

A volte si può collegare il microfono ad un registratore su nastro, in modo da analizzare il rumore in un secondo tempo. È necessario un registratore Hi-Fi di tipo digitale per non introdurre troppi errori. È fondamentale il segnale di calibrazione all'inizio e alla fine della misura.

Oggi, con fonometri dotati di hard disk è possibile salvare direttamente il segnale audio.



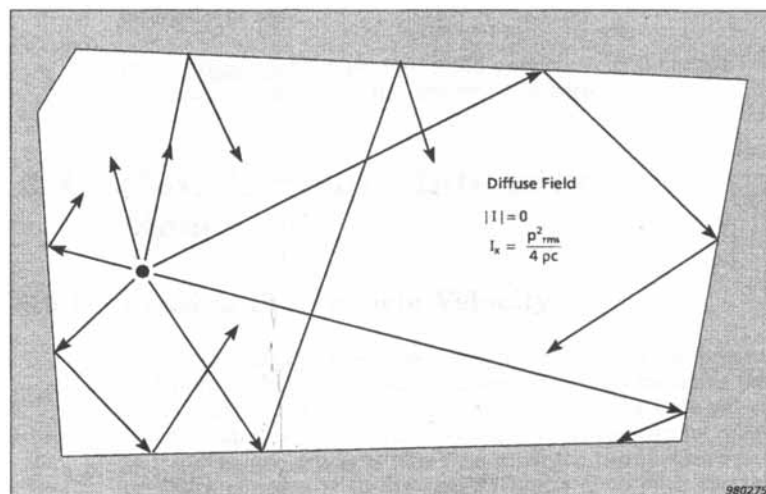
Campi acustici



La propagazione in campo libero è caratterizzata da una diminuzione di 6 dB nel livello di pressione ed intensità sonora, lungo la direzione di propagazione, ad ogni raddoppio della distanza.

La relazione tra pressione ed intensità sonora (in modulo) è ben definita.

Campi acustici



In campo diffuso l'intensità sonora netta in una direzione è nulla, ma la relazione tra intensità sonora in un verso e la pressione sonora è definita.

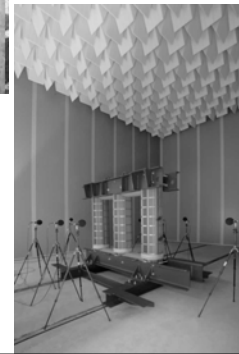
Campi acustici

Per effettuare correttamente alcune misure bisogna realizzare un ben preciso campo sonoro.

I due estremi sono il campo libero ed il campo diffuso. Il campo libero non si può ottenere all'aperto per l'entità rilevante dei disturbi.

Si opera allora in una camera anecoica, dove l'impiego massiccio di materiale fonoassorbente elimina sostanzialmente ogni riflessione sopra i 150 Hz. A volte camere grandi e costose arrivano fino a 50 Hz.

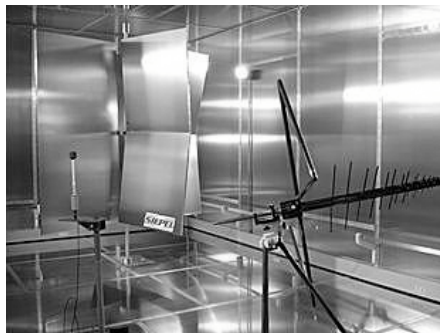
L'accesso alla camera è consentito da una rete metallica posta sopra il materiale fonoassorbente.



Campi acustici

Il campo diffuso viene ottenuto invece con una camera riverberante dove tutte le pareti hanno un coefficiente di assorbimento ridotto e la forma irregolare rende minima l'esaltazione di modi propri dell'ambiente.

Caratteristica comune a tutte le camere speciali è l'elevato isolamento acustico nei confronti del rumore esterno. Esso è ottenuto con pareti perimetrali di adeguata massa ed inoltre la camera anecoica è montata su supporti elastici sì che vengano attenuate le vibrazioni trasmesse dal suolo.



