

A.N.M.

ASSOCIAZIONE NAZIONALE
MAGISTRATI

sez. Brescia

SNOP

SOCIETÀ NAZIONALE
OPERATORI DELLA PREVENZIONE

sez. Lombardia

**UN NUOVO APPROCCIO
ALLA VALUTAZIONE DEL DANNO DA RUMORE
NEL PROCESSO PENALE**

L'INDEBOLIMENTO PERMANENTE DELL'ORGANO DELL'UDITO DA TRAUMA ACUSTICO.

Valutazione e significato nella comprensione della comunicazione verbale.

G. Broich* - R. Brambilla**

*Clinica Otorinolaringoiatrica , Università di Milano, IRCCS-Ospedale Maggiore di Milano

**Servizio di Fisica Sanitaria, IRCCS-Ospedale Maggiore di Milano

A. Introduzione

Frequentemente ci capita di confrontarci con problemi posti dal traumatismo sonoro, acuto prima e cronico in seguito. La lesione uditiva da esposizione a rumori elevati sul posto di lavoro costituisce una delle cause più frequenti di lesioni personali gravi. Le disposizioni di legge intese alla tutela degli addetti alle lavorazioni a rischio, ivi compreso il danno da rumore, hanno visto un continuo accrescersi dell'attenzione ad esso dedicata. Ma se il legislatore e gli organi di controllo hanno assolto in parte alla propria parte di compito, permangono tuttavia punti incerti e aperti alla discussione. Spetta ai tecnici, medici e operatori sanitari in genere, chiarire le fondamentali scientifiche del quadro, anche per mettere il legislatore nella condizione di emanare norme precise in merito.

Al pari di ciascuno degli altri sensi, l'udito permette all'uomo la relazione col proprio ambiente. Qualsiasi alterazione funzionale di tale organo, sia essa quantitativa, in forma di ipoacusia pantonale, o qualitativa, in forma di distorsione del messaggio sonoro tale da renderne inintelligibile il significato, costituisce una grave menomazione della persona. Riconoscendo nei sensi e nei sistemi funzionali d'organo una unità funzionale inscindibile, ciascuna per conto suo essenziale per una cenestesi corretta della persona, il legislatore da tempo ha considerato la menomazione della funzione di un senso come caso di particolare gravità, vedendone gli estremi di interesse pubblico tanto da inserirlo nel gruppo delle lesioni procedibili d'ufficio. Questo punto del codice penale, in cui viene giustamente e con lungimiranza riconosciuto il peculiare ruolo del danno sensoriale, merita una particolare attenzione. A differenza della legislazione civile, in cui il danno va quantificato e dove l'entità del danno è fondamentale per un giudizio, nel caso di un indebolimento permanente di un organo o di un senso il legislatore chiede solo che venga accertato l'esistenza di appunto un indebolimento permanente, senza quantificarne l'entità. Da questo deriva che il magistrato giudicante chiede al tecnico, nel caso specifico del danno dell'organo dell'udito, al clinico otiatra, se esiste un danno e se sì, se e' di entità tale da poter essere considerato un "indebolimento". Il compito dell'otiatra sarà pertanto di accertare se un eventuale danno a carico dell'udito sia tale da costituirne un indebolimento funzionale e qui la discussione e' da tempo aperta e a tratti accanita.

Per una discussione sulla soglia oltre la quale è lecito parlare di indebolimento permanente della funzione uditiva sono necessarie alcune premesse di fisiologia dell'organo dell'udito. Ogni suono, per arrivare ad essere decodificato dalla corteccia cerebrale, deve giungere alla membrana timpanica per il tramite del padiglione e del condotto, attraversare l'orecchio medio con il suo apparato ossiculare funzionante da amplificatore e quindi raggiungere la coclea. A tale livello, recettori neurosensoriali specifici raccolti nell'organo di Corti agiscono come trasduttori meccanoelettrici, trasformando le oscillazioni pressorie del suono in potenziali bioelettrici. Tali potenziali, via l'ottavo paio di nervi cranici, vengono trasmessi al cervello, che ne realizza la decodificazione

