

METODO SPERIMENTALE PER LA VALUTAZIONE DELLA ATTENUAZIONE DELLE CUFFIE

Spazian Marco

Tecnico Acustico Ambientale

1 PREMESSA

La presente relazione riporta un metodo per la verifica sperimentale della reale attenuazione delle cuffie antirumore. Lo scopo di tale elaborato non è fornire un giudizio sulla bontà dei prodotti in commercio, ma intende fornire un modo per ottenere un valore di esposizione al rumore che sia il più prossimo possibile a quello alla quale realmente è soggetto un lavoratore sottoposto a stress acustico.

Per poter supportare la metodologia illustrata, si sono riportate le teorie fisiche su cui si basa il funzionamento del sistema, ed di seguito si sono riportati i risultati ottenuti con varie tipologie di rumore e i confronti con le metodologie tradizionali.

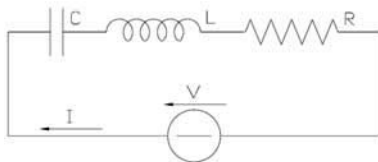
2 TEORIA ACUSTICA DI SUPPORTO

2.1 METODO ANALITICO PER LO STUDIO DELLA PROPAGAZIONE DELL'ONDA ACUSTICA

2.1.1 Schema elettrico equivalente ad un sistema meccanico vibrante

Prendendo in esame un sistema costituito da una massa M , vincolata ad un punto fisso tramite una molla, di costante elastica K , in presenza di fenomeni dissipativi di tipo viscoso, è possibile definire impedenza meccanica come il rapporto tra la forza meccanica F e la velocità di vibrazione v . È quindi possibile definire le relazioni:

$$F = M \frac{du}{dt} + R_m u + \frac{1}{C_m} \int_0^t u dt \quad \text{simile a} \quad V = L \frac{di}{dt} + Ri + \frac{1}{C} \int_0^t i dt$$



Ponendo Forza impressa $F =$ Tensione impressa V , velocità con cui si muovono i nodi $v =$ corrente elettrica i , massa $M =$ induttanza L , costante di elasticità della molla $C_m =$ capacità elettrica C , resistenza meccanica $R_m =$ resistenza elettrica R .

In base alla analogia elettromeccanica, lo studio di un sistema meccanico vibrante, come un sistema acustico, può essere

ricondotto allo studio di un sistema elettrico; argomento estremamente studiato e modellizzato.

2.1.2 Impedenza acustica

L'impedenza acustica è una grandezza complessa (cioè dotata di parte reale e parte immaginaria), data dal rapporto tra la pressione acustica [Pa] e la velocità di volume [m^3/s] delle particelle di fluido indotta dal passaggio dell'onda, entrambe in rappresentazione complessa. L'impedenza acustica sintetizza le caratteristiche di un sistema acustico proprio come l'impedenza elettrica sintetizza le caratteristiche di un circuito elettrico. Infatti, la parte reale dell'impedenza acustica dipende dall'attitudine del sistema a dissipare energia acustica, mentre la parte immaginaria indica la capacità del sistema di immagazzinare energia acustica e di restituirla sfasata. In acustica vengono anche usate l'impedenza acustica specifica, l'impedenza acustica caratteristica e l'impedenza di radiazione.

In perfetta analogia con l'elettrotecnica, il modulo e la relativa fase dell'impedenza acustica, dipende oltre dalla natura del materiale sede del passaggio del flusso fonico, anche dal tipo di spettro dello stesso. Questo in quanto l'energia immagazzinata dalle "reattanze acustiche", è funzione della pulsazione della grandezza acustica attraversante.

Nell'applicazione sviluppata nel corso di questa relazione, ovvero considerando uno spettro di rumore tipicamente industriale, l'impedenza acustica dei muri e delle vetrate, usata per definire l'attenuazione delle sorgenti di emissione acustica situate all'interno dei locali ha valori tipici pari a:

- $10 \div 30$ dB(A) per muri;
- $5 \div 8$ dB(A) per vetrate.

2.1.3 Campo Scalare

Si dice che una grandezza fisica ha carattere *scalare* quando essa è completamente rappresentata da un *numero invariante rispetto a qualunque cambiamento del sistema di riferimento*. Sono esempi di grandezze scalari la temperatura, la massa, la carica elettrica e tutte quelle grandezze in cui è possibile definire in maniera univoca un valore numerico reale.

Si dice che in una regione di spazio è presente un campo scalare $s(\mathbf{R})$ quando in ogni punto dello spazio è possibile definire una grandezza scalare univoca.

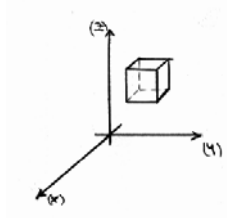
Il propagarsi di un'onda acustica da una sorgente fino all'infinito crea nello spazio attorno alla sorgente un campo scalare del tutto simile ad un campo elettrico o ad un campo di temperatura; ne sono conferma le ben note curve isofoniche, le quali di fatto rappresentano delle *curve di livello* del campo acustico.

Quindi anche per il campo acustico è possibile applicare tutta la branca di Analisi Matematica applicabile per i campi scalari.

2.1.4 Equazione di propagazione

Se in un punto o in una ristretta regione di un mezzo elastico omogeneo ed isotropo si determina una variazione di pressione questa si propaga in tutte le direzioni, dando luogo ad onde sferiche con centro nella sorgente di perturbazione. Se il mezzo può considerarsi perfetto, ossia non si producono forze di attrito durante il moto

delle sue particelle, si hanno soltanto onde longitudinali, ossia il moto delle singole particelle si svolge esclusivamente lungo la direzione di propagazione delle onde.



Si consideri allora un elemento di volume $dx-dy-dz$ appartenente ad un mezzo omogeneo, isotropo e non dissipativo. Per questo volume elementare occorre esprimere le equazioni del moto e l'equazione di continuità valevoli per qualunque problema di propagazione delle onde elastiche. Poiché il mezzo di propagazione è un fluido comprimibile, occorre considerare una terza equazione che

tiene conto della trasformazione termodinamica.