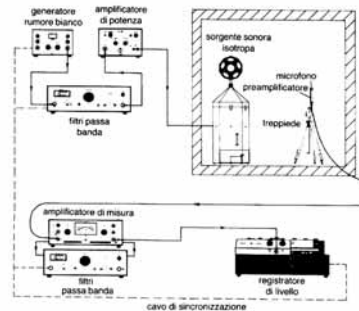
Misura del coefficiente di assorbimento

Si può rilevare in camera riverberante mediante la misura del tempo di riverberazione in presenza o in assenza del materiale fonoassorbente. Deve essere disponibile una superficie rettangolare fra 10 e 12 m² del materiale in prova ad almeno 1 m dalle pareti. Se α_m e τ_0 si riferiscono a stanza vuota si ha:

$$\tau_0 = 0,16 \frac{V}{\alpha_m S}$$

Se si pone nell'ambiente la superficie S_p di cui si vuole conoscere il coefficiente di assorbimento α_p , si determina il nuovo tempo di riverberazione τ .

$$\tau = 0,16 \frac{V}{(\alpha_m S + \alpha_p S_p)}$$



Misura del coefficiente di assorbimento

È facile trovare che:

$$\frac{\alpha_m S + \alpha_p S_p}{\alpha_m S} = \frac{\tau_0}{\tau}$$

$$\alpha_p S_p = \tau_0 \alpha_m S \left(\frac{1}{\tau} - \frac{1}{\tau_0} \right)$$

Il coefficiente di assorbimento cercato è dato allora da:

$$\alpha_p = 0,16 \frac{V}{S_p} \left(\frac{1}{\tau} - \frac{1}{\tau_0} \right)$$

Il coefficiente prende il nome di α_{Sab} e differisce dal coefficiente di assorbimento statistico, tanto che a volte è maggiore di 1. Sembra che il motivo principale sia la diffrazione dell'onda sonora ai bordi del pannello che si può minimizzare aumentando le dimensioni del pannello, ma perdendo approssimazione nella diffusività del campo.

Misura del tempo di riverberazione

I metodi utilizzabili sono quelli:

- dello sparo;
- dello spegnimento della sorgente sonora (oggi più diffuso).

Si misura il decadimento sonoro, banda per banda, di almeno 20 o 30 dB e si moltiplica tale intervallo temporale rispettivamente per 3 o per 2 per arrivare al valore del T_{60} .

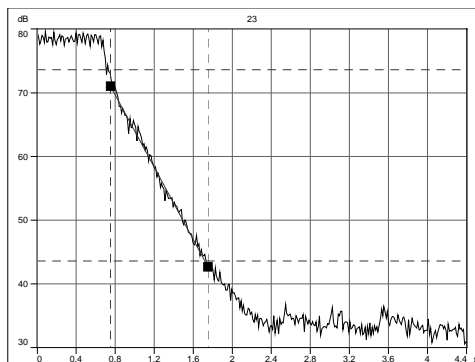
L'ipotesi è che il decadimento sia lineare.

I limiti nella misura sono dati dal rumore iniziale e dal rumore di fondo.

A 5.000 Hz:

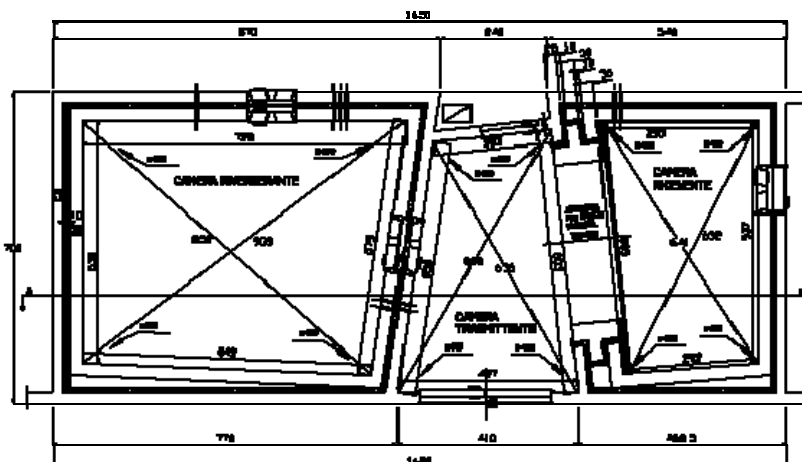
$$T_{30} \approx 1,7 - 0,8 = 0,9 \text{ s}$$

