

MANICHINI E SONDE MICROFONICHE PER LA VALUTAZIONE DEL RISCHIO DA RUMORE NEL CASO DI LAVORATORI CHE IMPIEGANO DISPOSITIVI DI RICEZIONE

Alessandro Peretti ⁽¹⁾, Pietro Nataletti ⁽²⁾, Francesco Pompoli ⁽³⁾,
Francesca Pedrielli ⁽⁴⁾

⁽¹⁾ Università di Padova, Scuola di Specializzazione in Medicina del Lavoro

⁽²⁾ ISPESL, Dipartimento di Igiene del Lavoro, Monteporzio Catone (Roma)

⁽³⁾ Università di Ferrara, Dipartimento di Ingegneria

⁽⁴⁾ CNR-IMAMOTER, Cassana (Ferrara)

1 - PREMESSA

Il rischio a cui sono esposti i lavoratori che impiegano dispositivi di ricezione è stato sino ad ora scarsamente considerato, probabilmente perché le modalità di misurazione e valutazione del rumore sono in questo caso complesse e certamente difformi da quelle usualmente impiegate. Eppure il numero di soggetti esposto a tale tipo di rumore è rilevante e le lamentele degli addetti sono senz'altro diffuse; inoltre questa particolare esposizione può determinare, secondo diversi ricercatori, deficit uditivi.

L'importanza di questa tematica è stata recentemente sottolineata dall'art. 198 del D.Lgs. 81/2008 in cui si stabilisce che gli organi competenti entro il 30 luglio 2009 definiscano linee guida per la protezione dei lavoratori dai rischi da rumore nei settori della musica, delle attività ricreative e dei *call center*.

Sperando di contribuire al raggiungimento di quest'ultimo obiettivo abbiamo quindi preso in esame i metodi di misurazione e di valutazione del rumore nel caso di impiego dei dispositivi di ricezione, sulla base di nostre precedenti esperienze [Peretti 2006; Peretti 2007].

2 - IMPIEGHI E CARATTERISTICHE DEI DISPOSITIVI DI RICEZIONE

A seconda dei settori lavorativi in cui sono impiegati, gli apparecchi di ricezione possono essere distinti in:

- *dispositivi telefonici*, usati presso i classici centralini di enti ed aziende dove si smistano le telefonate dall'esterno verso numeri interni e viceversa oppure presso i *call center* dove si svolgono servizi specializzati di interazione tra gli addetti e gli utenti;
- *dispositivi ricetrasmittenti*, utilizzati nel campo della navigazione aerea e marittima, dei servizi di soccorso e di ordine pubblico, in cui generalmente operatori fissi impegnati nelle torri di controllo, nelle capitanerie di porto, nei centri operativi, ecc., interagiscono con soggetti impegnati all'esterno (su aeromobili, navi, autoveicoli, ecc.);

- *cuffie amplificate* impiegate presso discoteche, centri di produzione radiofonica o televisiva, aree all'aperto destinate alla musica, ecc., dove *disk-jockey*, tecnici audio e gli stessi musicisti controllano i livelli sonori.

Da un punto di vista costruttivo, i dispositivi di ricezione possono essere distinti in [Jönsson 1997, Richter 1999]:

- *inserti*, tubicini da introdurre parzialmente nel condotto uditivo oppure auricolari da inserire nella conca del padiglione;
- *cuffie sovra-aurali*, in genere piatte, da sovrapporre alla sola conca o all'intero padiglione uditivo a seconda del loro diametro;
- *cuffie circum-aurali*, che racchiudono completamente il padiglione e il cui bordo morbido si appoggia sulla regione del capo che circonda l'orecchio;
- *cornette telefoniche*, caratterizzate da un piccolo altoparlante le cui emissioni fuoriescono al centro di una superficie piatta o leggermente concava ricavata all'estremità di un ricevitore in materiale plastico.

Per quanto riguarda il fissaggio o il sostegno di detti dispositivi, gli inserti rimangono in sede grazie al fatto che sono introdotti nel condotto o nella conca; a volte sono muniti di un piccolo supporto da fissare al padiglione. Le cuffie sono dotate di un archetto sostenuto dal capo. Le cornette sono impugnate dall'addetto.

Nel caso degli inserti e delle cuffie, il microfono è collocato all'estremità di un braccetto in modo da poter essere posizionato di fronte alla bocca. Nel caso delle cornette, il microfono è inserito all'estremità del ricevitore opposta all'altoparlante.

3 - LEGISLAZIONE E NORMATIVE DI RIFERIMENTO

3.1 - INDICAZIONI GENERALI

La norma ISO 1999 del 1990, a cui fanno riferimento la Direttiva Europea 2003/10/CEE, il D.Lgs. 81/2008 e l'abrogato D.Lgs. 195/2006, stabilisce che la misurazione del rumore al fine della valutazione del livello di esposizione sia effettuata in corrispondenza della testa del lavoratore, in sua assenza. Nel caso la presenza dell'addetto sia necessaria, il microfono deve essere posto ad una distanza di 10 cm dall'ingresso del condotto uditivo dell'orecchio maggiormente esposto. La norma UNI 9432, sia nella versione del 2008 che in quella soppressa del 2002, fornisce sostanzialmente le stesse indicazioni.

Su questi temi, maggiori e più interessanti informazioni sono riportate da documenti da tempo revocati, quali la Direttiva Europea 86/188/CEE e il D.Lgs. 277/1991. Questi prevedono che la misurazione del rumore ai fini della valutazione del rischio sia effettuata in corrispondenza dell'orecchio e in assenza del lavoratore al fine di evitare qualsiasi perturbazione del campo sonoro (*prima ipotesi*).

In alternativa, se la presenza dell'addetto è necessaria, il microfono deve essere posto ad una distanza dalla testa del soggetto che riduca per quanto possibile gli effetti della diffrazione delle onde sonore sul livello misurato; per tale motivo il trasduttore va collocato ad una distanza non inferiore a 10 cm (*seconda ipotesi*).

Qualora il microfono debba essere collocato vicinissimo al corpo, si dovrebbero apportare opportune modifiche al valore misurato per tener conto della perturbazione del campo (*terza ipotesi*).

In tutti e tre i casi i due documenti fanno riferimento al fatto che un corpo collocato in un campo sonoro perturba il campo stesso. La diffrazione delle onde sonore esercitata dal corpo dipende dalle dimensioni, dalla forma e dalle proprietà acustiche della superficie del corpo, nonché dalla lunghezza d'onda. Tale fenomeno si verifica anche nel caso del corpo umano: il suono viene diffratto e il livello sonoro che si rileva in un punto sul corpo è differente da quello che si rilevarebbe nel medesimo punto in assenza del corpo stesso [Ianniello 1996].

Nel caso dei dispositivi di ricezione, facendo riferimento alla prima ipotesi non è corretto rilevare il rumore in assenza del soggetto ponendo il microfono vicino al dispositivo. In tali condizioni, infatti, non si terrebbe conto dello stretto accoppiamento che si crea tra sorgente sonora e orecchio del soggetto.

Facendo riferimento alla seconda ipotesi, è ovviamente assurdo rilevare il rumore in presenza del soggetto a 10 cm dall'orecchio, esternamente al dispositivo. In questo caso si rilevarebbe essenzialmente il rumore di fondo dell'ambiente.

Da tali considerazioni si evince che la stima dell'esposizione degli addetti che impiegano dispositivi di ricezione rientra nel terzo caso. Si tratta cioè di misurare la pressione sonora in posizione vicinissima al corpo, in questo caso all'interno del sistema costituito dall'orecchio e dal dispositivo di ricezione ad esso accoppiato, e di correggere successivamente il livello rilevato.

3.2 - INDICAZIONI SPECIFICHE

Il problema della valutazione del rischio nel caso di operatori che utilizzano dispositivi di ricezione è stato considerato dal D.Lgs. 81/2008 e dalla norma UNI 9432 del 2008. Il primo, come già detto (cfr. par. 1), prevedendo l'emissione di linee guida per la valutazione del rischio da rumore nei settori della musica, delle attività ricreative e dei *call center*, la seconda facendo riferimento alle due norme UNI EN ISO 11904-1 e UNI EN ISO 11904-2, le cui versioni EN ISO risalgono rispettivamente al 2002 e al 2004. La prima "Acustica - Determinazione dell'esposizione sonora dovuta a sorgenti sonore situate in prossimità dell'orecchio - Parte 1: Tecnica del microfono posto nel condotto uditivo (tecnica MIRE)" e la seconda "Acustica - Determinazione dell'esposizione sonora dovuta a sorgenti sonore situate in prossimità dell'orecchio - Parte 2: Tecnica con manichino" possono essere impiegate per la stima dell'esposizione degli operatori e per la valutazione degli stessi dispositivi di ricezione (cuffie per la riproduzione del parlato o della musica utilizzate per motivi di lavoro o di svago, ecc.).

