

ESPOSIZIONE A RUMORI ALTAMENTE IMPULSIVI: METODOLOGIE ANALITICHE E VALUTAZIONI SPERIMENTALI

M. COSA (a) e M. NICOLI (b)

(a) Servizio di Igiene Pubblica, USL RM 1;

(b) Laboratorio di Igiene del Territorio, Istituto Superiore di Sanità, Roma

Riassunto. — Il problema relativo alla valutazione del rischio di danno uditivo per rumori altamente impulsivi, presenta ancora aspetti non del tutto chiariti. Nella prima parte della indagine vengono esaminate le metodologie analitiche per la misura dei rumori altamente impulsivi con particolare riferimento agli eventi esplosivi dovuti ai colpi di arma da fuoco in ambiente chiuso. Nella successiva parte della ricerca sono riportati i risultati di una indagine sperimentale per la valutazione della efficacia di vari tipi di cuffie impiegate come protettori individuali ed utilizzate dai frequentatori degli stessi campi di tiro. Nella parte conclusiva sono riportati i risultati della ricerca, basata su misure effettuate usando un metodo oggettivo di valutazione (attenuazione delle cuffie su manichino fornito di orecchio artificiale) e i dati sperimentali sono confrontati con quelli di certificazione con cui vengono omologate le cuffie.

Summary (High impulsive noise exposition. Analytical assessment methods and experimental evaluations). — Problems related to the assessment of hearing loss risk following exposure to high impulsive noise are not totally resolved. This investigation started from analysis of sound pressure levels in closed shooting fields where target practices with light weapons are carried out. In the successive part of investigation the effective hearing protection for earmuffs used in shooting fields has been evaluated. The study has been carried out employing an objective method according to real exposure conditions. Appealing to ISO-NIOSH procedure, maximum number of explosive events acceptable at protected ear has been calculated. Comparative difference between experimental measurements and manufacturer's attenuation data has been evaluated.

Introduzione

La valutazione del rischio di danno uditivo per rumori di tipo impulsivo presenta aspetti particolari legati alle caratteristiche fisiche degli eventi sonori considerati

ed alle modalità di esposizione dei soggetti che subiscono l'impatto acustico.

Allo stato attuale, la normativa nazionale relativa a criteri di protezione dell'udito per l'esposizione al rumore in genere ed a quello impulsivo in particolare, è del tutto carente e pertanto è necessario far riferimento a normative di altri paesi o a documenti pubblicati da enti o da organizzazioni interessate a tale campo dell'igiene ambientale.

Peraltro la problematica relativa alla valutazione della lesività dei rumori impulsivi presenta ancora molti aspetti non sufficientemente chiariti e non sono ancora predeterminabili, in maniera analitica ed affidabilmente attendibile, gli effetti otosensivi derivanti dalla esposizione prolungata a questo tipo di stimolo sonoro [1, 2].

D'altra parte, anche se esistono ancora, specie a livello della fisiopatologia e della evoluzione temporale del danno, una serie di problematiche non completamente messe a punto, sono state studiate, proposte ed impiegate alcune metodologie atte a dettare i criteri per la misurazione del rumore a carattere impulsivo ed a valutare l'entità della esposizione a tale tipo di evento sonoro.

Tali metodiche spesso presuppongono o includono le definizioni di rumore impulsivo, definizioni che sono riferibili essenzialmente alle caratteristiche fisiche del fenomeno o alla tipologia della risposta che il fenomeno stesso determina nell'apparato uditivo.

Un primo gruppo di definizioni pertanto individua come impulsivo quel fenomeno acustico di durata inferiore a 1 secondo che è caratterizzato da un livello di picco chiaramente individuabile o più precisamente quel rumore che presenta un decremento di 20 dB rispetto al valore di picco in un intervallo di tempo minore di 0,5 secondi, con un tempo di salita inferiore ai 35 ms [3-5].

Il rumore impulsivo può essere altresì definito come quel fenomeno acustico che è caratterizzato da una energia superiore a quella che evoca il riflesso cocleo-muscolare a livello di soglia e che ha una durata compresa fra 25 e 200 ms. Se il rumore ha una durata inferiore a 25 ms, esso viene definito "altamente impulsivo" [6].

Per quanto riguarda invece i metodi di valutazione dei rumori impulsivi, questi possono essere fondamentalmente raggruppati in due categorie: quelli che commisurano l'energia totale accettata dall'orecchio durante il tempo di esposizione (ISO R. 1999/71; DIN 45645/75; BOHS/76; ISO DIS 1999/81; CEE/85) e quelli che valutano il livello massimo di picco ammissibile in relazione al numero di eventi impulsivi cui è sottoposto un soggetto durante la giornata lavorativa (CHABA/86; OSHA/71; ACGIH/83) [7].

Sulla base di queste premesse è stata eseguita una indagine sperimentale che aveva lo scopo di effettuare un raffronto tra differenti metodologie di valutazione del rumore impulsivo, con specifico riferimento alle condizioni di esposizione che si verificano in un poligono di tiro.

La ricerca è stata articolata in due successive fasi operative: di queste la prima è stata incentrata sulla utilizzazione di diverse metodologie di misura e sulla comparazione dei risultati ottenuti secondo varie normative; successivamente, avendo constatato che le condizioni di esposizione comportavano comunque la necessità di adottare dispositivi di protezione individuale, è stata avviata una seconda fase di ricerca tendente a fornire elementi comparativi sulla efficacia di vari tipi di cuffie, allo scopo di individuarne l'idoneità, in relazione alle specifiche condizioni di impiego.

Ricerca sperimentale: prima fase

Nella prima fase della ricerca sono state analizzate le caratteristiche specifiche delle emissioni sonore dovute a colpi di arma da fuoco in un ambiente chiuso. Successivamente sono stati calcolati i livelli di esposizione al rumore per i frequentatori del poligono di tiro, utilizzando differenti metodologie valutative. Sono state infine prese in considerazione le tecniche metrologiche impiegate e le metodiche analitiche utilizzate allo scopo di identificare un criterio di valutazione in grado di fornire risposte sufficientemente attendibili, attraverso procedure di misura e di calcolo non eccessivamente indaginose.