$$T_{60} \approx 0,9 \times 2 = 1,8 \text{ s}$$



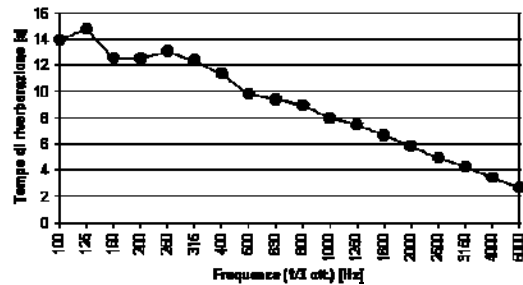
Misura del potere fonoisolante

Nella misura in laboratorio si devono avere due stanze completamente scollegate dal punto di vista strutturale e ben fonoisolate nei confronti dell'ambiente esterno, in modo che l'energia sonora si trasmetta soltanto attraverso il pannello in prova. Le stanze devono essere riverberanti (campo diffuso) di volume superiore a 50 m^3 .



Misura del potere fonoisolante

Tempi di riverberazione medi delle camere riverberanti
maggiora e camera vuota (rifuriti e T20)



Misura del potere fonoisolante

Il potere fonoisolante del tramezzo si ottiene da:

$$R = L_1 - L_2 + 10 \log \frac{S}{A}$$

S è l'area del divisorio in prova ed A è l'assorbimento nella stanza ricevente.

Infatti, il divisorio in prova si comporta come una sorgente sonora di area S , per cui la potenza sonora emessa è:

$$W = I_2 S$$

dove I_2 è l'intensità trasmessa dal divisorio.

Misura del potere fonoisolante

L'intensità I_2 si può calcolare a partire dal coefficiente di trasmissione del divisorio t e dall'intensità incidente I_1 :

$$I_2 = t \cdot I_1$$

Se α non è troppo elevato, si può porre $R=A$, per cui:

$$p_2^2 = \rho c W \frac{4}{R} \approx \rho c W \frac{4}{A}$$

Se si ricorda che in campo diffuso vale:

$$I_1 = \frac{p_1^2}{4\rho c}$$

pertanto:

$$p_2^2 = \rho c I_2 S \frac{4}{A} = \rho c t I_1 S \frac{4}{A} = t p_1^2 \frac{S}{A}$$

$$L_1 - L_2 = 10 \log \frac{p_1^2}{p_2^2} = 10 \log \frac{A}{tS} = 10 \log \frac{1}{t} + 10 \log \frac{A}{S}$$

Misura del potere fonoisolante

Ecco che per la misura *in laboratorio* (camere riverberanti, assenza di cammini di trasmissione laterali e rumore di fondo trascurabile) è possibile calcolare il potere fonoisolante del divisorio a partire da misure di livello di pressione e tempo di riverberazione.

Nella misura del potere fonoisolante *in opera* anzitutto bisogna tener conto del contributo del rumore di fondo nell'ambiente ricevente e soprattutto il valore calcolato sarà influenzato dalle condizioni di non perfetta riverberazione, ma soprattutto dalla presenza di cammini di trasmissione laterali (pareti laterali, soffitto, pavimento).

Ecco che allora si parla di potere fonoisolante *apparente* per ricordare che il valore misurato si riferisce alla partizione in senso lato e non solo al divisorio di separazione:

$$R' = L_1 - L_2^* + 10 \log \frac{S}{A}$$

Misura del fonoisolamento

Esistono altre grandezze per quantificare il fonoisolamento di un divisorio.

Il livello di fonoisolamento normalizzato con il potere fonoassorbente è definito da:

$$D_n = L_1 - L_2^* + 10 \log \frac{A_0}{A}$$

A è l'assorbimento totale dell'ambiente ricevente e A_0 è un assorbimento di riferimento pari a 10 m^2 .

Misura del fonoisolamento

Il livello di fonoisolamento normalizzato con il tempo di riverberazione è definito da:

$$D_{nT} = L_1 - L_2^* + 10 \log \frac{T}{T_0}$$

T è il tempo di riverberazione dell'ambiente ricevente e T_0 è un tempo di riverberazione di riferimento pari a $0,5 \text{ s}$.