La norma UNI EN ISO 11904-1 si basa sull'impiego di un *microfono miniaturizzato* posto all'ingresso o all'interno del condotto uditivo, oppure sull'uso di una *sonda* costituita da un tubicino la cui estremità viene inserita nel condotto (all'altra estremità, esterna all'orecchio, è posto il microfono). Questa procedura prende il nome di tecnica *MIRE*, dove *MIRE* è l'acronimo di *Microphone In Real Ear*.

La norma UNI EN ISO 11904-2, invece, si fonda sull'impiego di un *manichino* dotato di simulatore di orecchio.

Entrambi i metodi consentono di misurare il rumore all'interno dell'orecchio: reale nel caso della tecnica *MIRE*, artificiale nel caso della tecnica con manichino. Successivamente, elaborando lo spettro rilevato, è possibile stimare il rumore all'esterno dell'orecchio che produrrebbe all'interno dello stesso il rumore misurato. Tale elaborazione tiene conto dell'amplificazione esercitata dall'orecchio esterno: allo spettro rilevato va quindi sottratto, frequenza per frequenza, il guadagno esercitato dall'orecchio, ovvero la sua *risposta in frequenza*. A questo proposito va sottolineato che per effetto della risonanza il condotto uditivo amplifica il suono a 2500-3000 Hz, mentre la conca amplifica il suono a 5000-6000 Hz; le singole amplificazioni sono di oltre 10 dB [Shaw 1968, Kuhn 1983, Yost 1986, Chan 1990]. Le due norme UNI EN ISO 11904 forniscono i valori della risposta in frequenza sia per l'orecchio reale (a seconda della posizione del microfono) che artificiale, collocati in un campo diffuso o in un campo libero contraddistinto da onde piane che raggiungono frontalmente il soggetto o il manichino. In alternativa, la risposta in frequenza può essere misurata sperimentalmente sul soggetto o sul manichino in esame, impiegando una o più casse acustiche che emettono un segnale di riferimento (ad esempio un rumore rosa) poste ad una certa distanza dal soggetto o dal manichino. I rilievi vanno effettuati all'interno degli orecchi del soggetto o del manichino, nonché in assenza del soggetto o del manichino.

La tecnica *MIRE* permette di caratterizzare la reale esposizione dei singoli individui e di stimare il valore medio e la variabilità dell'esposizione della popolazione esaminata. La tecnica che adotta il manichino, simulando una persona con caratteristiche antropometriche medie (il manichino appunto), consente invece di ottenere solo un valore rappresentativo dell'esposizione media della popolazione. Sino a 5000 Hz la differenza tra i risultati ottenuti su un elevato numero di persone sottoposte alla tecnica *MIRE* e i risultati ottenuti con il manichino è in genere inferiore a 2.0 e a 2.5 dB (rispettivamente nel caso dei campi diffuso e libero).

Nel caso della tecnica *MIRE*, l'incertezza dei risultati può dipendere dall'inaccurata posizione del microfono o dell'estremità della sonda. Nel caso del manichino, l'incertezza può derivare dall'accoppiamento tra dispositivo di ricezione e orecchio (ossia dalla consistenza e dalla forma del padiglione artificiale).

La tecnica *MIRE* e il manichino si prestano ad essere impiegati per qualsiasi dispositivo di ricezione (inserto, cuffie, cornette). Ovviamente si dovrà porre molta attenzione alla collocazione e al fissaggio del dispositivo. Dato che questi parametri possono essere importanti, si dovranno svolgere diverse prove in condizioni differenti, al fine di poter valutare la variabilità dei risultati.

4 - MANICHINO

4.1 - CARATTERISTICHE COSTRUTTIVE E ACUSTICHE

In commercio sono disponibili diversi manichini: Bruel Kjaer, Cortex, Head Acoustics, Kemar, ecc.. Nelle nostre indagini abbiamo considerato due manichini sostanzialmente analoghi tra loro (Bruel Kjaer 4128 e 4128C, figura 1) che costituiscono una realistica simulazione del sistema testa-torso di un soggetto adulto di medie dimensioni. L'orecchio è composto da un padiglione in gomma siliconica e

da un canale auricolare che termina in un simulatore di orecchio contenente un microfono da ½ pollice con apposito adattatore per il preamplificatore. Con tale sistema è possibile misurare la pressione sonora in corrispondenza della “membrana timpanica” del manichino, considerando l’effetto dovuto alla presenza di torso e testa, oltre che del padiglione e del condotto uditivo.

Di particolare complessità risulta il simulatore del condotto uditivo, le cui prestazioni acustiche sono definite dalla norma IEC 60711 del 1981 “Occluded-ear simulator for the measurement of earphones coupled to the ear by ear inserts”. La norma definisce infatti una impedenza acustica di trasferimento del campo acustico dall’imbocco del canale auricolare alla membrana microfonica, realizzabile con un condotto rettilineo cui sono collegati altri volumi con impedenza definita (Z1-Z4). In figura 2 è rappresentato uno schema del simulatore del condotto uditivo.

Nella figura 3 viene riportata l’impedenza di trasferimento tra l’ingresso del condotto auricolare ed il microfono posto al termine del condotto stesso; vengono inoltre riportati i valori di tolleranza previsti dalla norma IEC 60711.

L’influenza combinata del torso, della testa, del padiglione e del condotto uditivo determina una funzione di trasferimento del campo acustico che viene fornita dal costruttore, sia per un campo libero caratterizzato da onde piane incidenti frontalmente che per un campo diffuso. I valori della risposta in frequenza sono ricavati dalla differenza tra il livello sonoro rilevato dal microfono nel condotto del manichino e il livello sonoro rilevato da un microfono posto nel baricentro della testa, in assenza della testa stessa.

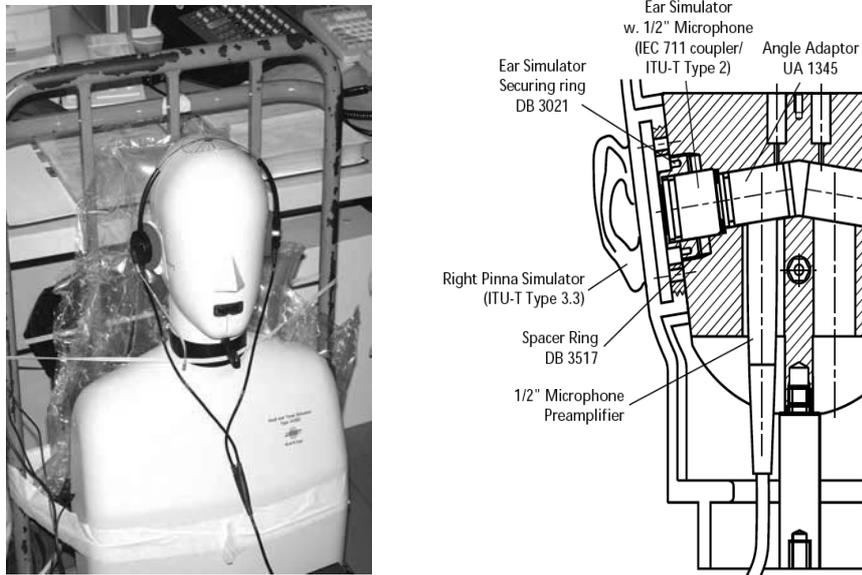


Figura 1: Manichino Bruel Kjaer 4128C

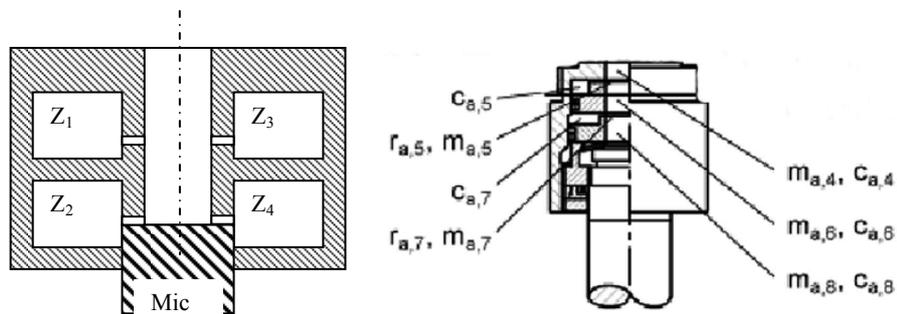


Figura 2: Schema del simulatore del condotto uditivo

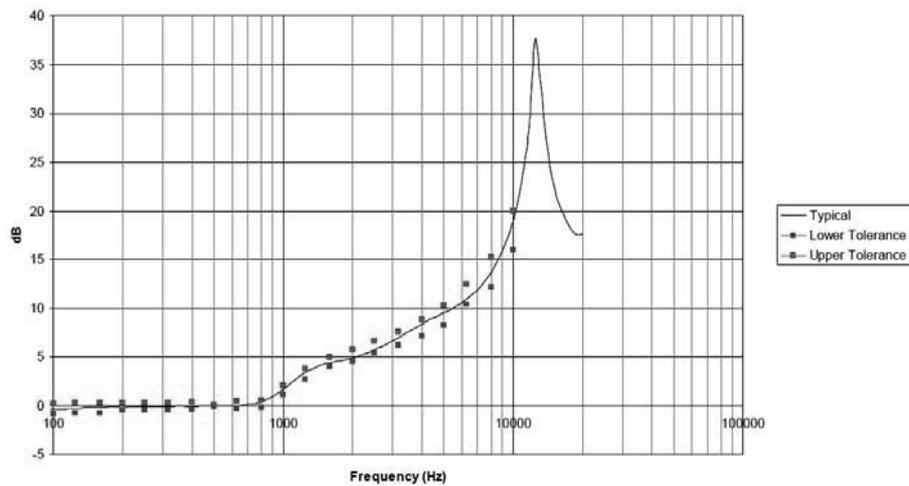


Figura 3: Impedenza di trasferimento tra l'ingresso del condotto auricolare e il microfono a termine del condotto (i valori di tolleranza sono quelli previsti dalla norma IEC 60711)