ed il riconoscimento. In caso di danno all'orecchio medio, come in esito ad otiti, si parla di ipoacusia trasmissiva; si parla di ipoacusia neurosensoriale in caso di danno a livello della coclea o dell'ottavo nervo cranico. Merita precisare che mentre il danno trasmissivo consente spesso interventi terapeutici efficaci tramite la cura farmacologica dell'otite o una chirurgia ricostruttiva, il danno neurosensoriale, quale esso sia, non permette solitamente alcun recupero. L'approccio terapeutico interviene più facilmente a danno già in uno stadio avanzato, con un buon numero di cellule nervose ormai morte e le restanti incapaci di rigenerare e ripristinare la parte di funzione perduta. Tipicamente neurosensoriale, il danno da rumore possiede una fisionomia specifica di cui descriveremo le caratteristiche. La perdita di cellule nervose conseguente ad esposizione a rumore a livelli lesivi non compromette allo stesso modo tutte le frequenze percepite dall'orecchio, ma colpendone alcune maggiormente di altre provoca una distorsione più o meno accentuata. Pertanto, la semplice analisi della tipologia del danno acustico non esaurisce il nostro compito. La funzione dell'udito consiste nell'informare il soggetto di quali suoni lo circondano e attraverso di esso viene inteso il messaggio verbale che deve essere recepito, analizzato ed inteso. Una semplice alterazione anatomica che non si traducesse in una riduzione della capacità del soggetto di ricevere il messaggio verbale, o musicale o analogo che sia, resterebbe un dato tecnico di scarsa rilevanza pratica. Per poter invece decidere quali danni funzionali si traducono in un effettivo indebolimento di funzione dell'organo, occorre analizzare più da presso la struttura del messaggio verbale e musicale.

B. Anatomia, fisiologia e clinica del danno da rumore

Abbiamo già evidenziato che un danno uditivo neurosensoriale è la conseguenza diretta di una patologia che interessa le cellule recettoriali e/o le vie nervose successive. È essenziale distinguere tra danno neurosensoriale da rumore e tutte le altre cause di ipoacusia neurosensoriale, indicando con chiarezza le caratteristiche specifiche del primo (Tab.1). Il danno da rumore si esplica dapprima sulle cellule ciliate esterne, che esercitano una azione modulatrice su quelle interne, realizzando un guadagno uditivo complessivo prossimo ai 45dB. Una perdita uditiva di 45-50dB in seguito a trauma acustico può pertanto essere considerata come valore limite indicante una pressoché completa scomparsa della funzionalità delle cellule ciliate esterne. Il danno si esplica con partenza a carico delle frequenze di 3000 e 4000 Hz. Tenendo conto della tipica morfologia di un tracciato audiometrico con danno da trauma acustico, è oggi generalmente possibile separare una eventuale componente trasmissiva o neurosensoriale da altra causa, dalla ipoacusia da rumore. Va sottolineato che anche se il danno si evidenzia maggiormente alle frequenze acute come detto, il rumore causale proviene da tutto lo spettro acustico. Può essere utile richiamare alcuni aspetti clinici, cercando innanzitutto di evidenziare che cosa differenzi il tracciato audiometrico di danno neurosensoriale da rumore rispetto alle curve da presbiacusia e da danno metabolico. La morfologia audiometrica del danno da rumore è riassunta nelle figure 2.1 e 2.2. Va anche ricordato che una traccia "in salita" sugli acuti non significa sempre danno da rumore. Il danno da rumore prevede una perdita a 3000Hz maggiore che a 2000 e a 1000. In caso contrario, ci troveremmo piuttosto di fronte ad una traccia da danno virale, metabolico e/o idropico.