Strumenti e metodi di misura impiegati per l'indagine

Nel corso della presente ricerca le misure dei parametri fonometrici sono state eseguite utilizzando fonometri integratori di precisione, un analizzatore statistico di livello, un analizzatore digitale di frequenza e un analizzatore FFT a banda stretta collegato ad un registratore grafico X, Y.

Le suddette apparecchiature sono state connesse a microfoni a condensatore da 1/2", per misure di precisione e corredate degli accessori d'uso (calibratori, cavi di prolunga, attenuatori, cavalletti, ecc.).

L'indagine sperimentale è stata effettuata nell'ambito di poligoni di tiro realizzati in gallerie chiuse nelle quali

le condizioni di esposizione risultano più gravose, in particolare per gli istruttori, costretti a permanere nell'ambiente per tempi più prolungati.

Negli ambienti suddetti le misure sono state effettuate riproducendo le reali condizioni di lavoro e cioè con la presenza contemporanea di più allievi che si esercitano nel tiro con armi leggere dalle postazioni predisposte nelle gallerie per il tiro al bersaglio.

Il microfono è stato collegato in corrispondenza della zona occupata normalmente dagli istruttori e cioè alle spalle dell'allievo, a circa un metro e mezzo di distanza dalla posizione assunta dalla mano impugnante l'arma ad una altezza di 1,50 m da terra.

Le armi usate sono state quelle normalmente in dotazione per le esercitazioni e cioè pistole automatiche Beretta mod. 92 cal. 38, ma sono stati rilevati anche i livelli sonori di altre armi (mitraglietta M 12 e revolver Smith e Wesson cal. 38 special).

La valutazione dei livelli acustici e delle caratteristiche spettrali dei singoli eventi sonori è stata effettuata in base a varie metodiche di misura, così da avere un quadro, per quanto possibile completo, degli elementi significativi rilevabili per la successiva elaborazione dei dati raccolti.

In particolare, gli eventi sonori sono stati commisurati in scala di ponderazione lineare ed in scala di ponderazione "A"; le rilevazioni inoltre, sono state eseguite valutando i livelli sonori con tempi di integrazione Fast, Impulse e Peak, onde individuare le caratteristiche di impulsività del rumore secondo differenti scale di risposta strumentale.

Sono state altresì effettuate misurazioni del Single Event Level (SEL) relativo al contenuto energetico di ciascun colpo di arma da fuoco, nonché misure di livello equivalente ponderato "A" (EQLA) in registrazione continua, di EQLA calcolato sulla base dei valori del SEL medio, rapportato al numero di eventi verificatisi nella unità di tempo presa in considerazione e di EQLAimp (Livello Equivalente continuo di rumore rilevato con costante di tempo impulse) ricorrendo all'impiego di un analizzatore statistico di livello.

Sono state anche effettuate misure dei livelli equivalenti di esposizione totale e del SEL relativo al contenuto energetico di ciascun colpo di arma da fuoco.

L'uso degli analizzatori in tempo reale (a banda larga ed a banda stretta) ha consentito infine di analizzare la composizione spettrale del rumore prodotto da ciascun colpo e di esaminare lo spettro livello-tempo, analizzando l'andamento e la durata dell'onda di smorzamento all'interno dei poligoni di tiro.

Condizioni di esposizione al rumore del personale dei poligoni di tiro

Per quanto concerne il rischio di danno uditivo, il personale che risulta maggiormente esposto al rumore altamente impulsivo è costituito dagli istruttori, i

quali possono permanere per alcune ore nel poligono, sorvegliando ed addestrando i tiratori che si avvicendano in turni successivi.

Sulla base dei dati informativi raccolti, è stato accertato che, nelle condizioni di maggior impiego, l'istruttore può svolgere la sua attività nelle gallerie di tiro per un periodo di tempo che può raggiungere un massimo di 4 ore giornaliere.

Nelle gallerie prese in esame, sono installate 4 postazioni di tiro da cui sparano 4 allievi, ciascuno dei quali riceve una dotazione di 10 proiettili. Ogni ora si avvicinano circa 8 turni di allievi. Pertanto nella ipotesi che l'istruttore sia impegnato per 4 ore al giorno, seguendo i turni che si avvicendano nelle esercitazioni di tiro, la sua massima esposizione giornaliera degli eventi impulsivi è pari a 1280 eventi impulsivi al giorno.

Sulla base dei valori rilevati nel corso dell'indagine, è stato constatato che ciascun evento impulsivo possiede un livello sonoro che, misurato con risposta strumentale Peak, risulta mediamente compreso tra 145,7 e 147,5 dBA e tra 147,5 e 150,0 dB lineari.

Per le specifiche caratteristiche degli eventi esplosivi commisurati ed in particolare per la loro breve

durata, la ripidità del loro transiente di attacco ed il loro elevato livello sonoro, i valori ottenibili impiegando risposte strumentali Fast ed Impulse sono considerevolmente più bassi (da 17,0 a 22,2 dB) rispetto a quelli ottenibili con costante di tempo Peak. Le due prime modalità di misura appaiono pertanto incongrue per una valutazione attendibile della energia di eventi altamente impulsivi.

E' da notare poi che tutti i valori di SEL sono inferiori ai valori massimi rilevati, trattandosi di eventi di durata notevolmente inferiore al secondo e che i valori in dB, riportati in Tab. 1, superano quelli in dBA di 1-2 dB (campo di variazione fra 0,9 e 2,2 dB).

I livelli medi di rumorosità per i vari tipi di arma da fuoco presi in considerazione, commisurati in base alle varie costanti di tempo e come livelli per singolo evento, sono riportati nella Tab. 1.

Sono stati altresì rilevati nel corso della presente indagine, lo spettro ampiezza-frequenza e lo spettro ampiezza-tempo dell'onda di smorzamento dei singoli colpi di arma da fuoco.