Come appare evidente dalle figure 4 e 5, le curve che rappresentano le risposte in frequenza per il campo libero e per il campo diffuso differiscono tra loro sostanzialmente solo in corrispondenza dell'intervallo 2500-3150 Hz (dove la curva relativa al campo diffuso è più bassa di 2-3 dB) e per frequenze superiori a 6300-8000 Hz. Queste ultime differenze sono notevoli, ma di fatto non interessano le indagini riguardanti i centralini telefonici e i *call center* dato che in telefonia la banda passante risulta compresa tra 300 e 3400 Hz.

Si può notare come la presenza del manichino determini un sostanziale incremento del livello sonoro all'interno del condotto uditivo, con un picco di pressione sonora a 3150 Hz determinato dalla risonanza dell'intero volume d'aria presente nel condotto uditivo stesso. Un minimo di pressione sonora sul fondo del canale uditivo si verifica intorno a 8000 Hz, con particolare evidenza nel caso del campo libero.

Nelle figure 6 e 7 sono poste a confronto le risposte in frequenza riportate dalla norma UNI EN ISO 11904-2 con quelle precedenti, fornite dal produttore. Si può

osservare che, a prescindere dalle alte frequenze (che come già detto non interessano la banda passante telefonica), le due curve differiscono al massimo di 2-3 dB.

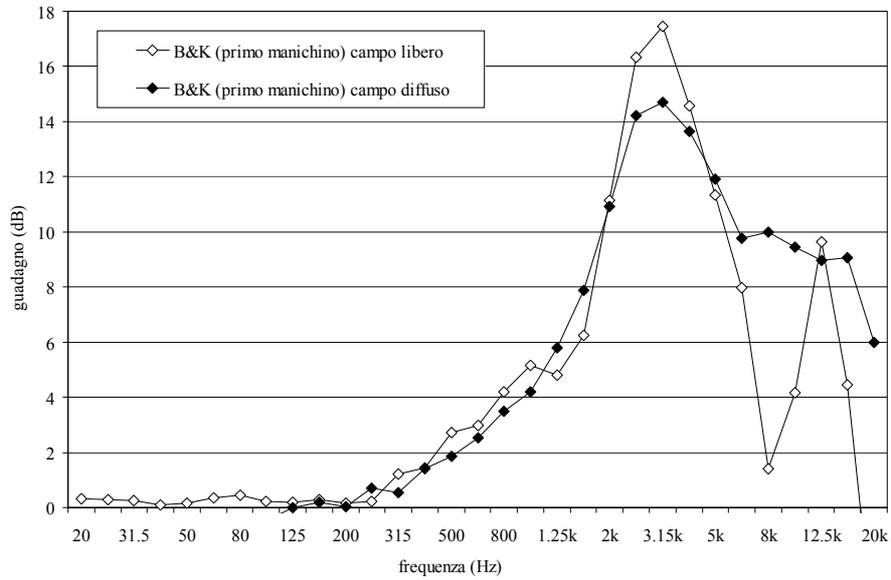


Figura 4: Risposte in frequenza fornite dalla Bruel Kjaer per il primo manichino, valide in condizioni di campo libero e di campo diffuso

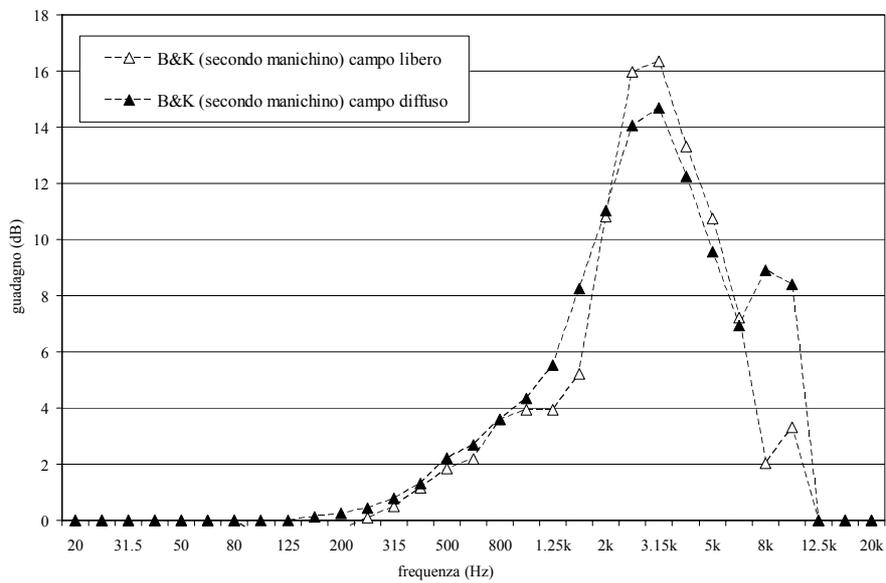


Figura 5: Risposte in frequenza fornite dalla Bruel & Kjaer per il secondo manichino, valide in condizioni di campo libero e di campo diffuso

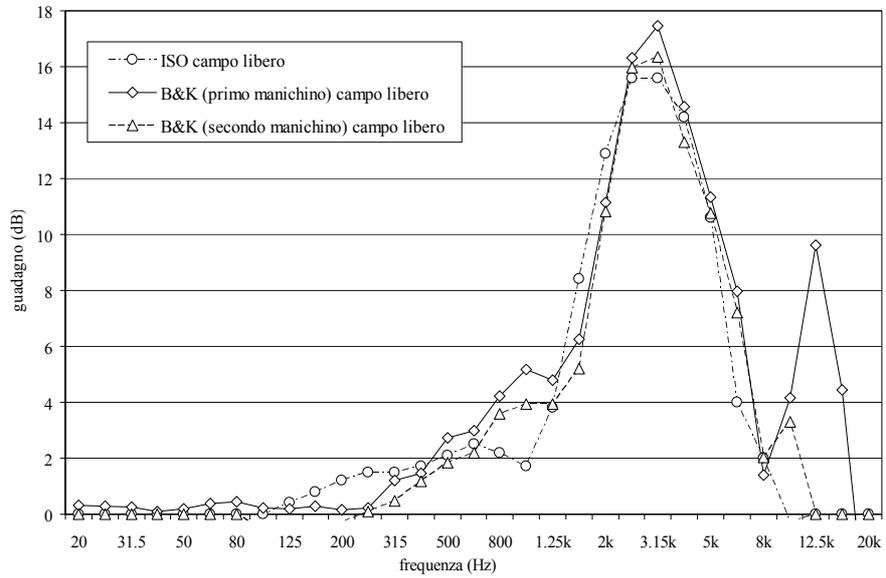


Figura 6: Risposte in frequenza fornite dalla norma UNI EN ISO 11904-2 e dalla Bruel Kjaer valide in condizioni di campo libero

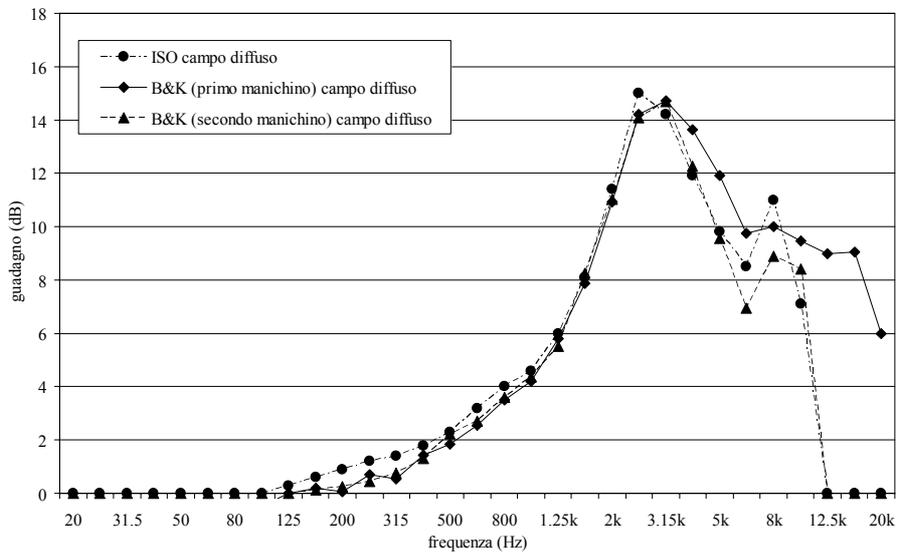


Figura 7: Risposte in frequenza fornite dalla norma UNI EN ISO 11904-2 e dalla Bruel Kjaer valide in condizioni di campo diffuso