Il fatto che il danno da trauma acustico sia centrato con la sua massima intensità su una frequenza tanto elevata come i 4kHz, ha portato a considerare significativi solo danni di entità elevata, ove il danno si estende anche alle frequenze inferiori. Originalmente solo le frequenze tra i 500 ed i 2000 Hz vennero tenuti in considerazione, adducendo che frequenze superiori erano troppo lontane dalle frequenze della voce umana normale per poter incidere sulla funzionalità dell'organo dell'udito, rimanendo la frequenza fondamentale della voce sotto i 500 Hz. Questo ha portato a considerare insignificanti le riduzioni della capacità uditive a 3 e 4kHz anche elevate da un punto di vista anatomofunzionale e fisico. Da alcuni anni la maggioranza dei tecnici è con-

corde nell'elevare il limite superiore a 3000Hz, utilizzando tabelle derivate da quelle della Associazione Americana degli Otologi per la valutazione civilistica del danno. Ma quanto incide realmente la facoltà di udire suoni a 4000Hz sulla funzione dell'udito e a quale livello possiamo parlare di un indebolimento dell'organo in un danno a tale frequenza? Per tentare di dare una risposta a tale domanda è necessario analizzare da un punto di vista fisico il suono del messaggio verbale.

C. Fondamenti di acustica e struttura del messaggio verbale

La fisica acustica definisce suono puro una oscillazione periodica caratterizzata da una precisa frequenza. Il campo uditivo dell'uomo abbraccia le frequenze dai 50 ai 12000Hz. In natura non si registrano tanto suoni puri quanto suoni costituiti da un insieme di diversa frequenza ed ampiezza. Nella comune vita di relazione, un suono puro tende ad essere modulato, sommando alla propria frequenza fondamentale delle oscillazioni armoniche di varia ampiezza, prodotte dalla colonna aerea in cui si muove e dalle superfici dalle quali viene riflesso. Ogni suono puro e modulato, sia esso prodotto da macchine o dalla voce umana, è costituito pertanto da una somma di fenomeni oscillatori sinusoidali di varia frequenza, ove la frequenza di base del suono, determinata dalle caratteristiche fisiche dell'elemento oscillante che lo ha prodotto (corda vocale, corda di uno strumento, etc) è detta fondamentale. Su questa si inseriscono le modulazioni armoniche, la cui ampiezza e rapporto di fase sono determinate dal volume e dalle caratteristiche elastiche della colonna aerea e delle pareti in cui si muove il suono. Un tono musicale, come per esempio un LA della prima ottava, sarà caratterizzato da una fondamentale sempre uguale, ma mostrerà uno spettro di armoniche assai diverso in base allo strumento con cui è stato prodotto. Un suono puro che si arricchisce delle sue armoniche senza spostamento di fase può essere descritto a grandi linee dalla formula in Fig.1. Lo stesso vale per la voce umana. La laringe produce uno spettro abbastanza specifico di suoni, tipico per ogni persona. Ogni vocale è caratterizzata da una fondamentale, data dalle oscillazioni delle corde vocali, alla quale si sommano delle armoniche specifiche che arricchiscono la vocale stessa e la rendono diversa dalle altre. Per la descrizione di un fenomeno sonoro specifico, per esempio la vocale "a", dobbiamo eseguire una analisi dello spettro di frequenza, che ci darà una massima intensità sulla frequenza fondamentale e picchi successivi dati dalle armoniche. Se queste sono dei multipli della fondamentale moltiplicata per 2 elevato a n, il suono composto avrà un carattere chiaro e piacevole. Se viceversa le frequenze dei suoni sommati sono in rapporto diverso, si creerà una sensazione di disarmonia: il suono verrà percepito come rumore. La modulazione del suono base viene influenzata dalla morfologia e dalle caratteristiche fisiche, in volume ed elasticità, della cassa armonica in cui si irradia, sia essa un violino, un pianoforte o la bocca umana.

Per vedere in che modo queste armoniche incidono nella costituzione dei vari suoni, campioni di alcuni toni musicali e le vocali della voce umana normale maschile e femminile sono state in seguito analizzate.