Nella Fig. 1 è riportato lo spettro ampiezza-frequenza di uno sparo, ottenuto attraverso una analisi FFT a

Tabella 1. — Livelli sonori massimi e SEL mediati per vari tipi di armi da fuoco

Tipo di arma	Valore massimo						SEL dBA
	Fast		Impulse		Peak		
	dBA	dB	dBA	dB	dBA	dB	
Beretta mod. 92	124,6	126,2	128,6	130,5	147,5	148,4	117,4
Smith & Wesson	125,7	127,5	130,7	132,6	147,8	150,0	119,5
Mitra M 12	124,0	125,4	127,4	129,3	145,7	147,5	116,5
Valori medi	124,8	126,4	128,9	130,8	147,0	148,6	117,8

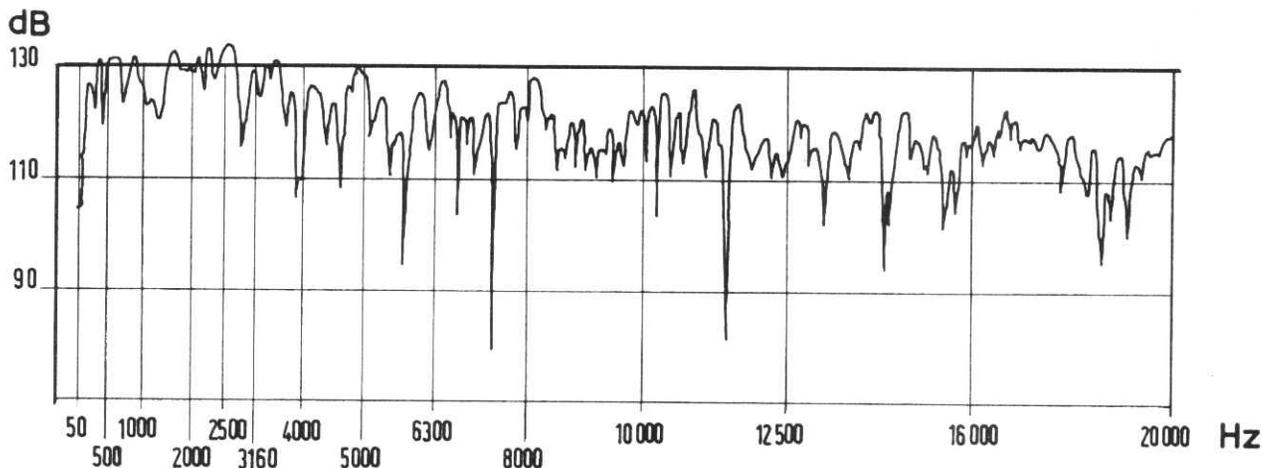


Fig. 1. — Spettro in frequenza di un colpo di arma da fuoco con analisi FFT a banda stretta.

banda stretta; si osserva come lo spettro sia di tipo discreto, estendendosi da poco dopo i 100-150 Hz ad oltre i 20 KHz, anche se i livelli più elevati di pressione sonora sono rilevabili fra i 500 ed i 5000 Hz.

L'esame per bande di ottava di un colpo di arma da fuoco (Fig. 2) mostra il prevalere dei livelli più elevati di pressione sonora nelle bande di ottava contraddistinte dalle frequenze nominali 500, 1000 e 2000 Hz. Si tratta anche in questo caso delle frequenze che hanno maggior peso nella comprensione della voce parlata e quindi, se i corrispondenti recettori specifici vengono lesi, più facilmente può verificarsi l'insorgenza di handicap uditivo.

Nella Fig. 3 è riportato un esempio dello spettro ampiezza-tempo di uno sparo rilevato in un poligono di tiro chiuso (gallerie di tiro) con la relativa durata nominale dell'evento altamente impulsivo che, nella fattispecie, è di 10 ms.

E' interessante notare che mentre all'aperto un rumore altamente impulsivo (colpo di arma da fuoco o rumore esplosivo) è caratterizzato da un'onda d'urto che assume il tipico andamento della curva ad "N", in ambiente confinato (gallerie di tiro) l'onda d'urto del rumore altamente impulsivo manifesta un andamento del tipo di "Cono con vertice a destra" con configurazione decrementale progressiva per effetto delle riflessioni multiple determinate dalle pareti limitanti.

Analizzando pertanto la conformazione dello spettro ampiezza-tempo, appare ipotizzabile una più elevata otolesività del rumore altamente impulsivo in ambiente confinato ed in condizioni di campo riverberante, piuttosto che in condizioni di campo libero, quando anche a parità di L_{peak} la sua durata sia superiore a 2 ms.

Nella Tab. 2 sono riportate le differenze tra i livelli di pressione sonora rilevati in costante di tempo Peak ed i livelli in SEL, fra quelli in Peak e quelli in costante di tempo Fast e fra quelli in Impulse e quelli in Fast. Le differenze riportate nella prima colonna della Tab. 2

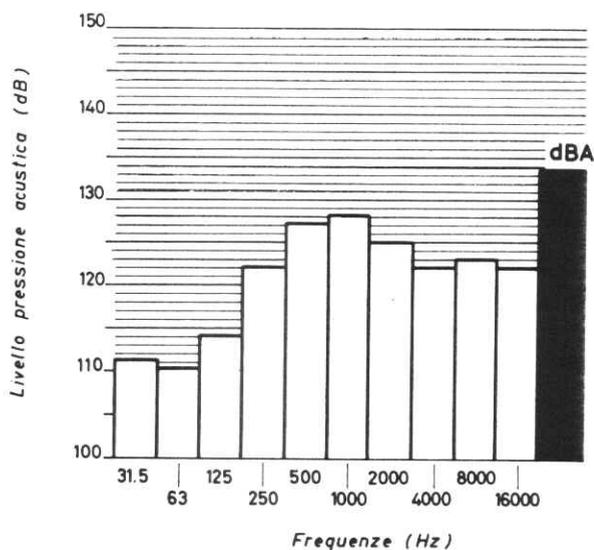


Fig. 2. — Spettro di frequenza di un colpo di arma da fuoco con analisi in bande di ottava.