Le grandezze in gioco sono:

- $\Delta P(t)$ pressione acustica
- $u(t)$ velocità delle particelle nel mezzo
- $\Delta \rho(t)$ variazione della densità del mezzo
- ρ_0 densità del mezzo a riposo

L'impostazione del problema comporta tre passi successivi:

- equazione della dinamica esprime l'equilibrio tra le forze agenti sull'elemento di volume, trascurando gli effetti della viscosità.

$$\vec{F} = m\vec{a} \quad \text{settorialmente:} \quad \text{grad}\Delta P = -\rho_0 \frac{\partial \vec{u}}{\partial t} \quad (1)$$

- equazione di continuità (o di conservazione della massa), la quale esprime come la differenza fra la massa che entra e la massa che esce dall'elemento di volume nell'intervallo di tempo dt sia eguale alla variazione della massa contenuta, settorialmente:

$$\frac{\partial \Delta \rho}{\partial t} = -\rho_0 \text{div} \vec{u}$$

- equazione di stato (trasformazione termodinamica), per la rapidità con cui si susseguono le oscillazioni di pressione e per l'ipotizzata assenza di attrito, è di tipo adiabatico e quindi descritta dall'equazione:

$$p v^\gamma = \text{cost} \quad \text{oppure} \quad \frac{p}{\rho^k} = \text{cost}$$

dove abbiamo $\gamma = \frac{c_p}{c_v}$, poniamo: $p = p_0 + \Delta p$ con $\Delta p \ll p_0$
 $\rho = \rho_0 + \Delta \rho$ con $\Delta \rho \ll \rho_0$

sapendo che $\frac{p}{p_0} = \left(\frac{\rho}{\rho_0}\right)^k$, derivando ottengo $\frac{\Delta p}{p_0} \cong k \frac{\Delta \rho}{\rho_0}$

Inoltre $\frac{\partial \Delta p}{\partial t} = c^2 \frac{\partial \Delta \rho}{\partial t}$ da cui ottengo $c^2 = \gamma \frac{p_0}{\rho_0}$

Dalle tre equazioni precedenti si ottiene l'equazione di Laplace ed analoghe:

$$\nabla^2 \Delta p = \frac{1}{c^2} \frac{\partial^2 \Delta p}{\partial t^2}; \quad \nabla^2 \Delta \rho = \frac{1}{c^2} \frac{\partial^2 \Delta \rho}{\partial t^2}; \quad \nabla^2 \vec{u} = \frac{1}{c^2} \frac{\partial^2 \vec{u}}{\partial t^2}$$

La soluzione generale dell'equazione di Laplace è data dalla combinazione lineare di due funzioni arbitrarie, una di $t - \frac{P(x,y,z)}{c}$ e l'altra di $t + \frac{P(x,y,z)}{c}$ ove

$P(x,y,z)$ rappresenta un generico punto dello spazio cartesiano considerato. Ad esempio, facendo riferimento all'equazione in cui compare la pressione acustica, nel caso in cui la dipendenza spaziale sia funzione di una sola coordinata x :

$$\Delta p(x,t) = F_1\left(t - \frac{x}{c}\right) + F_2\left(t + \frac{x}{c}\right)$$

Le funzioni F_1 e F_2 dipendono dalle condizioni al contorno e rappresentano due onde che si propagano la prima nel senso delle x positive mentre la seconda in quello delle x negative in direzione ortogonale alla superficie della sorgente. La grandezza c rappresenta la velocità con cui si propaga l'onda di pressione nel mezzo (velocità del suono nel mezzo considerato).

$c = \sqrt{\gamma \frac{p_0}{\rho_0}}$ La velocità di propagazione nel mezzo definisce in modo univoco l'impedenza acustica. Se il mezzo di propagazione ha caratteristiche inerziali o elastiche, oltre alla variazione della velocità di propagazione, varia anche la fase tra ingresso e uscita.

Soluzioni di particolare importanza si ottengono quando le due funzioni F_1 e F_2 sono di tipo esponenziale con argomento immaginario.

Supponendo che il mezzo sia un gas perfetto, l'equazione di stato $pV = RT$ permette di scrivere:

$$c = \sqrt{\gamma \frac{RT}{M}} \quad \text{ove:} \quad \gamma = \frac{c_p}{c_v}, \quad R \text{ è la costante dei gas, } T \text{ è la temperatura assoluta,}$$

M è la massa molare.

Sostituendo i valori numerici si trova: $c = 331,4 + 0,6t$ m/s

in aria secca $t = 20$ °C ho $c = 343,4$ m/s

2.1.5 Calcolo dei livelli di potenza sonora delle sorgenti di rumore mediante il metodo intensimetrico

La potenza sonora emessa da una sorgente ha un valore uguale all'integrale del prodotto scalare del vettore intensità sonora per il vettore della superficie elementare associata, individuata su qualunque superficie che circonda completamente la sorgente.

$$P = \oint_S \langle \vec{I}, \vec{n} \rangle dS \quad [\text{W}]$$

Tale valore è la misura della potenza sonora emessa direttamente nell'aria da tutte le sorgenti comprese entro la superficie stessa.

Integrando nel tempo la potenza sonora P , si ottiene l'energia irradiata sotto forma acustica.

$$W_s = \int_0^t P(t) dt \quad [J]$$

Da tale grandezza, mediante il principio della conservazione della energia, è possibile ipotizzare che la potenza sonora P, sia di valore costante all'interno di qualsiasi superficie chiusa che ingloba la sorgente.

2.1.6 Metodi matematici di analisi numerica o metodi numerici

Dopo aver dimostrato la possibilità di applicare il campo scalare all'acustica, per ottenere la definizione dei *livelli sonori* di un piano posto all'altezza di 1,5 m, come definito dalle norme UNI, si ricorre alla definizione del Potenziale Acustico "R" mediante la definizione di due funzioni:

Il Laplaciano:

$$\frac{\partial^2 R}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 R}{\partial y^2} = 0$$

Il Laplaciano con la condizione di Poisson:

$$\frac{\partial^2 R}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 R}{\partial y^2} = -P$$

dove:

"R" è il potenziale acustico che da luogo alle curve isofoniche;

$\frac{\partial^2}{\partial x^2}$ è la derivata parziale lungo il versore preso come sistema di riferimento;

"P" è il potenziale noto della sorgente.