I due livelli di fonoisolamento risultano uguali quando:

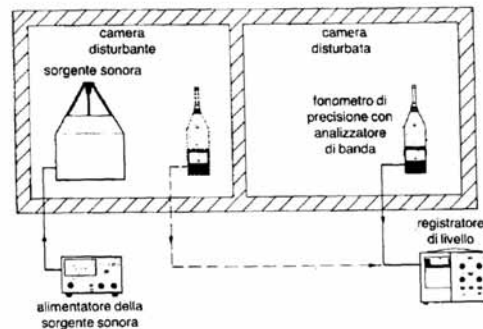
$$A_0 = 0,32 \cdot V$$

Misura del fonoisolamento

Se, ad esempio, si opera una misura a 2.000 Hz con $L_1=100$ dB e si misurano 60 dB nella stanza disturbata, per valutare il fonoisolamento bisogna conoscere la superficie del divisorio, ad esempio 6 m^2 , e il tempo di riverberazione della stanza disturbata, ad esempio 1,8 s. Il volume della stanza disturbata sia 50 m^3 e il rumore di fondo sia trascurabile.

A 2.000 Hz il potere fonoassorbente della stanza disturbata si calcola dalla relazione di Sabine:

$$A = 0,16 \frac{V}{T} = 4,5 \text{ m}^2$$



Misura del fonoisolamento

Il potere fonoisolante risulta:

$$R_{2000 \text{ Hz}} = 100 - 60 + 10 \log \frac{6}{4,5} = 41,2 \text{ dB}$$

Il livello di fonoisolamento normalizzato con il potere fonoassorbente risulta:

$$D_{n,2000 \text{ Hz}} = 100 - 60 + 10 \log \frac{10}{4,5} = 43,5 \text{ dB}$$

Il livello di fonoisolamento normalizzato con il tempo di riverberazione

$$D_{nT,2000 \text{ Hz}} = 100 - 60 + 10 \log \frac{1,8}{0,5} = 45,6 \text{ dB}$$

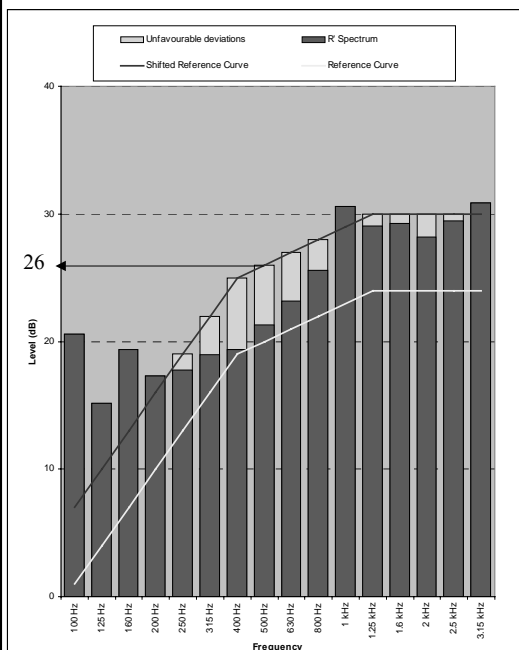
Misura del fonoisolamento

Naturalmente il calcolo va ripetuto per tutte le bande di ottava o terzo di ottava.

La valutazione del fonoisolamento di un divisorio con uno o l'altro dei 3 livelli dipende dall'applicazione e dalla normativa considerata. Certo è che R o R' meglio si presta a descrivere le effettive caratteristiche fonoimpedenti di un divisorio o di una partizione in senso lato. D_n e D_{nT} sono comunque usati anche nella legislazione nazionale.

Una volta noto il livello spettrale di R , D_n o D_{nT} è utile valutare univocamente il fonoisolamento di un divisorio con un numero: l'indice di valutazione.

Indice di valutazione del potere fonoisolante, R_w



Lo spettro del livello del potere fonoisolante va confrontato con un profilo di riferimento che riproduce l'andamento del livello di fonoisolamento di un divisorio giudicato ideale.

In banda di terzo di ottava, la curva di riferimento viene fatta salire a step di 1 dB fintantoché la somma delle differenze sfavorevoli (cioè tali che il livello di riferimento sia maggiore del livello misurato) sia minore di 32 dB. R_w è il valore che si legge a 500 Hz sulla curva di riferimento spostata in alto.

Indice di valutazione del livello di fonoisolamento

Stessa procedura vale per il calcolo dell'indice di valutazione del fonoisolamento normalizzato con il potere fonoassorbente, $D_{n,w}$, o dell'indice di valutazione del fonoisolamento normalizzato con il tempo di riverberazione, $D_{nT,w}$.