4.2 - PROVE SPERIMENTALI

4.2.1 - Strumentazione

Nel corso della ricerca sono stati utilizzati due manichini sostanzialmente analoghi tra loro (Bruel Kjaer 4128 e 4128 C), muniti di simulatori di orecchio destro e sinistro (Bruel Kjaer 4158 e 4159) e di padiglioni standard (Bruel Kjaer DZ 9626 e DZ 9627) e speciali (Bruel Kjaer DZ 9751 e DZ 9752); questi ultimi, particolarmente morbidi rispetto ai padiglioni standard, simulano maggiormente le caratteristiche dei padiglioni umani e permettono alle cuffie sovra-aurali un'aderenza più realistica. I preamplificatori dei microfoni interni al manichino sono stati collegati ad alimentatori microfonici (Bruel Kjaer 5935 e 5968). I segnali in uscita sono stati misurati mediante un analizzatore di frequenza bicanale (Larson Davis 2900 B).

Le linee sono state calibrate mediante sorgenti di riferimento (Bruel Kjaer 4230 e 4231) munite di adeguati supporti (Bruel Kjaer UA 1043 e UA 1546).

4.2.2 - Determinazione sperimentale delle risposte in frequenza

Per verificare di quanto le risposte in frequenza sperimentali differiscano da quelle tabulate, si è proceduto a determinare strumentalmente le risposte in frequenza dei due manichini in condizioni differenti e seguendo modalità di misurazione volutamente diverse.

I rilievi sono stati eseguiti in quattro ambienti semi-riverberanti: due capannoni, un piccolo laboratorio e un locale adibito a centralino telefonico ospedaliero. Nel caso dei capannoni e del laboratorio è stata impiegata come sorgente sonora una cassa acustica dodecaedrica, nel caso del centralino è stato utilizzato il rumore presente nell'ambiente di lavoro in esame.

Nei due *capannoni* il manichino è stato posto su un piatto girevole controllato automaticamente. A breve distanza (2.0 e 2.5 m) è stata installata la cassa acustica. I livelli equivalenti in bande di 1/3 di ottava rilevati all'interno del condotto del manichino, a diversi angoli di incidenza, sono stati mediati tra loro in termini energetici. Successivamente sono stati rilevati i corrispondenti livelli ponendo al posto della testa del manichino un normale microfono da ½ pollice rivolto verso la sorgente. Sottraendo ai livelli rilevati all'interno del condotto del manichino, i livelli rilevati in corrispondenza della testa in assenza del manichino, è stata determinata la risposta in frequenza del manichino.

In *laboratorio* il manichino è stato posto in posizione fissa, di fronte alla cassa acustica, a 1.5 m da essa. Oltre al rumore all'interno del condotto del manichino, è stato contemporaneamente rilevato anche il rumore all'esterno dell'orecchio del manichino (a 10 cm da esso) rivolgendo il microfono sia verso la sorgente che in direzione ortogonale ad essa.

Presso sette postazioni di lavoro di un *centralino telefonico ospedaliero* è stato rilevato il rumore ambientale mediante un microfono posto a 10 cm dall'orecchio del manichino e all'interno del condotto del manichino stesso (l'altro orecchio del manichino era oggetto delle misurazioni a dispositivo di ricezione indossato).

Le risposte in frequenza rilevate sperimentalmente nei due capannoni (figura 8) e in laboratorio (figura 9) sono confrontate con quelle riportate dal produttore per il campo libero caratterizzato da onde piane incidenti frontalmente e per il campo

diffuso. Dalle figure emerge che le curve sperimentali e le curve del produttore presentano sostanzialmente lo stesso andamento in frequenza sino a 6300 Hz. In corrispondenza delle frequenze a cui si presenta il massimo guadagno (2500-3150 Hz), le differenze tra le curve sperimentali e quelle del produttore sono al massimo di 4 dB nel caso della figura 8 e di 2 dB nel caso della figura 9.

Nella figura 10 è riportata la risposta in frequenza media energetica relativa alle sette postazioni di lavoro presso il centralino, confrontata con le risposte definite dal produttore per il campo libero e per il campo diffuso.

Dalla figura emerge che la curva sperimentale e le curve del produttore presentano sostanzialmente lo stesso andamento in frequenza sino a 5000 Hz. In corrispondenza delle frequenze a cui si presenta il massimo guadagno (2500-3150 Hz), le differenze tra le curve sperimentali e quelle del produttore sono di 2-3 dB.

Dalle prove effettuate in condizioni differenti, seguendo modalità di misurazione volutamente diverse, emerge in conclusione che le risposte in frequenza dei manichini, determinate dal costruttore, riportate dalla norma UNI EN ISO 11904-2 e rilevate nei quattro ambienti, differiscono di modeste entità qualora si considerino le componenti di frequenza inferiori a 5000 Hz.

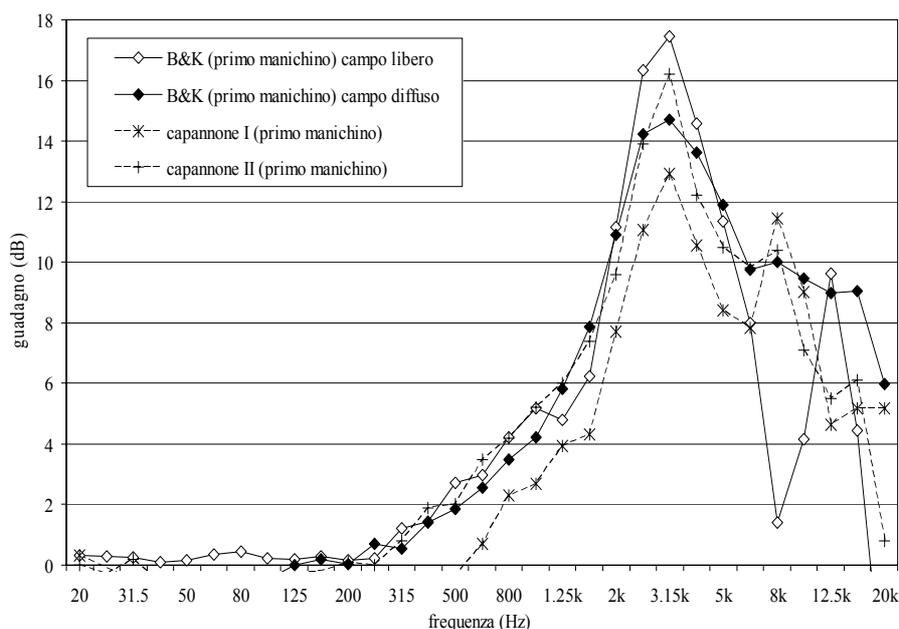


Figura 8: Risposte in frequenza sperimentali rilevate nei due capannoni poste a confronto con quelle fornite dalla Bruel Kjaer

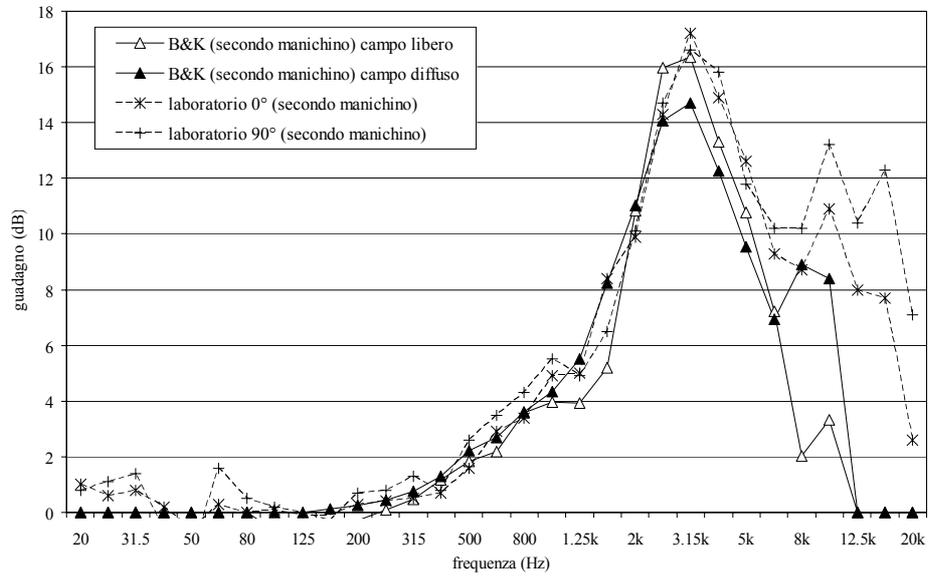


Figura 9: Risposte in frequenza sperimentali rilevate in laboratorio poste a confronto con quelle fornite dalla Bruel Kjaer