Nota il valore di rumorosità di fondo, definibile matematicamente come *condizione al contorno di Dirichelet*, è possibile definire in modo univoco tutti i potenziali acustici dell'area presa in esame.

I *Metodi Numerici* sono i metodi che effettivamente vengono usati nella maggior parte dei casi quando si vogliono risolvere dei problemi, su campi scalari, avendo i valori delle sorgenti (condizione di Newman) e i valori del contorno (condizione di Dirichelet).

Il Metodo Numerico più diffuso è quello alle *Differenze Finite*.

Tale metodo si basa sulla interazione di valori posti sui lati di quadrato equilatero.

Il valore di n è dato dall'espressione:

$$n = (a + b + c + d)/4$$

Per avere risultati eccellenti è sufficiente utilizzare un sistema di calcolo computerizzato e imporre uno scarto tra una iterazione e quella precedente pari a $d = 0,0001$. Così facendo si ottiene un errore di d^4 .

2.1.7 Metodi grafici di analisi

La rappresentazione grafica della risposta armonica di un rumore, viene effettuata con speciali diagrammi; fra questi sono di largo uso i "Diagrammi di Bode" o "Diagrammi Logaritmici di Risposta Armonica". Essendo la funzione di risposta armonica a valori complessi, si impiegano due diversi diagrammi, uno dei quali detto Diagramma delle Ampiezze o dei moduli riporta il logaritmo del modulo della risposta armonica, in funzione del logaritmo della frequenza e l'altro riporta

l'argomento della risposta armonica, sempre in funzione del logaritmo della frequenza. In acustica il diagramma dei moduli si ricava direttamente dallo specchio delle misure ambientali, mentre, per il diagramma delle fasi, si può ricorrere alla nota "Formula di Bode":

$$\beta_c = \frac{1}{\pi} \int_{-\infty}^{\infty} \frac{d\alpha}{du} \ln \cot \operatorname{anh} \left| \frac{u}{2} \right| du$$

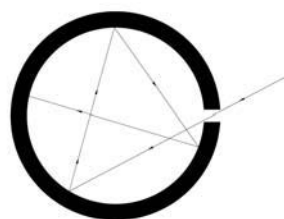
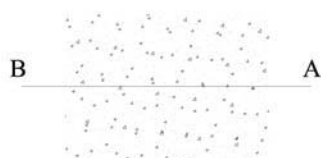
Dove ho posto α = Modulo di risposta armonica in dB; $u = \log f - \log f_c$ la quale partendo dai valori dei moduli è in grado di elaborare gli angoli.

3 METODO SPERIMENTALE PER LA VALUTAZIONE DELLA ATTENUAZIONE DELLE CUFFIE

Questo metodo, cuore della presente relazione, permette di valutare l'efficienza dei DPI uditivi e il rispetto del valore limite di esposizione.

3.1 TEORIE SU CUI SI BASA IL PRINCIPIO

Da un punto di vista ingegneristico, il rumore può essere visto, mediante le trasformate di Fourier, come la somma di infinite funzioni sinusoidali aventi frequenze partenti dallo zero e terminanti all'infinito. Ognuna di queste componenti sinusoidali, introducendo una rappresentazione nel piano complesso o di Gauss, può essere definita con un modulo ed una fase. Il rumore in un certo istante e in una certa posizione di uno spazio ben definito (Spazio Euclideo), è dato dalla somma di infiniti termini complessi. Ogni singolo termine, grazie al principio della sovrapposizione degli effetti, fornisce un contributo in funzione dell'impedenza acustica incontrata lungo il cammino spaziale.



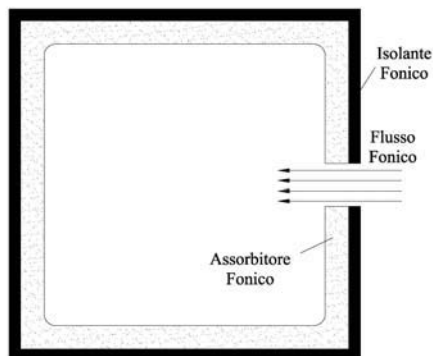
Analizzando di ogni singolo termine l'evoluzione in ampiezza e fase durante il cammino da un punto A ad un punto B, è possibile determinare il valore dell'impedenza acustica il quale ci può fornire il valore della **reale attenuazione acustica** di un qualsiasi mezzo posto tra i punti A e B.

Un'altra importante teoria per la definizione di questo metodo è il principio del "Corpo nero di Kirchhoff", ovvero un corpo che assorbe tutta l'onda energetica che lo investe; teoria che è ben approssimata da una cavità racchiusa da pareti totalmente assorbenti con un foro avente diametro tarato sull'onda incidente, in cui la totalità delle onde che entrano all'interno tramite il foro non riescono più ad uscire, in quanto totalmente

assorbite dalla pareti della cavità.

Unendo questi due principi della fisica e tarando il tutto sui fenomeni acustici, si può introdurre un nuovo strumento chiamato "Cubo di Kirchhoff", che basandosi sul

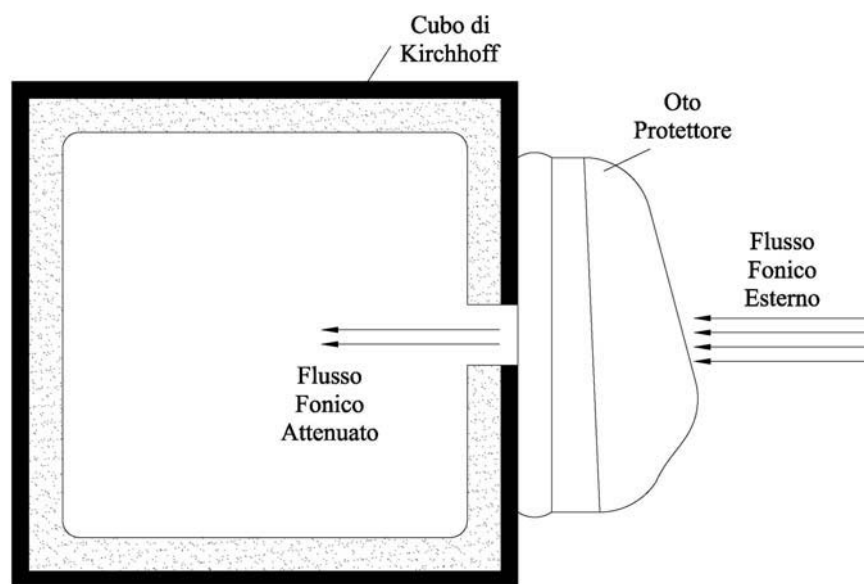
principio del omonimo corpo nero, permette di avere un luogo in cui sia possibile ottenere un flusso fonico unidirezionale, ovvero dall'esterno verso l'interno. Questo strumento, isolato di fatto un tubo di flusso fonico, il quale può essere visto come un generatore di corrente elettrica ideale.