Sono questi i valori che vanno confrontati con i limiti imposti dalla legislazione o nei capitolati.

Possono essere corretti con dei fattori che tengano conto dei diversi spettri delle sorgenti di rumore (rumore rosa o bianco) e per valutare le curve di isolamento acustico con valori molto bassi in un'unica banda di frequenza.

Misura del fonoisolamento da rumore di calpestio

L'elemento fondamentale è la macchina normalizzata per il calpestio nella quale 5 martelli del peso di 0,5 kg, diametro 3 cm, estremità sferica di raggio 50 cm, posti in linea con un interasse di 10 cm vengono fatti cadere dall'altezza di 4 cm con un intervallo di 0,1 s. Per pavimento fragile è consentito un rivestimento in gomma di caratteristiche fissate.

La misura fonometrica del livello di rumore nell'ambiente disturbato L_2 permette di arrivare al livello di isolamento da rumore di calpestio normalizzato con il potere fonoassorbente:

$$L_n = L_2^* - 10 \log \frac{A_0}{A}$$

o normalizzato con il tempo di riverberazione:

$$L_{nT} = L_2^* - 10 \log \frac{T}{T_0}$$

Il valore è ovviamente tanto migliore quanto più è basso.

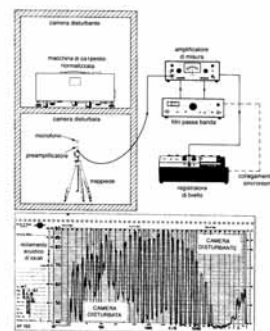
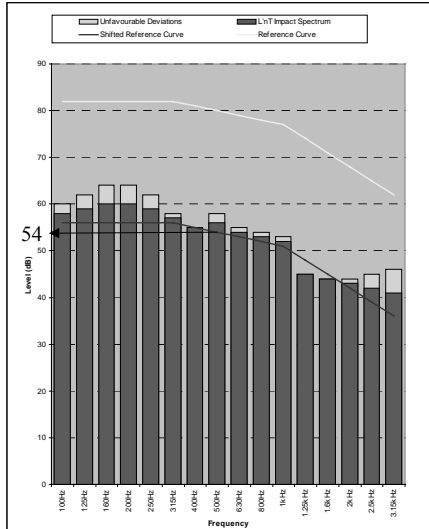


Fig. 2.76 - Disposizione sperimentale per la misura dell'incremento al calpestio (a) e risultati delle misure (b).

Indice di valutazione del livello di fonoisolamento da rumore di calpestio



Lo spettro del livello di L_n o L_{nT} va confrontato con un profilo di riferimento che riproduce l'andamento del livello di fonoisolamento da rumore di calpestio di un divisorio giudicato ideale.

In banda di terzo di ottava, la curva di riferimento viene fatta scendere a step di 1 dB fintantoché la somma delle differenze sfavorevoli (cioè tali che il livello di riferimento sia minore del livello misurato) sia minore di 32 dB. $L_{nT,w}$ o $L_{nT,w}$ è il valore che si legge a 500 Hz sulla curva di riferimento spostata in basso.

Misura della potenza sonora in camere speciali

Si può realizzare in camera anecoica con la classica relazione del campo libero:

$$L_p = L_W - 20 \log r - 11$$

Vi sono problemi all'aumentare della dimensione della sorgente sia per avere una camera di volumetria adeguata che per studiare la direzionalità o gli effetti del campo vicino.

Un'altra possibilità è la misura in camera riverberante da:

$$L_p = L_W + 10 \log \frac{4}{R}$$

Ove si conosca il tempo di riverberazione della camera si ha ($R=A$):

$$L_p = L_W + 10 \log \tau_0 - 10 \log V + 14$$

Non si è in grado di valutare la direzionalità e si hanno ancora limitazioni dovute alle dimensioni.

Come si misura la potenza sonora?