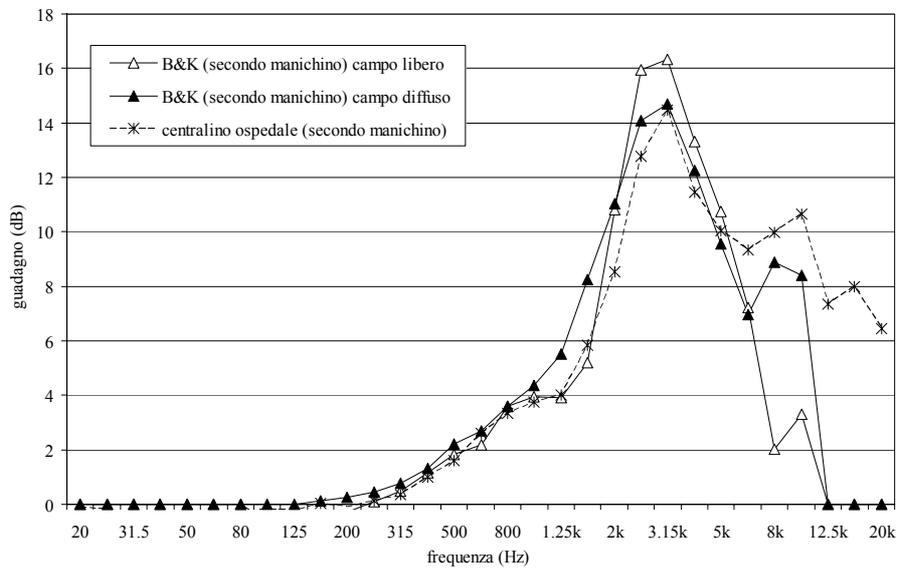


Figura 10: Risposta in frequenza sperimentale rilevata presso il centralino telefonico ospedaliero posta a confronto con quelle fornite dalla Bruel Kjaer

4.2.3 - Misurazioni presso i centralini telefonici e i call center

Nel periodo 1993-2006 abbiamo svolto diverse ricerche riguardanti il rumore a cui sono esposti i lavoratori che impiegano dispositivi di ricezione. Le indagini hanno riguardato il reparto dimafonia di un giornale a diffusione nazionale, il centralino telefonico di una amministrazione pubblica locale, il *call center* di una banca, il centralino telefonico di un ospedale, il *call center* unificato di tre aziende, il *call center* di un ente di servizi a carattere nazionale. Complessivamente sono stati esaminati 83 dispositivi di ricezione in 74 postazioni di lavoro per un totale di 30 ore di monitoraggio [Peretti 2008].

Gli impianti telefonici esaminati erano dotati di due uscite del segnale. Mentre l'operatore svolgeva normalmente il suo lavoro impiegando il proprio dispositivo di ricezione collegato ad una delle due uscite dell'impianto, all'uscita rimanente è stato collegato un dispositivo di ricezione identico a quello dell'addetto in esame. Tale dispositivo è stato accoppiato all'orecchio del manichino.

Alle componenti equivalenti in bande di 1/3 di ottava rilevate all'interno del condotto del manichino sono state applicate, sia la risposta in frequenza del manichino, sia la curva di ponderazione *A*. Le componenti sono state quindi sommate tra loro in termini energetici. È stato così stimato il livello del rumore virtuale all'esterno dell'orecchio artificiale che avrebbe determinato all'interno dello stesso i livelli strumentalmente rilevati. Tale livello virtuale è quello da considerare ai fini igienistici e delle disposizioni di legge per la valutazione del rischio.

Si è posto il problema di quale risposta in frequenza considerare all'atto dell'elaborazione dei dati. Abbiamo optato per la risposta in frequenza determinata dal costruttore in condizioni di campo diffuso dato che i criteri di rischio impiegati in igiene del lavoro riguardano livelli sonori rilevati in questo tipo di campo [Brammer 1977, Dajani 1996, Ianniello 1996].

In realtà, la risposta in frequenza da impiegare non costituisce un problema, in quanto i livelli sonori stimati all'esterno dell'orecchio impiegando risposte in frequenza differenti sono tra loro sostanzialmente uguali:

- sulla base delle risposte in frequenza fornite dal costruttore, considerando i valori assoluti delle differenze tra i livelli sonori relativi al campo diffuso e al campo libero riguardanti il primo (96 rilievi) e il secondo manichino (52 rilievi), il valore medio è risultato rispettivamente di 0.35 e 0.70 dB(A), la deviazione standard di 0.24 e 0.28 dB(A) e i valori massimi di 0.96 e 1.15 dB(A);
- sulla base delle risposte in frequenza relative al campo diffuso, considerando i valori assoluti delle differenze tra i livelli stimati mediante i dati del costruttore e della norma UNI EN ISO 11904-2 riguardanti il primo e il secondo manichino, il valore medio è risultato rispettivamente di 0.40 e 0.29 dB(A), la deviazione standard di 0.07 e 0.07 dB(A) e i valori massimi di 0.54 e 0.37 dB(A);
- sulla base delle risposte in frequenza relative al campo libero, considerando i valori assoluti delle differenze tra i livelli stimati mediante i dati del costruttore e della norma UNI EN ISO 11904-2 riguardanti il primo e il secondo manichino, il valore medio è risultato rispettivamente di 0.64 e 0.48 dB(A), la deviazione standard di 0.35 e 0.32 dB(A) e i valori massimi di 2.18 e 1.07 dB(A).

Si può quindi concludere che le differenze tra i livelli sonori stimati all'esterno dell'orecchio applicando le risposte in frequenza fornite dal costruttore per il campo

diffuso e il campo libero, nonché le risposte in frequenza fornite dalla norma UNI EN ISO 11904-2 sono in pratica trascurabili.

5. SONDA MICROFONICA

5.1 - CARATTERISTICHE COSTRUTTIVE E ACUSTICHE

In commercio sono disponibili diverse sonde microfoniche: Bruel Kjaer, GRAS, PCB Piezotronics, ecc.. Nelle nostre indagini abbiamo considerato la sonda Bruel Kjaer 4182 (figura 11) sostanzialmente costituita da un tubicino, il cui imbocco è soggetto al campo acustico da misurare, e da un dispositivo appositamente studiato contenente una capsula microfonica da $\frac{1}{4}$ di pollice. Il tubicino, di lunghezza variabile, può essere rigido, in metallo, con diametro interno pari a 1.24 mm, oppure flessibile, in materiale plastico, con diametro interno pari a 0.76 mm. Il tubicino consente di misurare il campo acustico puntualmente ad una determinata distanza dalla membrana del microfono posta all'interno del dispositivo.

Nella stessa cavità destinata al microfono sono presenti un foro di equalizzazione per compensare la parte posteriore della membrana microfonica (in analogia ai tradizionali microfoni a condensatore) e un tubo "accoppiatore di impedenza" appositamente studiato per quanto riguarda la lunghezza e il diametro, avvolto intorno al preamplificatore. Tale sistema viene usato per accoppiare l'impedenza all'uscita del tubicino nella piccola cavità in cui è posizionato il diaframma microfonico; tale sistema riduce drasticamente le riflessioni ad alta frequenza all'interno della cavità consentendo di ottenere pertanto risposte in frequenza sufficientemente regolari anche alle alte frequenze.

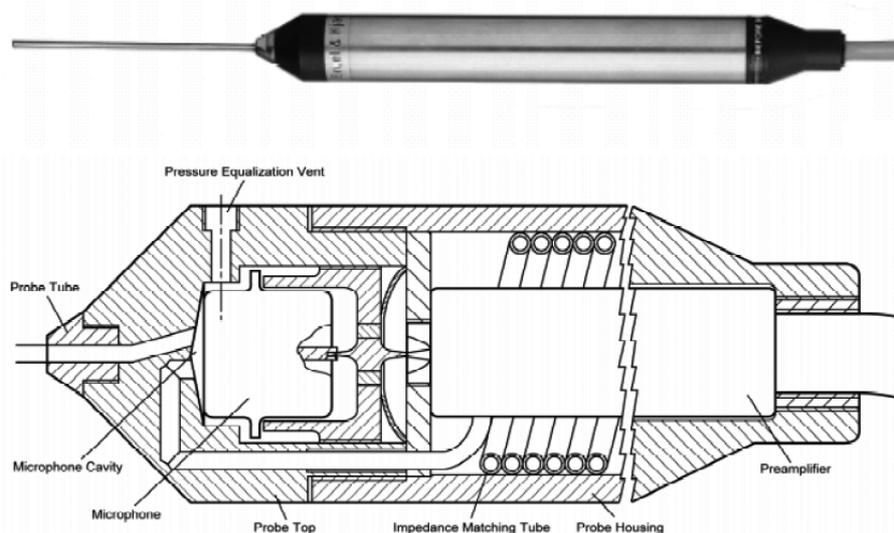


Figura 11: Sonda microfonica Bruel Kjaer 4182

Nella figura 12 sono riportate le risposte in frequenza della sonda microfonica con tubicini rigidi di tre diverse lunghezze (25, 50 e 100 mm). Si noti come la curva si mantenga lineare fino a circa 1000 Hz, per poi perdere progressivamente sensibilità a causa delle perdite fluidodinamiche che il campo acustico subisce per attrito sulle pareti del tubicino; tali perdite sono ovviamente proporzionali alla lunghezza del tubicino stesso. Nel caso del tubicino flessibile (figura 13), le risposte in frequenza cambiano leggermente, con una maggiore perdita di sensibilità alle alte frequenze dovuta al minore diametro interno (0.76 mm contro 1.24 mm del tubicino metallico). La regolarità delle risposte in frequenza della sonda consente di equalizzare il segnale nel corso delle misure oppure di post-elaborare i dati tenendo conto della risposte stesse.