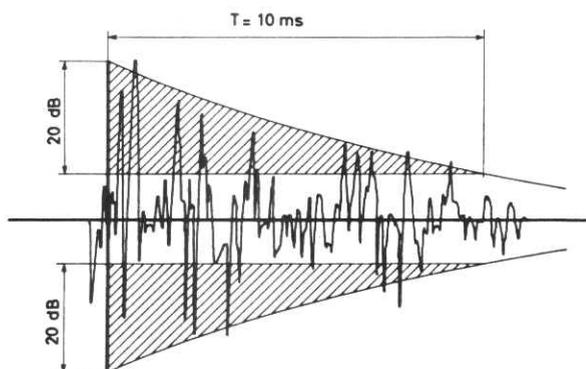


Fig. 3. — Spettro ampiezza-tempo di un colpo di arma da fuoco all'interno di una galleria di tiro.

Tabella 2. — Differenze Peak - SEL, Peak - Impulse, Peak - Fast ed Impulse - Fast in relazione a differenti tipi di arma da fuoco impiegate in gallerie di tiro

Tipo di arma	Differenze Δ							
	Peak - SEL		Peak - Impulse		Peak - Fast		Impulse - Fast	
	dBA	dBA	dB	dBA	dB	dBA	dB	
Beretta mod. 92	30,1	18,9	17,9	22,9	22,2	4,0	4,3	
Smith & Wesson	28,3	17,1	17,4	22,1	22,5	5,0	5,1	
Mitra M 12	29,2	18,3	18,2	21,7	22,1	3,4	3,9	
Valori medi	29,2	18,1	17,8	22,2	22,2	4,1	4,4	

possono essere utilizzate per l'identificazione dell'impulsività del fenomeno acustico rilevato, secondo il metodo suggerito dalla Passchier-Vermeer; i valori riportati superano tutti quello di 15 dB, valore limite questo della differenza Peak-SEL oltre il quale un rumore deve essere considerato di tipo impulsivo [1].

Le successive colonne della Tab. 2 mostrano come, utilizzando una costante di tempo congrua, la lettura del livello di pressione sonora di un evento altamente impulsivo possa essere effettuata correttamente e come invece l'utilizzazione di costanti di tempo inadatte porti a sottovalutare, anche in maniera accentuata, il livello energetico dell'evento stesso [2].

Valutazione dei livelli di esposizione del personale nei poligoni di tiro

Per commisurare l'esposizione al rumore esplosivo nei poligoni di tiro sono stati impiegati tre metodi di valutazione: (a) misura diretta dell'EQLA con fonometro integratore; (b) misura diretta dell'EQLA in costante di tempo impulse; (c) calcolo dell'EQLA commisurando i valori del SEL con il numero degli eventi verificatisi nel tempo di esposizione.

Tenendo conto del fatto che il tempo di esposizione massimo è pari a 4 ore (14.400 secondi) e che i frequentatori del poligono utilizzano come mezzo di protezione una cuffia la cui attenuazione è di 23 dB, il livello di rumore all'orecchio commisurato secondo i tre metodi sopra indicati risulta rispettivamente pari a 77,9 dBA (misurati direttamente con fonometro integratore), a 83,1 dBA (misurati per integrazione diretta in costante di tempo impulse) ed a 81,3 dBA (calcolati a partire dai valori di SEL).

Lo scarto maggiore (5,2 dBA) è quello rilevabile fra i valori ottenuti per integrazione diretta con il primo metodo e quelli ottenuti, sempre per integrazione diretta, ma con costante di tempo impulse. Il livello più elevato, ottenuto ricorrendo alla seconda delle metodologie di misura impiegate, è determinato, come è noto, dalle specifiche caratteristiche della costante di tempo impulse che penalizza in maniera più o meno marcata i rumori a carattere impulsivo e l'incremento di valore dei livelli rilevati non si scosta in linea di massima dai dati riportati dalla letteratura [2, 5].

Meno facilmente spiegabile è lo scarto di 3,4 dBA esistente fra i valori ottenuti per integrazione diretta con metodo standard ed i valori calcolati per via indiretta, commisurando il valore del SEL medio con il numero di eventi impulsivi verificatisi durante il tempo di esposizione. E' da tener presente tuttavia che il metodo indiretto, basato sul SEL, valuta il complesso degli eventi altamente impulsivi prevedibili secondo un programma predeterminato e quindi il numero massimo di tali eventi compresi entro un ben definito tempo di esposizione; il metodo di valutazione per integrazione diretta rispecchia invece una delle possibili realtà operative con le eventuali irregolarità o interruzioni dovute al

fattore umano; il numero dei colpi effettivamente sparati nel tempo T (4 ore) è quindi sovente inferiore a quello previsto (1.280) dalla programmazione operativa. La metodologia di calcolo basata sul SELm inoltre, prevede inevitabilmente alcune semplificazioni: tutti gli eventi altamente impulsivi rilevabili sono valutati come se possedessero un identico livello sonoro, non solamente perché si tratta di valori mediati, ma anche perché non si può necessariamente tener conto della misura di ciascun SEL all'orecchio dell'istruttore, misura che prelude al calcolo del SEL medio, dell'eventuale effetto di attenuazione dovuto alla distanza fra il punto di misura e le altre postazioni della galleria di tiro.

Dal punto di vista biologico ad ogni modo, la metodologia di calcolo, basata sul SELm, appare più cautelativa, per quello che si riferisce alla prevenzione del danno nel soggetto esposto, rispetto a quella per integrazione diretta con metodologia standard. L'utilizzazione della sopracitata metodologia di calcolo per via indiretta, si dimostra inoltre vantaggiosa in quanto costituisce anche un metodo di predeterminazione dell'EQLA e dei livelli di esposizione da esso derivati, che consente di poter agevolmente manipolare, ai fini previsionali, i dati ricavati attraverso il calcolo.

Dall'esame dei dati relativi ai rilevamenti effettuati, mentre risulta accettabile l'esposizione di 4 ore giornaliere per gli istruttori, muniti di idonei mezzi di protezione auricolare, si precisa che la valutazione dei livelli massimi di rumore misurati nella scala di integrazione Peak, indica che anche l'esposizione ad un solo evento esplosivo senza l'uso di adeguati mezzi di protezione, potrebbe determinare effetti otesivi anche gravi a tipo di trauma acustico.