È necessario sapere *quanto* rumore è irradiato e *da quale* sorgente sonora

È necessario conoscere la *potenza sonora* della sorgente sonora

La misura tradizionale:

calcolo della potenza sonora attraverso misure di *pressione sonora*

- restrizioni sul campo acustico: controllo sul rumore residuo
- ambiente controllato: camere anecoiche o riverberanti, campo semi-libero

La misura intensimetrica:

calcolo della potenza sonora attraverso misure di *intensità sonora*

- il rumore residuo può essere anche 10 dB superiore
- misura sul campo

Misura della potenza sonora tramite intensimetria

L'energia sonora irradiata da una sorgente si propaga nello spazio in superfici via via più grandi. Se si immagina di racchiudere la sorgente in una superficie fittizia S , la potenza sonora W può essere calcolata dal seguente integrale:

$$W = \int_S \bar{I} \cdot \overline{dS}$$

È possibile dividere la superficie fittizia in sottosegmenti di area S_i e la potenza sonora può essere calcolata da una semplice sommatoria che li comprenda tutti:

$$W = \sum_i I_i S_i$$

dove I_i è la componente normale dell'intensità sonora mediata sull' i -esimo sottosegmento.

La misura dell'intensità sonora

Il vettore intensità sonora è pari al prodotto della pressione acustica per il vettore velocità di oscillazione:

Intensità istantanea

È possibile effettuare la verifica dimensionale:

L'equazione di Newton

Se si considera un volume d'aria, l'equazione che ne descrive lo stato lungo la direzione x è:

La variazione della forza esercitata lungo x , introduce un'accelerazione a_x al sistema di massa m :

cioè:

In definitiva:

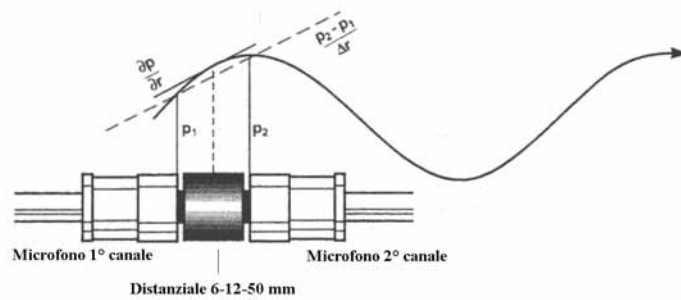
La relazione di Eulero

Lungo una generica direzione r è possibile scrivere:

e integrando nel tempo:

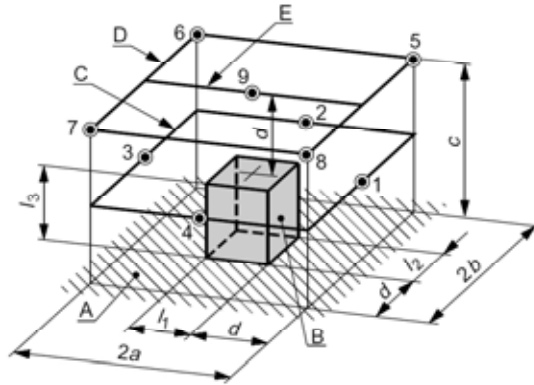
In definitiva, la misura della velocità di oscillazione della particella d'aria è una misura indiretta: è necessario, cioè, integrare nel tempo la misura della variazione di pressione lungo r .

La sonda intensimetrica

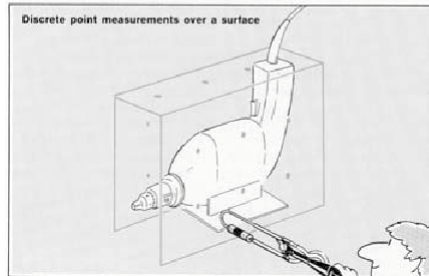
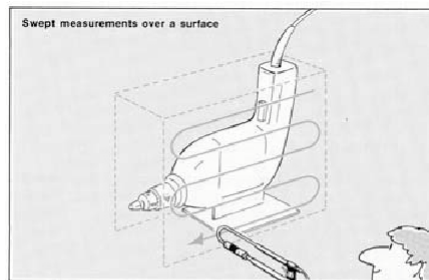


Misura della potenza sonora sul campo

La superficie fittizia di misurazione di area S che racchiude la sorgente può essere emisferica o un parallelepipedo rettangolare. Nel secondo caso la distanza tra la superficie e la sorgente deve essere almeno 0,25 m (meglio 1 m): le postazioni microfoniche si trovano nel centro e in ogni angolo di ciascuna area parziale con lato di lunghezza massima pari a $3d$.