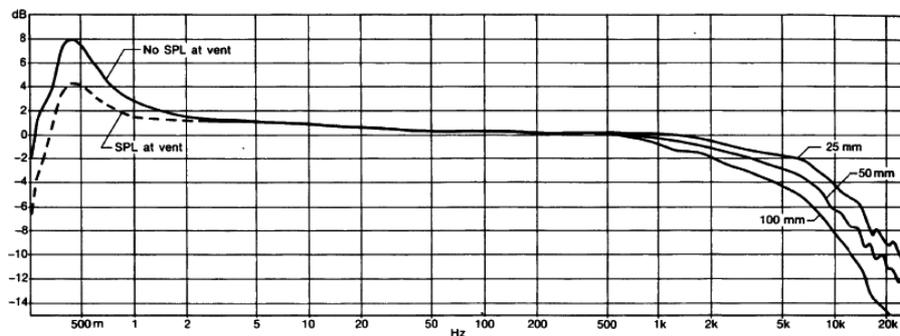


Figura 12: Risposte in frequenza della sonda Bruel Kjaer 4182 con tubicino rigido di tre diverse lunghezze

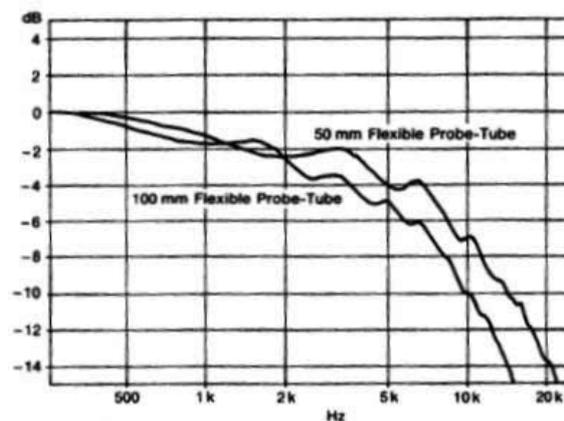


Figura 13: Risposte in frequenza della sonda Bruel Kjaer 4182 con tubicino flessibile di due diverse lunghezze

5.2 - PROVE SPERIMENTALI

5.2.1 - Strumentazione

Nel corso della ricerca la sonda (Bruel Kjaer 4182) è stata collegata ad un alimentatore microfónico (Bruel Kjaer 5968). I segnali in uscita sono stati misurati mediante un analizzatore di frequenza bicanale (Larson Davis 2900 B).

Per la calibrazione della linea sono state utilizzate sorgenti di riferimento (Bruel Kjaer 4230 e 4231) munite di adattatori (Bruel Kjaer UA 0929).

5.2.2 - Determinazione sperimentale delle risposte in frequenza

Per la determinazione delle risposte in frequenza è stato impiegato un sistema specifico proposto a questo scopo dalla Bruel Kjaer. Si tratta di una cameretta (Bruel Kjaer UA 0922, di colore nero in figura 14) dotata di due fori contrapposti da $\frac{1}{2}$ e da $\frac{1}{4}$ di pollice (rispettivamente di fronte e sul fondo della cameretta), nonché di un foro ortogonale all'asse dei due fori (a destra nella figura), di diametro pari a 1.65 mm. All'interno della cameretta sono stati inseriti:

- un microfono da $\frac{1}{2}$ pollice (Bruel Kjaer 4189) utilizzato come sorgente del segnale di riferimento, collegato ad un amplificatore di potenza (Bruel Kjaer 2706) a sua volta collegato all'uscita audio di un personal computer;
- un microfono da $\frac{1}{4}$ di pollice (Bruel Kjaer 4136) per la misurazione del segnale di riferimento, collegato all'analizzatore di frequenza bicanale;
- l'estremità del tubicino flessibile della sonda di diametro esterno pari a 1.65 mm; la sonda microfónica è stata collegata all'analizzatore di frequenza bicanale.

Per le prove è stato utilizzato il segnale rosa generato da un *software* di editing audio. La risposta in frequenza è stata determinata sperimentalmente per differenza tra lo spettro rilevato tramite il tubicino della sonda microfónica e lo spettro rilevato tramite il microfono da $\frac{1}{4}$ di pollice.

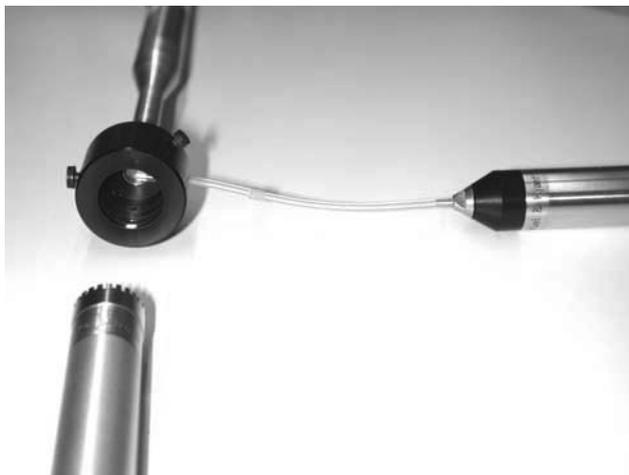


Figura 14: Cameretta Bruel Kjaer UA 0922 con microfono da $\frac{1}{2}$ pollice (in basso, prima dell'inserimento), microfono da $\frac{1}{4}$ di pollice (inserito posteriormente) e tubicino della sonda (a destra)

Nella figura 15 è riportata la risposta in frequenza rilevata mediante il sistema specifico proposto dal produttore e relativa ad un tubicino flessibile di lunghezza pari a 70 mm (tale tubicino sarà successivamente impiegato per le prove all'interno dei condotti uditivi). Si può osservare che il tubicino amplifica di 4 dB il segnale a 20 Hz; nell'intervallo 20-1000 Hz l'amplificazione decresce sino ad annullarsi e rimane sostanzialmente pari a 0 dB tra 1000 e 2500 Hz; per frequenze superiori il tubicino attenua il segnale in misura crescente, sino ad una attenuazione pari a 19 dB a 20000 Hz.

La risposta in frequenza del tubicino può essere quindi sostanzialmente considerata lineare nel campo della telefonia, in quanto in corrispondenza della banda passante telefonica (300-3400 Hz) gli scostamenti dalla linearità sono molto contenuti.

La risposta in frequenza del tubicino è stata verificata senza l'impiego del sistema specifico proposto dalla Bruel Kjaer. In un laboratorio con caratteristiche di campo semi-riverberante, ad una distanza pari a 1.50 m da una cassa acustica dodecaedrica predisposta per l'emissione di rumore rosa, sono stati disposti (alla stessa altezza della cassa), un microfono e la sonda microfonica dotata del tubicino flessibile di lunghezza pari a 70 mm, distanti tra loro 60 mm e rivolti verso la sorgente. Una seconda prova è stata effettuata rivolgendo la coppia microfono-tubicino a 90° rispetto alla sorgente.

Nella figura 16 è riportata la risposta in frequenza del tubicino. Si può osservare che tale curva è sostanzialmente analoga a quella rilevata mediante la cameretta Bruel Kjaer UA 0922.

Per quanto riguarda le misurazioni sull'uomo, il tubicino è stato inserito per prova in laboratorio a diverse profondità all'interno del condotto uditivo di un soggetto posto a 1.50 m dalla cassa acustica dodecaedrica predisposta per emettere rumore rosa.

La sonda microfonica, di massa significativa (45 g), è stata vincolata alla stanghetta di un paio di occhiali mediante nastro adesivo (figura 17). Il tubicino, contrassegnato a 25 mm dall'estremità (figura 14) per poter stimare la profondità di inserimento, è stato introdotto nel condotto uditivo del soggetto; la parte emergente dal tubicino è stata fissata sempre con nastro adesivo al padiglione.