Poiché le condizioni ambientali impongono l'uso continuato di mezzi di protezione individuale, a norma anche di quanto prescritto dalla Direttiva CEE, si rende necessaria l'esecuzione di controlli audiometrici iniziali e periodici ad intervalli che di norma non dovrebbero eccedere un anno, nei confronti di tutti i frequentatori dei poligoni di tiro ed in particolare degli istruttori che sono maggiormente esposti al rischio di danno uditivo [3, 4].

Ricerca sperimentale: seconda fase

Essendo stato accertato nella prima fase della ricerca che il ricorso a cuffie o ad altri sistemi protettivi idonei costituisce una indispensabile misura preventiva per tutti coloro che frequentano i campi di tiro, appare evidente che l'identificazione dei più affidabili criteri di valutazione dell'efficacia dei mezzi di protezione dell'orecchio costituisce un problema di primaria importanza.

In linea generale l'individuazione delle caratteristiche prestazionali delle cuffie, tenendo conto delle specifiche condizioni di esposizione dei soggetti interessati, può essere riferita ai seguenti punti essenziali:

a) Il mezzo di protezione acustica deve fornire una

attenuazione del livello sonoro del singolo evento esplosivo tale da assicurare una efficace protezione contro i rischi da trauma acustico acuto.

b) Esso deve fornire una curva di attenuazione sonora coerente con le caratteristiche della sorgente di rumore da cui è necessario proteggersi. La risposta in frequenza del mezzo protettivo cioè, deve presentare il massimo effetto schermante nel campo delle frequenze in cui l'evento sonoro si manifesta con i livelli più elevati; per contro è necessario che l'attenuazione nel campo di frequenze interessate dalla voce parlata non sia così elevata da impedire la comprensione delle comunicazioni verbali.

c) Il mezzo di protezione deve determinare nel complesso un'attenuazione tale che il livello di esposizione sonora quotidiana, al termine della giornata lavorativa, rientri nei limiti di ammissibilità previsti, allo scopo di impedire l'insorgenza, a lungo termine, di un danno uditivo permanente.

d) L'otoprotettore deve inoltre soddisfare le esigenze di comfort individuale, soprattutto nei confronti di coloro che debbono indossarlo per tempi prolungati.

Tenendo presenti i requisiti di funzionalità sopra elencati, è stata effettuata una indagine sperimentale relativa alla valutazione delle caratteristiche di otoprotezione di otto modelli di cuffie, da sottoporre ad un esame comparativo che ne mettesse in evidenza le prestazioni acustiche in rapporto alle specifiche condizioni di impiego cui le cuffie stesse sono destinate.

Strumenti e tecniche di misura

La valutazione comparativa delle prestazioni dei mezzi di protezione esaminati è stata effettuata analizzando preliminarmente le caratteristiche spettrali di un colpo di arma da fuoco e misurando successivamente l'attenuazione del livello sonoro in questione da parte della cuffia considerata, ricorrendo ad una analisi in frequenza, riferita a ciascuna banda di ottava nel campo compreso tra 31,5 e 16000 Hz.

Dovendo studiare un fenomeno che si presentava con caratteristiche di omogeneità (rumore generato soltanto da colpi di arma da fuoco leggere) e che quindi si riferiva a condizioni ripetitive di eventi sonori similari, che dovevano essere confrontati fra loro, si è adottata una metodica specifica, che ha utilizzato come mezzo di trasduzione un orecchio artificiale il cui microfono è stato collegato ad un analizzatore in tempo reale, in grado di eseguire analisi spettrali nelle varie condizioni sperimentate.

Mediando i livelli sonori per ciascuna banda di ottava e calcolando i rispettivi scarti quadratici medi, relativi ad una serie di misure sperimentali, è stato possibile valutare, con un sufficiente grado di affidabilità, l'entità delle componenti di attenuazione in frequenza ed i valori delle attenuazioni globali per ciascuna delle cuffie campione esaminate.

È utile rilevare che il metodo suddetto, basandosi su misure oggettive (orecchio artificiale) effettuate su un unico e specifico tipo di rumore (sparo di una pistola Beretta 92), è apparso meglio rispondente di quello soggettivo (basato su misure di soglia uditiva in presenza di emissioni di toni puri alle differenti frequenze), anche perché la curva di risposta in frequenza dell'orecchio ai bassi livelli energetici corrispondenti alla soglia uditiva, si discosta sensibilmente dalla curva di risposta dell'orecchio stesso a livelli sonori particolarmente elevati come quelli che caratterizzano l'emissione acustica di un colpo di pistola.

Nelle prove sperimentali, relative alla ricerca descritta, la catena strumentale utilizzata era costituita da un orecchio artificiale Brüel & Kjaer tipo 4152 inserito all'interno della testa di un manichino il cui orecchio si trovava all'altezza di circa m 1,50 dal suolo in prossimità dell'arma da fuoco, ad una distanza tale da riprodurre le reali condizioni di esposizione dell'operatore.

L'orecchio artificiale era collegato ad un analizzatore in tempo reale, predisposto per analisi in frequenza su ciascuna ottava di banda, con risposta lineare. Per visualizzare lo spettro dell'evento esplosivo, l'analizzatore in tempo reale era predisposto per memorizzare il livello massimo di picco dell'evento sonoro esaminato, corrispondente al momento dello sparo.

Utilizzando questa tecnica di misura, la valutazione delle prestazioni della cuffia è stata effettuata facendo ricorso al metodo ISO-NIOSH (ISO Draft TC 43 4869 del 1977 e NIOSH 76-120 del 1975) denominato comunemente *long method*, che utilizza una procedura più complessa ma in grado di offrire, rispetto ad altri metodi, un maggior grado di affidabilità e più sicure garanzie di protezione [6, 7].