La misura della potenza sonora: per punti discreti e per scansione

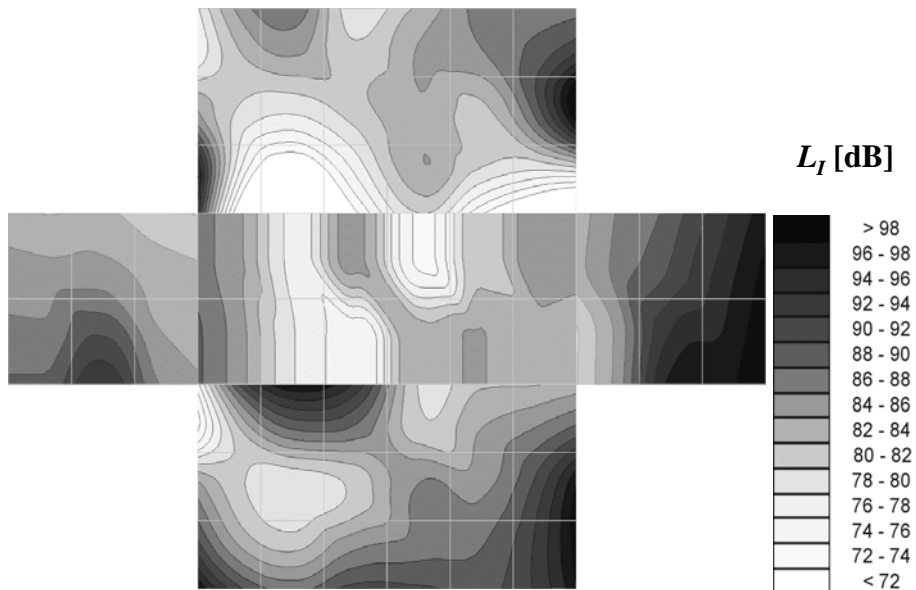


La misura della potenza sonora: esempio



Gruppo elettrogeno
Motore diesel: 6 cilindri in linea, cilindrata 8,1 l
Potenza elettrica: 176 kW

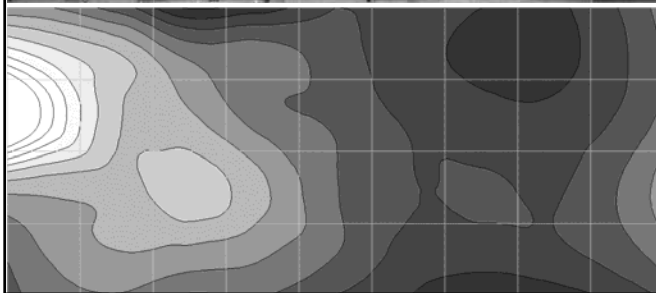
La misura della potenza sonora: esempio



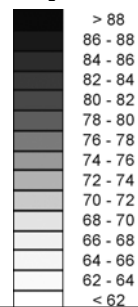
Livello di potenza sonora globale, $L_w(A) = 94,9$ dB(A)

Localizzazione della sorgente: esempio

**Unità di trattamento aria. Portata d'aria trattata: 21.700 m³/h
2 ventilatori centrifughi a doppia aspirazione**

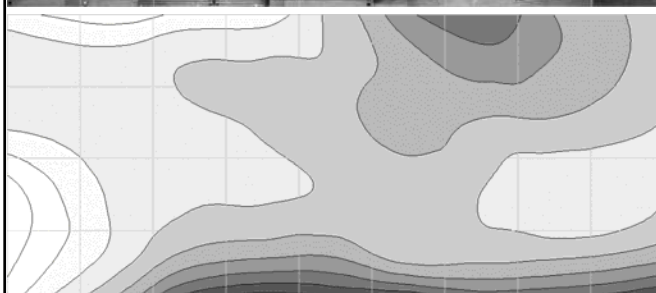


L_T [dB]