Per la misurazione del rumore all'esterno, è stato posto un microfono a 10 cm dall'orecchio del soggetto, in modo che il suo asse risultasse parallelo all'asse del condotto uditivo. Le prove sono state effettuate con il soggetto rivolto a 90° rispetto alla sorgente (orecchio e microfono fronte sorgente).

Nella figura 18 sono riportate le risposte in frequenza relative a tre profondità di inserimento del tubicino. Si può osservare che le differenze tra le tre risposte in frequenza sono inferiori a 2 dB entro 2000 Hz, a 2500 Hz raggiungono 2 dB, oltre i 2500 Hz sono elevate. Tali risultati concordano sostanzialmente con quelli riportati da Hellstrom et al. [Hellstrom 1993].

Da sottolineare che la risposta in frequenza determinata con il tubicino inserito nel condotto uditivo del soggetto è data da due contributi, ossia dalla somma della risposta in frequenza specifica della sonda microfonica e della risposta in frequenza relativa al condotto uditivo. Applicando quindi la risposta in frequenza complessiva allo spettro sonoro rilevato all'interno del condotto uditivo si può risalire direttamente allo spettro del rumore virtuale all'esterno dell'orecchio.

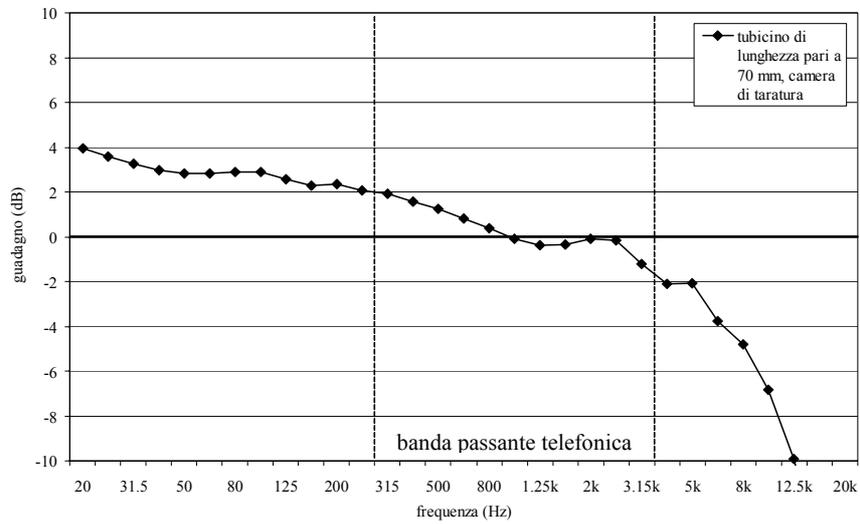


Figura 15: Risposta in frequenza del tubicino flessibile di lunghezza pari a 70 mm rilevata mediante la cameretta Bruel Kjaer UA 0922

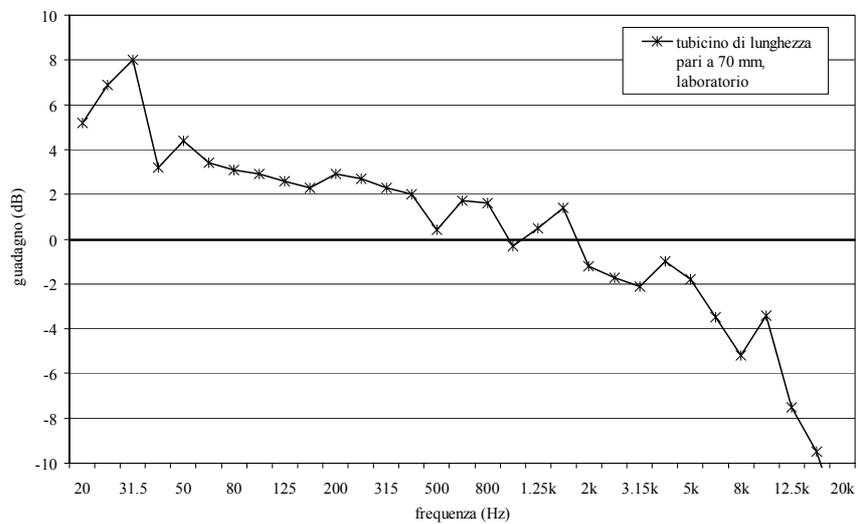


Figura 16: Risposta in frequenza del tubicino flessibile di lunghezza pari a 70 mm rilevata direttamente, senza la cameretta Bruel Kjaer UA 0922



Figura 17: Tubicino flessibile e sonda microfonica fissati sul soggetto in prova

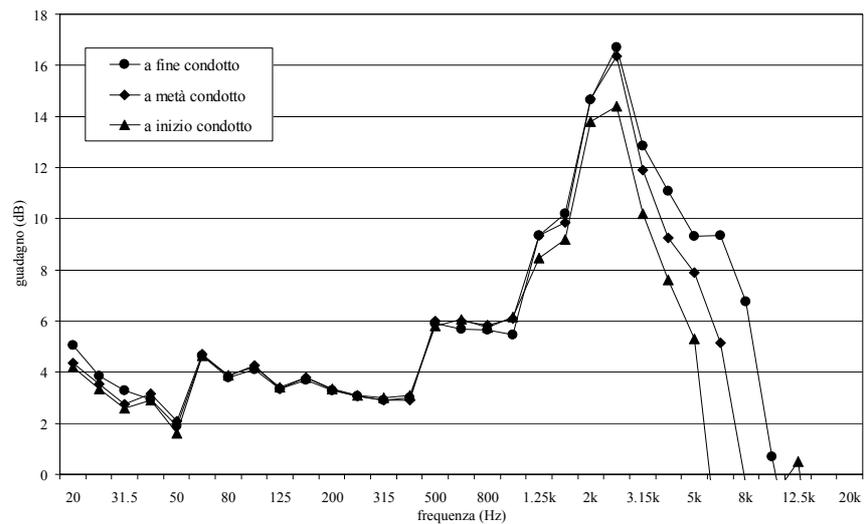


Figura 18: Risposte in frequenza del tubicino flessibile inserito a tre profondità nel condotto uditivo del soggetto

Come si è visto dalla figura 18, le risposte in frequenza complessive differiscono tra loro al variare della profondità di inserimento del tubicino. Comunque, per una qualsiasi profondità, la risposta in frequenza rilevata consente di stimare il rumore all'esterno, a partire dal rumore all'interno del condotto. Ovviamente, la determinazione della risposta in frequenza e la misurazione in condizioni di lavoro andranno effettuate sullo stesso soggetto, mantenendo la stessa profondità di inserimento del tubicino. In altre parole, il tubicino non va assolutamente spostato tra una prova e l'altra. Poiché la risposta in frequenza dipende non solo dalla

profondità di inserimento del tubicino ma anche dalle caratteristiche del condotto uditivo del soggetto, la risposta in frequenza andrà determinata per ogni soggetto in esame.

5.2.3 Misurazioni presso un *call center*

L'indagine mediante sonda microfonica è stata effettuata solo nell'ultimo *call center* in cui è stato utilizzato il manichino. Come già detto (cfr. par. 5.2.2), la sonda microfonica è stata dotata di un tubicino flessibile di lunghezza pari a 70 mm. Tale lunghezza è sufficientemente elevata da consentire l'inserimento del tubicino nel condotto uditivo del soggetto in esame e da permettere un adeguato fissaggio della sonda alla stanghetta degli occhiali; nel contempo tale lunghezza è sufficientemente contenuta per ridurre l'attenuazione del segnale alle alte frequenze (cfr. par. 5.1).

La risposta in frequenza della sonda inserita nel condotto uditivo degli operatori è stata determinata in un locale attiguo al *call center*, mediante una cassa acustica dodecaedrica predisposta per l'emissione di rumore rosa posta a 1.5 m dai soggetti. Come per le prove in laboratorio, le misure sono state effettuate con l'operatore rivolto a 90° rispetto alla sorgente (orecchio fronte sorgente). A 10 cm dall'orecchio in cui era inserito il tubicino della sonda è stato collocato un microfono rivolto verso la sorgente. La prova è stata necessariamente effettuata in un locale diverso dal *call center* perché la prova, a causa dell'emissione del rumore rosa, poteva disturbare gli altri operatori.

Immediatamente dopo la determinazione della risposta in frequenza, l'operatore è stato invitato a tornare nella sua postazione di lavoro senza modificare la posizione del tubicino all'interno del condotto. L'operatore ha quindi indossato la consueta cuffia sovra-aurale impiegata durante il lavoro (cuffia e sonda non interferiscono tra loro).

I rilievi sono stati eseguiti durante le normali conversazioni telefoniche effettuate con gli utenti. Contemporaneamente sono stati effettuati rilievi mediante il manichino, munito di analogo dispositivo di ricezione e collegato in parallelo allo stesso impianto telefonico. Complessivamente sono stati eseguiti 27 rilievi per un totale di 3 ore di monitoraggio.