La procedura *long method* ISO-NIOSH si basa in sintesi sulla esecuzione delle seguenti operazioni:

a) Analisi in frequenza dell'evento specifico da studiare. Questa prima analisi viene effettuata utilizzando il manichino privo di cuffia ed inviando il segnale del trasduttore microfonico dell'orecchio artificiale all'analizzatore in tempo reale predisposto per risposta su scala lineare e con memorizzazione del livello massimo dell'evento sonoro rilevato (Tab. 3, riga 1).

b) Introduzione dei fattori correttivi relativi alla curva di ponderazione A (Tab. 3, riga 2).

c) Calcolo dei livelli sonori corretti secondo la curva di ponderazione A, relativamente a ciascuna banda di ottava (Tab. 3, riga 3).

d) Analisi in frequenza della protezione offerta dalla cuffia. Tale analisi viene effettuata munendo il manichino del mezzo protettivo ed analizzando il segnale attenuato secondo la stessa procedura indicata al punto 1 (Tab. 3, riga 4).

e) Calcolo della deviazione standard per ciascuna serie di misure relative alle singole frequenze analizzate (Tab. 3, riga 5).

f) Correzione della protezione della cuffia misurata

sperimentalmente su ciascuna frequenza con la sottrazione di due volte la deviazione standard. Questa correzione è un'operazione cautelativa che assicura una elevata affidabilità dei livelli di protezione da assumersi per i successivi calcoli (Tab. 3, riga 6).

g) Calcolo del livello sonoro all'orecchio con la protezione della cuffia relativo a ciascuna banda di ottava, ottenuto come differenza tra i valori riportati nella riga 1 della Tab. 3 ed i corrispondenti valori della riga 6 della stessa tabella.

h) Somma logaritmica delle componenti in frequenza della riga 3 della tabella per ottenere il valore globale ponderato A del livello dell'evento sonoro esaminato senza l'attenuazione della cuffia (composizione dei livelli).

i) Somma logaritmica delle componenti in frequenza della riga 7 della tabella per ottenere il valore globale del livello dell'evento sonoro esaminato con la protezione della cuffia (composizione dei livelli).

l) Calcolo della attenuazione della cuffia come differenza tra i livelli sonori calcolati al punto i) e quelli calcolati al punto h).

E' utile sottolineare ancora che il *long method* costituisce il criterio più preciso e cautelativo per la valutazione della efficienza delle cuffie.

Esistono peraltro metodi più semplificati, ma meno accurati, che non comportano l'analisi spettrale del fenomeno in esame, ma che sono basati sulla semplice sottrazione di un fattore numerico singolo dal livello globale del fenomeno acustico stesso. Tali ultimi metodi

sono comunemente denominati *short method* e indicati come criterio "R" e "NRR".

Con il primo criterio l'attenuazione del mezzo di protezione si ottiene sottraendo al livello globale in dBA del rumore all'orecchio non protetto un fattore di correzione "R"; con il secondo criterio l'attenuazione viene calcolata sottraendo al livello globale in dBC del rumore all'orecchio non protetto, un fattore di correzione "NRR".

Ordinariamente i fattori R ed NRR sono forniti dalla casa produttrice del mezzo protettivo, sulla base di specifiche di omologazione.

Valutazione comparativa dell'efficacia di vari tipi di cuffia

L'indagine sperimentale della seconda fase della ricerca è stata orientata verso la valutazione comparativa di otto tipi di cuffie utilizzando la già descritta strumentazione e tecnica di misura.

In particolare, essendo in presenza di eventi sonori altamente impulsivi, abbastanza omogenei, rilevati in condizioni ambientali costanti (colpi di arma da fuoco — pistola Beretta mod. 92 — in galleria di tiro) è apparso opportuno effettuare le valutazioni comparative utilizzando il *long method*, in quanto esso consente di fornire una risposta *ad hoc*, più precisa e riferita alle specifiche caratteristiche spettrali dell'evento sonoro analizzato.

A titolo esemplificativo viene indicata nella Tab. 3 la valutazione della efficacia di una delle cuffie esami-

Tabella 3. — *Valutazione della efficacia della cuffia n. 1*

Riga	Frequenza (Hz)	125	250	500	1000	2000	4000	8000	
1	Livello sonoro evento esplosivo sc. lineare	126,04	126,95	129,70	131,57	131,42	136,95	126,74	
2	Correzione pesatura A	-16,10	-8,60	-3,20	0,00	+1,20	+1,00	-1,10	
3	Livello sonoro evento esplosivo scala (A)	109,94	118,35	126,50	131,57	132,62	137,95	125,64	
4	Valore medio attenuazione cuffia (dB)	12,67	24,17	29,14	35,74	28,11	25,31	28,29	
5	Deviazione standard delle misure	0,68	1,27	1,31	1,14	0,98	1,42	1,28	
6	Attenuazione cuffia meno 2 volte deviazione standard	11,31	21,63	26,52	33,46	26,15	22,47	25,73	
7	Livello sonoro su orecchio protetto	98,63	96,72	99,98	98,11	106,47	115,48	99,91	
8	Livello globale evento esplosivo senza cuffia: 140,2 dBA (composizione riga 3)								
9	Livello globale evento esplosivo con cuffia: 116,4 dBA (composizione riga 7)								
10	Attenuazione globale cuffia: 23,8 dBA								

nate effettuata in base al *long method*, mentre in Fig. 4 è riportato lo spettro in frequenza dell'evento sonoro all'orecchio con e senza cuffia.

Per le altre cuffie è stata impiegata la stessa metodologia riportata nella Tab. 3.

Esaminando i risultati ottenuti per la valutazione delle otto cuffie prese in considerazione, sono stati ottenuti i dati finali di seguito riportati:

- Cuffia n. 1: attenuazione globale 23,8 dBA
- Cuffia n. 2: attenuazione globale 19,5 dBA
- Cuffia n. 3: attenuazione globale 19,4 dBA
- Cuffia n. 4: attenuazione globale 18,1 dBA
- Cuffia n. 5: attenuazione globale 16,5 dBA
- Cuffia n. 6: attenuazione globale 13,6 dBA
- Cuffia n. 7: attenuazione globale 13,6 dBA
- Cuffia n. 8: attenuazione globale 11,6 dBA

E' necessario aggiungere che attraverso il confronto dei dati riportati in Tab. 1, relativi al valore massimo del livello sonoro per un colpo di arma da fuoco (pistola Beretta mod. 92) pari a 147,5 dBA Peak, l'attenuazione offerta da tutti i campioni di cuffia esaminati è di per sé sufficiente ad evitare che in corrispondenza dell'orecchio protetto possa verificarsi un superamento del limite di 140 dBA Peak, che può essere considerato, anche sulla base della recente Direttiva CEE, corrispondente al limite massimo di accettabilità per esposizione ad eventi sonori impulsivi [3].