Applicando a questo generatore di corrente, avete la caratteristica di possedere una varietà di frequenze di correnti vibranti, diverse impedenze incognite, è possibile descrivere per ognuna di esse la risposta al variare della pulsazione delle armoniche.

Rientrando nel campo acustico e nel tema della relazione, il cubo di Kirchhoff, semplicemente applicando una conchiglia della cuffia sull'ingresso del foro, può

essere usato per analizzare la risposta alle varie armoniche del protettore auricolare, ottenendo di fatto il **reale valore di rumore** a cui è sottoposto il timpano di chi le indossa.



In questo modo, inserisco una impedenza, il cui valore è funzione della frequenza dell'onda incidente, in serie al flusso fonico. È quindi possibile studiare l'attenuazione della cuffia con metodi noti in campo elettrotecnico.

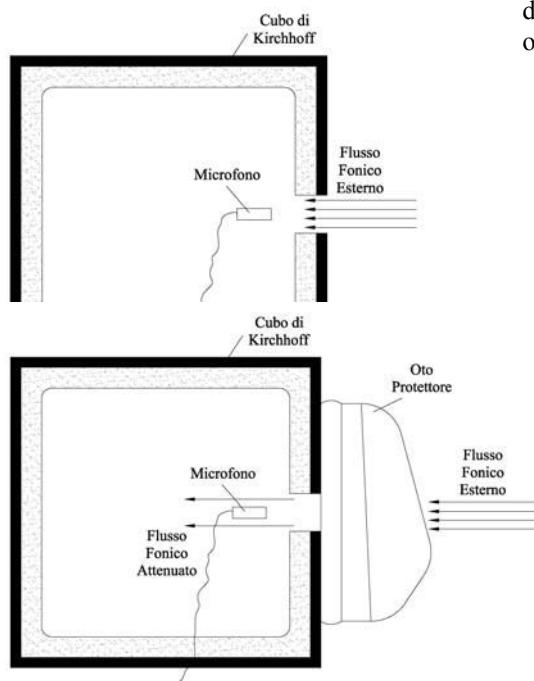
3.2 METODO PRATICO PER LA DETERMINAZIONE DELLA ATTENUAZIONE

L'introduzione di questo metodo permette oltre all'analisi di spettro, anche la semplice e diretta determinazione del valore di attenuazione in dB(A).

Ponendo come condizione necessaria e sufficiente alla corretta esecuzione delle prove, che la sorgente acustica non vari in alcun modo durante i rilevamenti, tale da poter considerare costante in spettro il flusso fonico esterno, fissato un tempo di campionamento significativo, si procede prima al campionamento senza la cuffia, in modo da ottenere lo spettro del flusso fonico esterno entrante, e il valore di riferimento in dB(A); successivamente si applica la cuffia, assicurandosi la totale aderenza e la normale forza di compressione delle conchiglie sulla superficie del cubo, come se fosse indossata da un operatore, ottenendo lo spettro attenuato e il valore in dB(A) con le cuffie indossate.

Con la prima misurazione rileviamo il flusso fonico a cui il timpano

dell'operatore è soggetto senza otoprotettori



Con la seconda misurazione ottengo il valore del flusso fonico che realmente arriva all'operatore con indossato l'otoprotettore.

Va evidenziato che la scelta della forma di un cubo oltre a garantire la dissipazione delle onde di flusso fonico entranti, garantisce, dimensionato opportunamente il lato, la pressione a cui normalmente è soggetto

l'operatore durante l'uso della cuffia, rendendo maggiormente realistica la misura.

3.3 ANALISI DEI RISULTATI OTTENUTI

Terminate le prove, la misura di quanto richiesto all'art.193 del DLgs.81/2008, ovvero la verifica dell'efficacia dei dispositivi di protezione individuale dell'udito, l'efficienza dei DPI uditivi e il rispetto del valore limite di esposizione, poiché solitamente i valori misurati sono in dB(A) o comunque in dB, per la nota proprietà dei logaritmi, abbiamo che il valore di attenuazione delle cuffie è dato da:

$$L_{cf} = L_{misA} - L_{misB} \quad [\text{dB(A)}]$$

Dove L_{cf} è il valore di attenuazione delle cuffie in dB(A), L_{misA} è la misura senza cuffie applicate in dB(A), L_{misB} è la misura effettuata con le cuffie indossate in dB(A).

La misura di quanto è esposto il lavoratore con le cuffie indossate è data dalla misura effettuata sullo stesso luogo di lavoro con metodologia tradizionale (in dB(A)), L_0 , sottratto il valore calcolato di attenuazione delle cuffie (in dB(A)), L_{cf} .

$$L_{EX} = L_0 - L_{cf} \quad [\text{dB(A)}]$$

È importante sottolineare che poiché gli spettri di rumore variano, varia anche il valore della attenuazione, per cui se esistono “n” luoghi con “n” spettri, devo avere di conseguenza “n” attenuazioni.

In fine, per l’analisi del perché gli otoprotettori varino in modo consistente i valori di attenuazione in funzione degli spettri, è necessario uno studio della funzione di risposta armonica, in cui i valori dei moduli sono ricavati dallo spettro misurato e i valori delle fasi sono elaborati mediante la “Formula di Bode”.