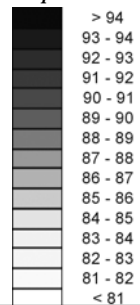


Localizzazione della sorgente: esempio

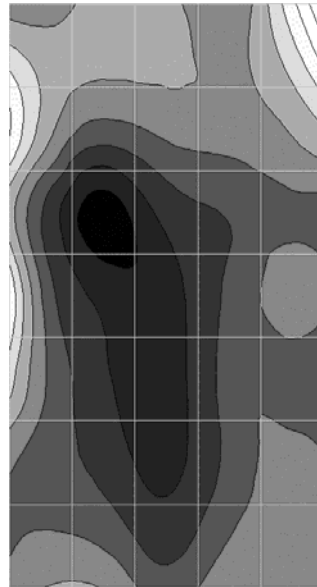
**Unità di trattamento aria. Portata d'aria trattata: 21.700 m³/h
2 ventilatori centrifughi a doppia aspirazione**



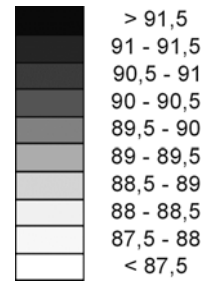
L_p [dB]



Mappatura intensimetrica

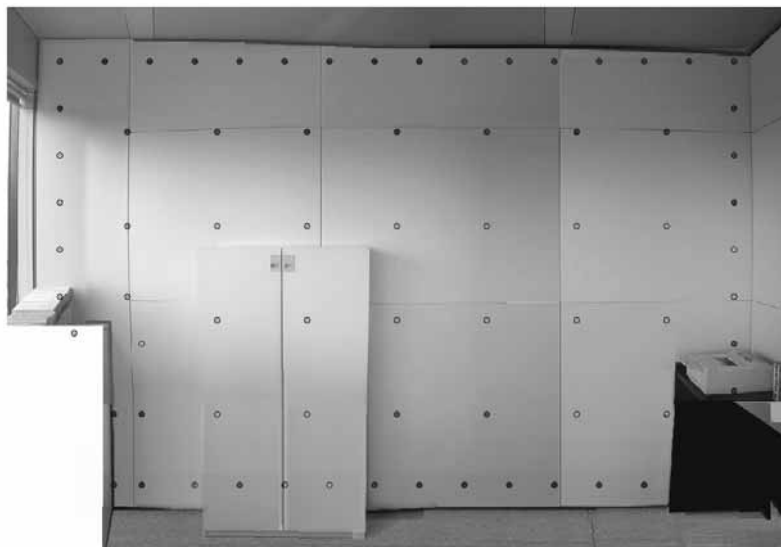


L_T [dB]

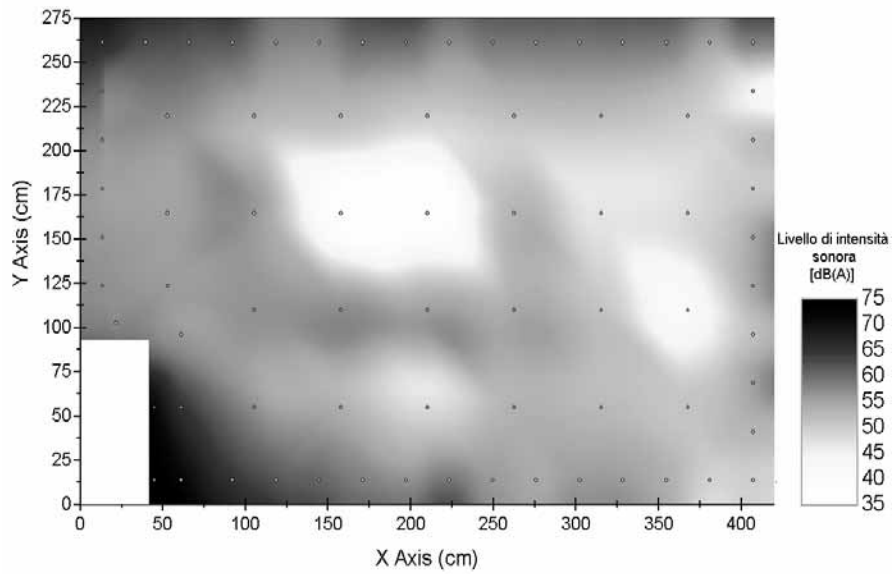


Calcolo del potere fonoisolante con il metodo intensimetrico

Parete divisoria, $R_w = 25$ dB



Calcolo del potere fonoisolante con il metodo intensimetrico



$$S = 11,6 \text{ m}^2 \quad P_{\text{tr}} = 6,6 \text{ } \mu\text{W}$$