Ad ogni modo il margine di sicurezza che caratterizza i differenti tipi di protettore auricolare esaminati varia da un massimo di 16,3 dBA per la cuffia n. 1 ad un minimo di 4,1 dBA per la cuffia n. 8.

E' anche da rilevarsi che, almeno nei casi in cui erano disponibili dati di omologazione espressi come NRR (cuffie n. 2, 5, 6, 7), i livelli di attenuazione calcolati sulla base di rilevamenti sperimentali risultano sensibilmente più bassi di quelli dichiarati dal fabbricante come scarti dell'ordine di 5 - 11 dB.

Con un successivo esame analitico è stato inoltre calcolato il numero massimo di eventi esplosivi a cui può essere esposto un frequentatore del poligono che indossi i vari tipi di cuffie esaminate, affinché non venga superato il livello massimo ammissibile di esposizione giornaliera pari a 90 dBA. Il calcolo viene eseguito attraverso la seguente procedura:

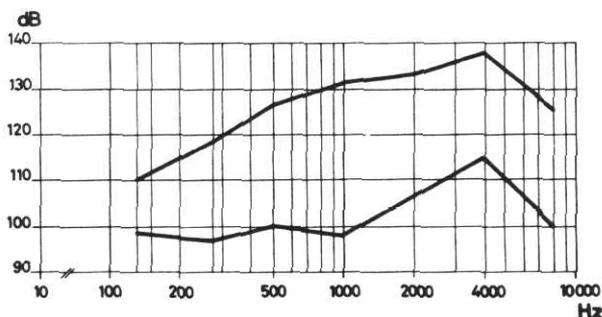


Fig. 4. - Spettro in frequenza dell'evento sonoro all'orecchio senza cuffia e con la cuffia, della cuffia n.1.

a) misura del contributo energetico per il singolo evento, espresso come SEL (Single Event Level);

b) integrazione della energia accettata attraverso l'esposizione ad "n" colpi, fino a raggiungere il limite di esposizione giornaliera di 90 dBA.

In base a misure eseguite sperimentalmente con un fonometro integratore Brüel & Kjaer mod. 2230, è stato possibile ricavare il valore medio del contenuto energetico di ciascuno sparo effettuato con la pistola Beretta 92.

Tale valore medio, espresso come SEL, risulta pari a 117,4 dBA (Tab. 1). L'integrazione di "n" eventi esplosivi determina una esposizione al rumore, che espressa come Livello Equivalente Continuo per otto ore lavorative (EQLA8) è data da:

$$EQLA8 = 10 \log \frac{1}{T} n 10^{0,1 SEL_{dBA}}$$

nella quale:

T: tempo effettivo massimo di permanenza giornaliera dell'istruttore nel poligono, assunto pari a 4 ore (14.400 secondi)

SEL: Single Event Level medio pari a 117,4 dBA.

e pertanto:

$$EQLA8 = 10 \log n + 10 \log 10^{11,74} - 10 \log 14.400 = 10 \log n + 75,80 \text{ dBA}$$

Assumendo il limite massimo di esposizione all'orecchio pari a 90 dBA (come EQLA8) e sommando a questo limite l'attenuazione offerta dai vari tipi di cuffia, può essere calcolato il numero massimo di eventi esplosivi al quale possono essere esposti giornalmente gli istruttori, senza che sia superata la soglia di ammissibilità prefissata ($EQLA8 = 90 \text{ dBA}$) utilizzando la seguente espressione analitica:

$$n = \text{antilog } 0,1 (90 + AC - 10 \log 10^{0,1 SEL} + 10 \log T)$$

nella quale:

n: numero massimo di eventi esplosivi cui può essere giornalmente esposto il soggetto munito di cuffia, assumendo un valore limite di $EQLA8 = 90 \text{ dBA}$.

AC: attenuazione offerta dalla cuffia (in dBA).

SEL: contenuto energetico medio per singolo evento del rumore altamente impulsivo considerato.

T: tempo effettivo massimo di permanenza giornaliera nell'ambiente di lavoro.

Utilizzando il procedimento di calcolo riportato nella precedente formula analitica ed indicando il numero massimo ammissibile di eventi esplosivi "n" che può essere calcolato, qualora venga indossato il protettore acustico "i", assumendo $T = 14.400 \text{ s}$ e $SEL \text{ medio} = 117,4 \text{ dBA}$ si ottengono i seguenti risultati:

- per la cuffia n. 1, $n_1 = 6310$ colpi;
- per la cuffia n. 2, $n_2 = 2345$ colpi;
- per la cuffia n. 3, $n_3 = 2295$ colpi;
- per la cuffia n. 4, $n_4 = 1700$ colpi;
- per la cuffia n. 5, $n_5 = 1180$ colpi;
- per la cuffia n. 6, $n_6 = 600$ colpi;
- per la cuffia n. 7, $n_7 = 600$ colpi;
- per la cuffia n. 8, $n_8 = 380$ colpi.

L'espressione analitica sopra riportata, fornendo direttamente il valore di "n", rappresenta uno strumento matematico particolarmente fine per l'identificazione della efficacia della protezione di una cuffia in presenza di rumore altamente impulsivo.

Un'altra verifica a cui sono state sottoposte le cuffie, si basa sulla valutazione dell'effetto di interferenza dei mezzi protettivi con i messaggi verbali.