4 PROVE EFFETTUATE A SUPPORTO DELLA TEORIA ENUNCIATA

4.1 SCELTA DELLE CUFFIE TESTATE

La scelta dei otoprotettori testati è stata fatta in base ad un’analisi di mercato, ovvero si è scelto i prodotti che potevano soddisfare criteri di confort, ergonomia ed attenuazione acustica.

Al fine di non recare danno o di non fare pubblicità ad alcun prodotto, si riportano in modo anonimo le caratteristiche dichiarate dal costruttore dei due prodotti testati:

- Cuffia A

Frequency	125	250	500	1000	2000	4000	8000	H	M	L	SNR
APV	12.9	17.8	29.8	37.4	33.8	31.2	37.8	34 dB	29 dB	20 dB	31 dB

- Cuffia B

Frequency	125	250	500	1000	2000	4000	8000	H	M	L	SNR
APV	15.3	22.1	32.7	39.3	37.8	43	40	40 dB	32 dB	23 dB	35 dB

4.2 MODALITÀ DI ESECUZIONE DELLE PROVE

La modalità di esecuzione delle prove è stata quella di effettuare per ogni rilievo, tre misure:

- la prima misura è stata effettuata con il solo cubo senza cuffie applicate; in questo modo si è potuto rilevare il flusso fonico entrante;
- la seconda misura è stata effettuata ponendo sul cubo la Cuffia A;
- la terza misura è stata effettuata ponendo sul cubo la Cuffia B.

Questa metodologia è stata applicata per tutte le prove effettuate che sono state:

- rumore generato dal taglio con flessibile elettrico portatile;

- rumore generato dalla lucidatura con flessibile elettrico portatile;
- rumore generato dal battito sull'incudine di un martello durante una operazione su di una lamiera;
- rumore generato da una linea di produzione industriale;
- rumore generato da un gruppo di generazione elettrica.

Per ogni misura sono stati effettuati diversi campionamenti, i quali non hanno dato valori apprezzabili di scostamento, ovvero i campionamenti ripetuti nel medesimo posto hanno dato risultati pressoché identici.

Vista la tipologia delle prove e la caratteristica delle sorgenti, i tempi di campionamento sono stati i minimi citati nel paragrafo 5.5 dalla UNI 9432.

Per quanto riguarda la strumentazione, si è usato un fonometro integratore in classe 1 con filtri a terzi di ottava, opportunamente tarato e calibrato prima e dopo ogni misura.

4.3 RISULTATI

Sono riportati di seguito i risultati ottenuti riportati in una tabella riassuntiva. Chiude il paragrafo una serie di grafici elaborati per confrontare le misure.

4.3.1 Rumore generato dal taglio con flessibile elettrico portatile

Valori di esposizione con i metodi riportati nella UNI EN ISO 4869-2, valori espressi in dB(A)

	Metodo OBM	HML	SNR
Cuffia A	54	61	61.7
Cuffia B	50	56	57.7

Valori misurati con il Cubo di Kirchhoff:

Rilievi fonometro	Solo cubo con il flessibile	Valore di esposizione con cuffia A applicata e taglio con il flessibile	Valore di esposizione con cuffia A applicata e taglio con il flessibile	Attenuaz. Cuffia A	Attenuaz. Cuffia B
L_{Aeq}	93.5	78.0	76.6	-15.5	-16.9
L_{Ceq}	92.7	78.3	79.4	-14.4	-13.3
L_{Cpicco}	107.2	90.9	89.6	-16.3	-17.6
L_{90}	91.7	77.0	75.2	-14.7	-16.5
$L_{eq Z}$	93.3	79.0	79.5	-14.3	-13.8

Valori misurati con il Cubo di Kirchhoff in terzi di ottava, espressi in dB:

Freq. spettro	Solo cubo con il flessibile	Cuffia A applicata taglio con il flessibile	Cuffia B applicata taglio con il flessibile	Attenuaz. Cuffia A	Attenuaz. Cuffia B
16	53.4	55.4	56.4	2	3
20	49.1	52.5	57.5	3.4	8.4
25	53.8	56.2	62.6	2.4	8.8
32	50.4	55.0	66	4.6	15.6
40	49.3	55.9	64.3	6.6	15
50	56.4	60.9	62	4.5	5.6
63	58.4	63.6	67.1	5.2	8.7
80	59.9	62.8	67.9	2.9	8
100	55.5	56.6	65.8	1.1	10.3
125	67.1	59.4	63.5	-7.7	-3.6
160	73.8	61.9	62.7	-11.9	-11.1
200	76.2	66.7	65.5	-9.5	-10.7
250	75.8	68.3	69.1	-7.5	-6.7
315	76.1	68.4	70.0	-7.7	-6.1
400	82.1	67.0	69.3	-15.1	-12.8
500	72.9	61.8	65.7	-11.1	-7.2
630	66.6	57.4	60.3	-9.2	-6.3
800	66.4	61.4	63.5	-5	-2.9
1000	61.6	58.8	60.2	-2.8	-1.4
1250	75.8	62.9	64.8	-12.9	-11
1600	78.3	63.8	64.8	-14.5	-13.5
2000	84.4	65.1	66.8	-19.3	-17.6
2500	80.1	72.4	68.2	-7.7	-11.9
3150	86.1	71.7	65.4	-14.4	-20.7
4000	87.9	64.2	65.6	-23.7	-22.3
5000	79.8	58.1	61.8	-21.7	-18
6300	78.9	58.8	60.7	-20.1	-18.2
8000	79.6	60.0	60.0	-19.6	-19.6
10000	77.3	64.5	60.9	-12.8	-16.4
12500	71.3	58.2	57.9	-13.1	-13.4
16000	68.1	55.2	51.2	-12.9	-16.9
20000	65.1	-10	-10	-75.1	-75.1

4.3.2 Rumore generato dalla lucidatura con flessibile elettrico portatile

Valori di esposizione con i metodi riportati nella UNI EN ISO 4869-2, valori espressi in dB(A)

	Metodo OBM	HML	SNR
Cuffia A	44	56.3	57.2
Cuffia B	40	50.6	53.2

Valori misurati con il Cubo di Kirchhoff:

Rilievi fonometro	Solo cubo, lucidatura con flessibile	Valore di esposizione con cuffia A applicata lucidatura con flessibile	Valore di esposizione con cuffia B applicata lucidatura con flessibile	Attenuaz. Cuffia A	Attenuaz. Cuffia B
L_{Aeq}	89.8	66.2	66.3	-23.6	-23.5
L_{Ceq}	88.2	70.7	68.1	-17.5	-20.1
L_{Cpicco}	101.7	88.5	82.8	-13.2	-18.9
L_{90}	87.4	65.4	64.8	-22	-22.6
$L_{eq Z}$	90.8	74.1	70	-16.7	-20.8

Valori misurati con il Cubo di Kirchhoff in terzi di ottava, espressi in dB:

Freq. spettro	Solo cubo lucidatura con flessibile	Cuffia A applicata lucidatura con flessibile	Cuffia B applicata lucidatura con flessibile	Attenuaz. Cuffia A	Attenuaz. Cuffia B
16	54.6	63.9	54.6	9.3	0
20	52.5	63.2	54.0	10.7	1.5
25	56.0	63.9	57.1	7.9	1.1
32	51.4	61.0	54.3	9.6	2.9
40	48.6	60.1	52.8	11.5	4.2
50	54.8	60.5	56.2	5.7	1.4
63	53.0	61.3	57.4	8.3	4.4
80	52.5	63.9	57.1	11.4	4.6
100	57.5	56.4	58.5	-1.1	1
125	60.9	50.8	50.0	-10.1	-10.9
160	57.6	0	0	-57.6	-57.6
200	60.3	51.2	51.5	-9.1	-8.8
250	67.6	56.6	54.9	-11	-12.7
315	62.9	54.0	53.4	-8.9	-9.5
400	63.6	55.7	58.0	-7.9	-5.6
500	60.2	54.1	46.7	-6.1	-13.5
630	52.4	-10	-10	-62.4	-62.4
800	52.8	-10	-10	-62.8	-62.8
1000	57.7	-10	-10	-67.7	-67.7
1250	67	-10	-10	-77	-77
1600	71.9	-10	-10	-81.9	-81.9
2000	77.1	53.8	55.8	-23.3	-21.3
2500	70.8	55.2	57.8	-15.6	-13
3150	80.0	56.1	49.4	-23.9	-30.6
4000	81.4	56.0	53.2	-25.4	-28.2
5000	80.2	53.4	56.8	-26.8	-23.4
6300	79.9	57.4	57.9	-22.5	-22
8000	83.0	58.7	57.5	-24.3	-25.5

10000	82.7	59.8	56.0	-22.9	-26.7
12500	81.1	50.8	58,0	-30.3	-23.1
16000	82.1	52.5	58.8	-29.6	-23.3
20000	73.6	-10	-10	-83.6	-83.6

4.3.3 Rumore generato dal battito sull'incudine di un martello durante una operazione su di una lamiera

Valori di esposizione con i metodi riportati nella UNI EN ISO 4869-2, valori espressi in dB(A)

	Metodo OBM	HML	SNR
Cuffia A	62.3	71.7	72.6
Cuffia B	59	66.2	68.6

Valori misurati con il Cubo di Kirchhoff:

Rilievi fonometro	Solo cubo, battito con martello	Valore di esposizione con cuffia A applicata battito con martello	Valore di esposizione con cuffia B applicata battito con martello	Attenuaz. Cuffia A	Attenuaz. Cuffia B
L _{Aeq}	105	90.4	85.8	-14.6	-19.2
L _{Ceq}	103.6	89.7	86.3	-13.9	-17.3
L _{Cpicco}	129.8	110.9	115.1	-18.9	-14.7
L ₉₀	95.9	82.6	75.4	-13.3	-20.5
L _{eq Z}	104.5	90.1	87.3	-14.4	-17.2

Valori misurati con il Cubo di Kirchhoff in terzi di ottava, espressi in dB:

Freq. spettro	Solo cubo battito con martello	Cuffia A applicata battito con martello	Cuffia B applicata battito con martello	Attenuaz. Cuffia A	Attenuaz. Cuffia B
16	59.8	58.6	65	-1.2	5.2
20	58.6	57	70.6	-1.6	12
25	60.8	59.7	69.6	-1.1	8.8
32	63.2	61.7	69.2	-1.5	6
40	65.2	65.4	75.4	0.2	10.2
50	64.9	69.8	71.7	4.9	6.8
63	71.2	70.7	72.6	-0.5	1.4
80	74.5	76.3	75.2	1.8	0.7
100	72.2	71.0	67.5	-1.2	-4.7
125	75.0	66.0	63.2	-9	-11.8
160	79.5	69.4	67.6	-10.1	-11.9
200	81.9	73.9	72.2	-8	-9.7
250	80.1	72.7	73.6	-7.4	-6.5
315	82.0	72.5	70.3	-9.5	-11.7
400	81.8	70.4	65.9	-11.4	-15.9

500	77.1	62.5	59.0	-14.6	-18.1
630	78.7	66.1	61.3	-12.6	-17.4
800	78.1	68.4	60.5	-9.7	-17.6
1000	78.4	73.2	66.2	-5.2	-12.2
1250	81.4	75.8	68.8	-5.6	-12.6
1600	85.0	68.7	63.8	-16.3	-21.2
2000	97.3	79.2	76.9	-18.1	-20.4
2500	92.7	80.4	77.6	-12.3	-15.1
3150	91.0	82.8	77.6	-8.2	-13.4
4000	98.9	85.4	74.7	-13.5	-24.2
5000	97.9	76.1	76.7	-21.8	-21.2
6300	91.8	72.3	76.3	-19.5	-15.5
8000	92.7	70.8	72.5	-21.9	-20.2
10000	90.3	68.7	69.2	-21.6	-21.1
12500	85.0	67.4	67.1	-17.6	-17.9
16000	81.1	62.5	62.7	-18.6	-18.4
20000	75.7	57.2	53.5	-18.5	-22.2

4.3.4 Rumore generato da una linea di produzione industriale

Valori di esposizione con i metodi riportati nella UNI EN ISO 4869-2, valori espressi in dB(A)

	Metodo OBM	HML	SNR
Cuffia A	64.1	67.4	66.7
Cuffia B	61	64	62.7

Valori misurati con il Cubo di Kirchhoff:

Rilievi fonometro	Solo cubo, linea di produzione	Valore di esposizione con cuffia A applicata linea di produzione	Valore di esposizione con cuffia B applicata linea di produzione	Attenuaz. Cuffia A	Attenuaz. Cuffia B
L_{Aeq}	89.9	79.8	79.2	-10.1	-10.7
L_{Ceq}	97.7	89.8	89.8	-7.9	-7.9
L_{Cpicco}	109.7	101.2	100.2	-8.5	-9.5
L_{90}	89.5	79.5	78.7	-10	-10.8
$L_{eq Z}$	97.7	90.1	90.1	-7.6	-7.6

Valori misurati con il Cubo di Kirchhoff in terzi di ottava, espressi in dB:

Freq. spettro	Solo cubo linea di produzione	Cuffia A applicata linea di produzione	Cuffia B applicata linea di produzione	Attenuaz. Cuffia A	Attenuaz. Cuffia B
16	66.9	68.3	67.5	1.4	0.6
20	56.4	59.6	58.5	3.2	2.1
25	55.5	62.9	62.1	7.4	6.6
32	69.1	72.2	72.0	3.1	2.9
40	72.7	74.9	75.7	2.2	3
50	81.3	83.6	83.8	2.3	2.5

63	79.1	80.9	82.2	1.8	3.1
80	77.7	76.0	79.2	-1.7	1.5
100	78.7	71.4	74.9	-7.3	-3.8
125	81.5	71.1	70.9	-10.4	-10.6
160	92.2	80.7	80.7	-11.5	-11.5
200	89.5	81.4	79.0	-8.1	-10.5
250	88.1	81.8	80.9	-6.3	-7.2
315	91.6	81.2	81.1	-10.4	-10.5
400	87.6	75.5	75.1	-12.1	-12.5
500	81.7	70.1	69.8	-11.6	-11.9
630	73.9	66.8	67.2	-7.1	-6.7
800	69.0	65.1	65.5	-3.9	-3.5
1000	66.2	64.4	64.0	-1.8	-2.2
1250	67.8	60.9	59.5	-6.9	-8.3
1600	70.8	59.2	56.1	-11.6	-14.7
2000	75.5	63.1	60.9	-12.4	-14.6
2500	68.2	59.9	57.7	-8.3	-10.5
3150	75.0	60.8	56.7	-14.2	-18.3
4000	76.3	56.1	55.6	-20.2	-20.7
5000	65.2	-10	-10	-75.2	-75.2
6300	59.8	-10	-10	-69.8	-69.8
8000	59.2	-10	-10	-69.2	-69.2
10000	56.1	-10	-10	-66.1	-66.1
12500	51.1	-10	-10	-61.1	-61.1
16000	49.5	-10	-10	-59.5	-59.5
20000	-10	-10	-10	-10	-10

4.3.5 Rumore generato da un gruppo di generazione elettrica

Valori di esposizione con i metodi riportati nella UNI EN ISO 4869-2, valori espressi in dB(A)

	Metodo OBM	HML	SNR
Cuffia A	77.2	77.3	76.3
Cuffia B	74.	74.1	72.3

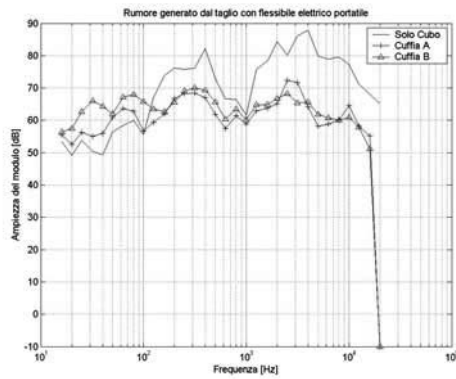
Valori misurati con il Cubo di Kirchhoff:

Rilievi fonometro	Solo cubo, generazione elettrica	Valore di esposizione con cuffia A applicata generazione elettrica	Valore di esposizione con cuffia B applicata generazione elettrica	Attenuaz. Cuffia A	Attenuaz. Cuffia B
L _{Aeq}	96.7	87.9	88.1	-8.8	-8.6
L _{Ceq}	107.3	102.6	103.9	-4.7	-3.3
L _{Cpicco}	117.1	111.8	113.4	-5.3	-3.7
L ₉₀	96.5	87.4	87.6	-9.1	-8.9
L _{eq Z}	107.6	103.9	104.9	-3.7	-2.7

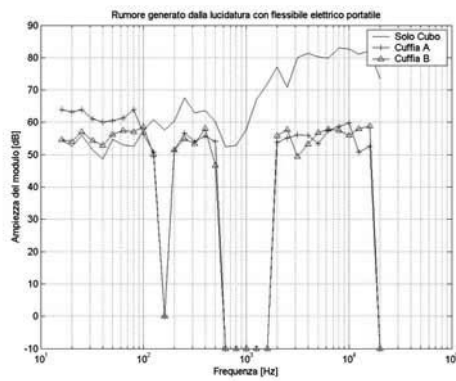
Valori misurati con il Cubo di Kirchhoff in terzi di ottava, espressi in dB:

Frequenza spettro	Solo cubo generazione elettrica	Cuffia A	Cuffia B	Attenuaz. Cuffia A	Attenuaz. Cuffia B
		applicata generazione elettrica	applicata generazione elettrica		
16	90.9	91.6	92.2	0.7	1.3
20	93.5	93.6	94	0.1	0.5
25	93.7	94.3	94.7	0.6	1
32	95.8	97.9	97.2	2.1	1.4
40	95.2	97.7	96.5	2.5	1.3
50	91.1	93.2	92.5	2.1	1.4
63	95.9	94.0	96.8	-1.9	0.9
80	97.4	92.1	97.8	-5.3	0.4
100	98.3	88.8	94.5	-9.5	-3.8
125	94.1	83.8	85.5	-10.3	-8.6
160	99.3	86.0	87.0	-13.3	-12.3
200	95.2	86.1	87.7	-9.1	-7.5
250	99.2	92.2	91.9	-7	-7.3
315	97.8	89.7	88.9	-8.1	-8.9
400	94.8	82.7	81.9	-12.1	-12.9
500	88.0	76.4	77.0	-11.6	-11
630	78.6	72.4	74.6	-6.2	-4
800	75.8	73.6	73.5	-2.2	-2.3
1000	72.1	70.1	70.0	-2	-2.1
1250	74.5	67.2	65.4	-7.3	-9.1
1600	77.3	64.5	62.4	-12.8	-14.9
2000	78.6	63.1	62.6	-15.5	-16
2500	69.3	60.2	58.9	-9.1	-10.4
3150	65.4	55.9	52.4	-9.5	-13
4000	66.5	-10	49.9	-66.5	-16.6
5000	63.0	-10	-10	-73	-73
6300	63.7	-10	-10	-73.7	-73.7
8000	61.5	-10	-10	-61.5	-71.5
10000	53.2	-10	-10	-73.2	-73.2
12500	51.2	-10	-10	-71.2	-71.2
16000	-10	-10	-10	0	0
20000	-10	-10	-10	0	0