Alle componenti equivalenti in bande di 1/3 di ottava rilevate all'interno del condotto uditivo dell'operatore sono state applicate, sia la risposta in frequenza ottenuta per il soggetto in esame, sia la curva di ponderazione *A*. Le componenti sono state quindi sommate tra loro in termini energetici. È stato così stimato il livello del rumore virtuale all'esterno dell'orecchio reale che avrebbe determinato all'interno dello stesso i livelli strumentalmente rilevati. Tale livello virtuale è quello da considerare ai fini igienistici e delle disposizioni di legge per la valutazione del rischio.

Nella figura 19 sono riportate le risposte in frequenza della sonda inserita nel condotto uditivo di tre operatori esaminati nel corso dell'indagine presso il *call center*; tali risposte sono confrontate con la risposta ottenuta sul soggetto considerato in laboratorio (cfr. par. 5.2.1). Riferendosi a quattro persone differenti, e quindi a quattro condotti uditivi diversi, le curve presentano alcune differenze, anche se queste sono contenute. Le notevoli differenze oltre i 6300 Hz risultano esterne all'intervallo di interesse (la banda passante telefonica è compresa tra 300 e 3400 Hz).

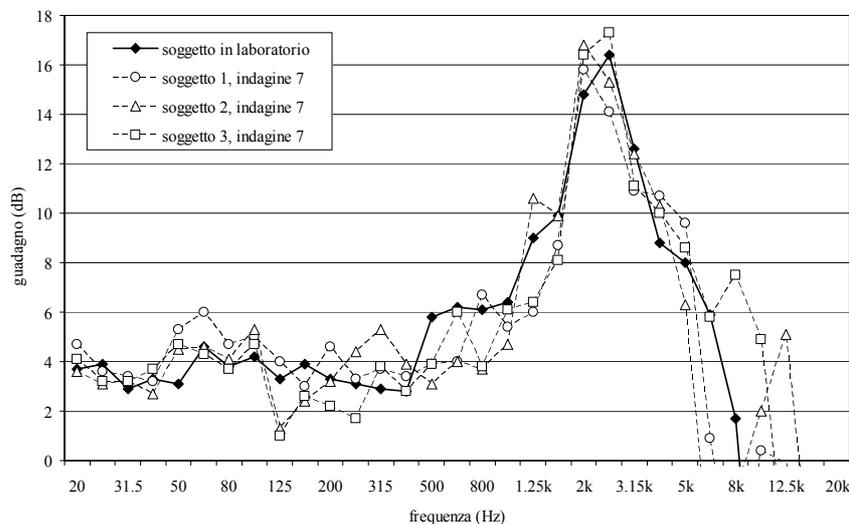


Figura 19: Risposte in frequenza della sonda inserita nel condotto uditivo del soggetto in laboratorio e di tre operatori del *call center*

Come si è detto, le misurazioni sono state effettuate contemporaneamente all'interno del condotto uditivo degli operatori e all'interno del condotto uditivo del manichino. I livelli rilevati sono stati elaborati impiegando le rispettive risposte in frequenza al fine di ottenere i corrispondenti livelli all'esterno dei due orecchi (reale e artificiale). Considerando i valori assoluti delle differenze tra i livelli equivalenti stimati all'esterno dei due orecchi (9 rilievi), il valor medio è risultato di 0.69 dB(A), la deviazione standard di 0.58 dB(A) e il valore massimo di 1.7 dB(A). Si può quindi osservare che le differenze sono contenute.

Per altri operatori del *call center* la risposta in frequenza della sonda inserita nel condotto uditivo è risultata più o meno diversa da quella attesa; le differenze tra i livelli stimati all'esterno degli orecchi della sonda e del manichino sono risultate quindi più elevate di quelle sopra considerate. Tali anomalie vanno imputate ad un inadeguato inserimento del tubicino nel condotto uditivo degli operatori e/o alle ostruzioni di cerume presenti nel condotto stesso che in alcuni casi hanno comportato la completa ostruzione dell'ingresso del tubicino. Tali problemi possono essere evitati mediante:

- un esame otoscopico del condotto uditivo prima dell'inserimento del tubicino (per verificare che il condotto non sia ostruito);
- un esame otoscopico del condotto uditivo dopo detto inserimento (per verificare il corretto posizionamento del tubicino stesso);
- il controllo visivo della curva della risposta in frequenza durante il rilievo mirato alla determinazione della risposta stessa.

6 - CONCLUSIONI

I risultati delle indagini citate in questo lavoro indicano che i livelli sonori a cui sono esposti gli operatori telefonici sono, in $\frac{1}{4}$ dei casi, compresi tra 80 e 87 dB(A), per cui sussistono rischi uditivi per i lavoratori. Tali rischi possono essere ridotti mediante diversi sistemi (regolazione automatica del volume di ricezione, limitatori di livello sonoro, ecc.). Ne deriva che la valutazione del rischio può assumere in questi casi una notevole importanza, dato che essa può essere direttamente finalizzata alla riduzione dei rischi stessi.

Per quanto riguarda la strumentazione e la metodologia di misurazione, la tecnica che prevede l'impiego di sonde microfoniche da inserire nel condotto uditivo degli operatori (al posto dei manichini dotati di simulatori di orecchio artificiali) sembra particolarmente interessante. Le sonde microfoniche permettono infatti di rilevare i livelli sonori nei particolari condotti uditivi degli operatori e consentono di effettuare le misurazioni nelle effettive condizioni di lavoro, ossia con il dispositivo di ricezione posizionato da parte dell'operatore sul proprio orecchio (e non su quello del manichino).

Le ricerche illustrate in questo lavoro sono state svolte sotto l'egida del Dipartimento di Ingegneria dell'Università degli Studi di Ferrara grazie al finanziamento dell'ISPESL (convenzione C16/DIL/02)

7 - BIBLIOGRAFIA

- [1] Brammer A.J., Piercy J.E. "Monitoring sound pressures within the ear: application to noise exposure". J. Acoust. Soc. Am. Volume 61, 3, 1977, 731-738
- [2] Chan J.C.K., Geisler C.D., "Estimation of eardrum acoustic pressure and of ear canal length from remote points in the canal", J. Acoust. Soc. Am. Volume 87, 3, 1990, 1237-1247
- [3] Dajani H., Kunov H., Seshagiri B. "Real-time method for the measurement of noise exposure from communication headsets". Applied Acoustics, Volume 49, 3, 1996, 209-224
- [4] Hellstrom P., Axelsson A. "Miniature microphone probe tube measurements in the external auditory canal", J. Acoust. Soc. Am. Volume 93, 2, 1993, 907-919
- [5] Ianniello C. "Valutazione dei livelli di esposizione al rumore di operatori telefonici con un microfono nella conca del padiglione auricolare". Rivista Italiana di Acustica, volume 20, 1-2, 1996, 37-46
- [6] Jönsson S., Matthisson A., Borg C. "Improving Telephone Handset Performance". Bruel & Kjaer, Application Note, 1997
- [7] Kuhn G.F., Guernsey R.M. "Sound pressure distribution about human head and torso". J. Acoust. Soc. Am. Volume 73, 1, 1983, 95-105
- [8] Peretti A., Nataletti P., Pieroni A., Tonazzo M., Bonomini F., Pedrielli F., Farina A. "Rumore a cui sono esposti gli operatori telefonici. Parte 1 - Attività e addetti, legislazione e normative, dati di letteratura". Atti del Convegno

dBA2006 “Rischi fisici negli ambienti di lavoro”. Modena 12-13 ottobre 2006, volume 1, 401-414

- [9] Peretti A., Nataletti P., Pieroni A., Tonazzo M., Bonomini F., Pedrielli F., Farina A. “Rumore a cui sono esposti gli operatori telefonici. Parte 2 - Strumentazione, studi e prove preliminari”. Atti del Convegno dBA2006 “Rischi fisici negli ambienti di lavoro”. Modena 12-13 ottobre 2006, volume 1, 415-427
- [10] Peretti A., Nataletti P., Pieroni A., Tonazzo M., Bonomini F., Pedrielli F., Farina A. “Rumore a cui sono esposti gli operatori telefonici. Parte 3 - Indagini negli ambienti di lavoro”. Atti del Convegno dBA2006 “Rischi fisici negli ambienti di lavoro”. Modena 12-13 ottobre 2006, volume 1, 429-445
- [11] Peretti A., Nataletti P., Pieroni A., Sisto R., Pedrielli F., Farina A. “Occupational noise exposure for call-center workers”. The 36th International Congress and Exhibition on Noise Control Engineering (Internoise 2007). Istanbul 28-31 agosto 2007, 520
- [12] Richter U., Fedtke T. “Determination of noise immissions from headphones and earphones by means of different head and torso simulators”. Sixth International Congress on Sound and Vibration. Copenhagen 5-8 luglio 1999, 1019-1026
- [13] Shaw E.A.G., Teranishi R., “Sound pressure generated in an external-ear replica and real human ears by a nearby point source”, J. Acoust. Soc. Am. Volume 44, 1, 1968, 240-249
- [14] Yost W.A., Nielsen D.W. “Le basi della funzione uditiva”. Piccin Nuova Libreria, Padova 1986