Considerando il "mascheramento" che la cuffia esercita nel campo di frequenze interessanti la voce umana, la cui gamma spettrale è ordinariamente estesa fra 200 e 6000 Hz, ma che ai fini della sola intelligibilità delle comunicazioni verbali può essere ristretta nell'intervallo tra 250 e 4000 Hz, è possibile valutare l'effetto di disturbo esercitato dalle singole cuffie prese in esame sulla comprensione di segnali vocali.

Se si fa riferimento ai valori medi dei livelli sonori della voce di conversazione, percepiti in funzione della distanza tra gli interlocutori e del livello di pressione

sonora della voce stessa, è possibile ottenere i dati riportati nella Tab. 4 [8].

Assumendo pertanto la distanza tra istruttore ed allievo pari ad un metro e supponendo che le istruzioni vengano impartite a voce alta o, al limite, gridate, il livello sonoro all'esterno della cuffia può essere stimato pari ad almeno 67 dBA. Esaminando le prestazioni delle varie cuffie considerate, può constatarsi che, sulla base dei dati analizzati le attenuazioni medie nel campo di frequenze compreso fra 250 e 4000 Hz risultano essere quelle riportate nella Tab. 5 che nella sua ultima colonna di destra contiene il valore della attenuazione globale caratteristica di ciascuna cuffia, ottenuto come somma energetica dei singoli livelli sonori di attenuazione dei protettori auricolari esaminati, nelle bande di ottava che interessano l'intelligibilità della voce umana.

E' utile evidenziare che, pur verificandosi una attenuazione marcata della voce parlata per le cuffie nelle quali l'indice totale di protezione acustica è più elevato, in alcuni dei modelli esaminati, come ad esempio in quelli indicati dai numeri 4 e 5, è presente una distribuzione delle componenti in frequenza, tale che l'attenuazione della voce risulta essere marcata senza che per contro sia garantita una soddisfacente protezione nei riguardi del rumore specifico di tipo altamente impulsivo.

Tabella 4. — Valori medi in dBA dei livelli sonori percepiti in funzione della distanza tra gli interlocutori e dell'intensità di emissione della voce

Distanza tra gli interlocutori (m)	Valori medi dei livelli di conversazione			
	voce normale	voce forte	alta voce	gridando
0,15	71	77	83	89
0,30	65	71	77	83
0,60	59	65	71	77
1,00	55	61	67	73
1,20	53	59	65	71
1,50	51	57	63	69
2,00	49	55	61	67
2,40	47	53	59	65
3,70	43	49	55	61
7,00	37	43	49	55

Tabella 5. — Attenuazioni per bande di ottava (in dB) ed attenuazione globale (in dBA) fornite dalle singole cuffie nel campo di frequenze interessanti l'intelligibilità della voce umana

Tipi di cuffia	Livelli di attenuazione per bande di ottava (dB)					Attenuazione globale (dBA)
	250 Hz	500 Hz	1000 Hz	2000 Hz	4000 Hz	
n. 1	24,17	29,14	35,74	28,11	25,31	37,60
n. 2	8,16	13,14	22,36	28,63	25,58	31,10
n. 3	14,25	16,99	22,23	27,22	23,48	34,80
n. 4	12,06	25,51	32,65	30,91	19,75	35,50
n. 5	28,05	27,95	36,31	24,24	17,04	37,70
n. 6	7,50	8,27	12,75	21,23	23,20	25,70
n. 7	19,51	9,09	16,28	24,07	20,67	27,10
n. 8	11,70	9,58	14,14	20,44	15,15	22,80

Si può rilevare infine, che nel caso della cuffia n.1, per la quale la riduzione del livello della voce parlata è pari a 37,6 dBA, l'allievo munito di cuffia, pur usufruendo di una notevole attenuazione del livello del rumore altamente impulsivo cui è esposto, percepisce ancora abbastanza distintamente messaggi verbali da

parte dell'istruttore, in quanto ordinariamente il livello della voce gridata ad 1 metro di distanza dal soggetto emittente, può raggiungere i 75-80 dBA [9].

Ricevuto il 17 maggio 1986

Accettato il 22 luglio 1986

BIBLIOGRAFIA

1. PASSCHIOR-VORMEER, W. 1983. Measurement and rating of impulse noise in relation to noise-induced hearing loss. In: *Proceedings of Fourth International Congress Noise as a Public Health Problem*. Torino, 21-25 giugno 1983. G. Rossi (Ed.). Vol. 1 pp. 149-157.
2. BRÜEL, P.V. 1975. Determination of noise level (Do we measure correctly?). In: *Congresso internazionale: L'uomo e il rumore*. Torino 7-10 giugno 1975. Minerva Medica Ed. pp. 189-220.
3. COMUNITA' ECONOMICA EUROPEA. 1984. Proposta modificata del Consiglio in materia di protezione dei lavoratori contro i rischi derivanti dalla esposizione ad agenti chimici, fisici e biologici durante il lavoro: rumore. *G.U. CEE* NC 214/11 del 14 agosto 1984.
4. COMUNITA' ECONOMICA EUROPEA. 1985. *Proposition de directive "Bruit"*. Add. n. 1 à la note introductive 7101/85 — SOC 164, 31 May 1985.
5. PIAZZA, R. & BENEDETTO, G. 1977-1978. La valutazione dei rumori impulsivi. *Riv. Ital. Acustica* (1977) 1 (1-2): 5-32; (1978) 2 (1): 3-23.
6. INTERNATIONAL ORGANIZATION FOR STANDARDIZATION. 1977. *Measurement of sound attenuation of hearing protectors*. — ISO Draft Proposal TC 43 4869.
7. NATIONAL INSTITUTE FOR OCCUPATIONAL SAFETY AND HEALTH. 1975. *List of personal hearing protectors and attenuation data*. U.S. Department. H.E.W. Publication No. (NIOSH) 76-120 (Sept. 1975).

8. BOLT, R.H., BERANEK, L.L. & NEWMANN, R.B. 1952. *Handbook of acoustic noise control*. Vol. 1: Physical acoustics. WADC TR 52-204, December 1952.
9. HARRIS, C.M. 1979. *Handbook of noise control*. Mc Graw Hill, New York. pp. 14.1-14.9.