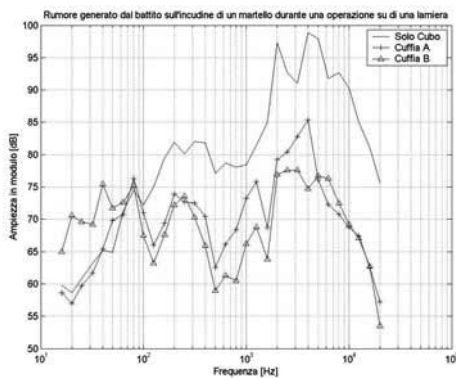
4.4 GRAFICI DI CONFRONTO



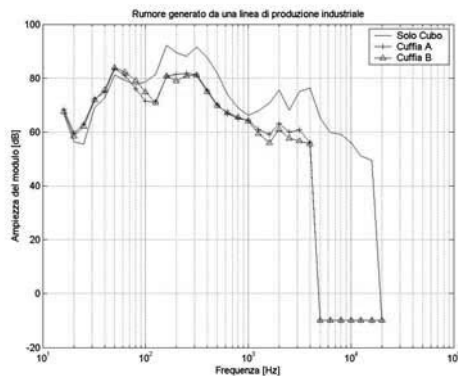
Confronto tra i grafici del rumore generato dal taglio con flessibile elettrico portatile



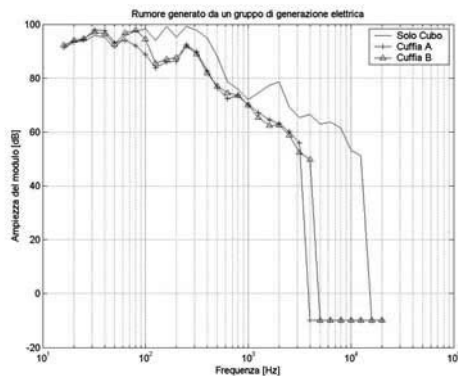
Confronto tra i grafici del rumore generato dalla lucidatura con flessibile elettrico portatile



Confronto tra i grafici del rumore dal battito sull'incudine di un martello durante una operazione su di una lamiera



Confronto tra i grafici del rumore generato da una linea di produzione industriale



Confronto tra i grafici del rumore generato da un gruppo di generazione elettrica

5 ANALISI E CONCLUSIONI

Analizzando i risultati ottenuti, come previsto dalla trattazione teorica, l'attenuazione delle cuffie oggetto di prova ha dato valori strettamente legati al tipo di rumore a cui sono state soggette.

È risultato innegabile la validità della teoria della impedenza acustica, in quanto si possono chiaramente vedere variazioni estremamente consistenti di attenuazione in funzione della pulsazione del suono in ingresso alla cuffia. Analizzando i grafici logaritmici messi a confronto appare chiaro che le cuffie si comportano come un filtro passa basso, ovvero esaltano le frequenze basse e tagliano totalmente le frequenze superiori a 3000 Hz. Infatti alle bassissime frequenze è palese la totale assenza di attenuazione ed è possibile ipotizzare una leggera amplificazione dovuta alla risonanza meccanica della massa costituente il materiale fono isolante. È interessante notare che la UNI EN 352-1 accetta questo fenomeno, in quanto fornisce un valore solo per la frequenza di 125 Hz (5 dB). Inoltre è presente un flesso tra le frequenze vicine ai 2500 Hz, pieno campo udibile. Questo fenomeno è molto utile perché rende le cuffie meno isolanti alle frequenze del parlato, garantendo un minimo di udibilità a chi le indossa.

Entrando nel merito dei risultati, si può notare come siano differenti i valori ottenuti parametrando con il metodo tradizionale e con il metodo in esame, partendo dagli stessi dati iniziali, con lo stesso rumore e stesse cuffie. I metodi tradizionali, oltre a non fornire un dato univoco e concorde tra loro, tendono a sottostimare il valore di esposizione di una quantità che oscilla dai 10 ai 25 dB circa. Inoltre, non considerando il reale spettro del rumore, non danno alcuna informazione su eventuali componenti, superando valori di 85 dB, possono provocare danni irreversibili e malattia professionale a chi è soggetto.

Il metodo qui descritto, grazie alla trattazione di uno ampio spettro di frequenze, riesce ad analizzare e a quantizzare la totalità delle componenti fornendo la possibilità di studiare anche casi che in altro modo non potrebbero essere approfonditi e che inevitabilmente potrebbero essere deleteri per i soggetti esposti.

Altri vantaggi del metodo introdotto da non sottovalutare, sono l'estrema facilità di esecuzione delle prove, la ripetitività delle stesse e la certezza dei risultati, ovvero la sicurezza di avere realmente valutato l'efficacia degli otoprotettori e di ottenere un numero che definisce senza alcun dubbio la reale esposizione al rumore di un ipotetico lavoratore.

Concludendo, ritengo che questo metodo sposi pienamente la filosofia europea in materia di sicurezza, fornendo un modo estremamente semplice ed economico ma nello stesso tempo, altamente preciso, per tutelare le persone che per le loro attività lavorativa sono soggette al rischio rumore, dando anche la possibilità ai datori di lavoro di ottemperare in modo egregio e trasparente alle sempre più stringenti norme in materia di rumore.