D. Materiali e Metodi di analisi di suoni campione

1. Registrazione digitale

Tutte le registrazioni sono fatte con una scheda sonora A/D a 16 bit con campionatura a 44100Hz corrispondente ai parametri di alta fedeltà delle registrazioni su compact-disc. I toni puri sono stati generati dall'oscillatore digitale di una scheda Sound Galaxy Professional 16bit e registrati in circuito diretto. I toni degli strumenti musicali sono stati impostati con una tastiera MIDI Roland PC-200 MKII collegata al computer e usando il sintetizzatore per Computer Roland SC-7, registrando i suoni prodotti direttamente attraverso la scheda A/D senza altoparlanti o microfoni. La voce umana è stata registrata pronunciando le vocali con un microfono ad alta fedeltà in ambiente silente, utilizzando una voce maschile ed una femminile ed eseguendo registrazioni

della durata di 5 secondi. Il rumore di fondo elettrico del circuito del microfono è stato analizzato in una registrazione "in bianco" in ambiente silente.

2. Analisi di Fourier

Come precedentemente esposto, ogni suono puro e modulato, sia esso prodotto da macchine o dalla voce umana, è costituito da una somma di fenomeni oscillatori sinusoidali di varia frequenza, ove la frequenza di base del suono, determinata dalle caratteristiche fisiche dell'elemento oscillante che lo ha prodotto è detta fondamentale. Su questa si inseriscono le frequenze modulanti armoniche, con varia ampiezza e rapporto di fase con la frequenza fondamentale.

Cio' che appare, descrivendo graficamente un segmento sonoro, sono le variazioni di ampiezza di questa somma di frequenze in funzione del tempo. L'operatore matematico "trasformata di Fourier" consente di effettuare la scomposizione dell'onda somma nelle singole frequenze componenti, ciascuna dotata di propria ampiezza. In tal modo e' stato possibile analizzare le onde prodotte dai vari strumenti musicali e dalla voce umana, rappresentando in grafico il contributo delle singole frequenze al suono originale.

Segmenti sonori centrali di 250ms sono stati convertiti in valori numerici e, mediante un programma matematico successivamente sottoposti ad analisi tramite "trasformata di Fourier" con 2^{15} punti tramite un programma matematico scritto da noi. Al grafico di ogni suono originale, riprodotto nel primo grafico (a) di ogni parte della figura 4 per un segmento di 20 millisecondi, e' stato associato un'analisi delle frequenze che lo compongono, come illustrato nel secondo grafico (b).

Un altro indice significativo puo' essere ottenuto "pesando", per cosí dire, il contributo di tutte le frequenze comprese in un certo intervallo sul totale. Sono state sommate, in intervalli di 1000 Hz da 0 a 10kHz, le ampiezze di tutte le frequenze che si sono ottenute scomponendo i suoni originali. I risultati in percentuale di contributo "pesto" per ogni intervallo di frequenza sono riportati nel terzo grafico (c) delle figure 4.1.1-4.2.5.

Per un controllo del sistema e per escludere che siano presenti frequenze dovuto ai circuiti ed a disturbo, è stata poi effettuata una registrazione in ambiente silente con il microfono usato per la voce, il tracciato è riprodotto nel primo grafico della figura 4.3.1 e l'analisi di Fourier nel secondo.

E. Risultati

Per arrivare al nocciolo della discussione e piu` precisamente per sapere quante sono e quanto sono importanti le armoniche a frequenza acuta per poter udire precisamente un dato suono, cominciamo dall'esempio semplice di un tono musicale "puro", per passare poi alla voce umana. Prendiamo il tono musicale per antonomasia, il LA della prima ottava. Viene spontanea la domanda: ma se per definizione un LA deve essere di 440Hz, come mai il suono di un pianoforte è diverso da quello di un violino o di una tromba? Vediamo allora le caratteristiche tipiche dei diversi suoni. Nelle figure da 3.1 a 3.4 si vede la morfologia dei suoni prodotti da alcuni strumenti musicali, che evidenziano un andamento tanto diverso che a prima vista appare improbabile trattarsi sempre di un LA. La oscillazione fondamentale è inscritta in una notevole estensione di oscillazioni armoniche più rapide. Si può notare anche con un primo paragone che le oscillazioni rapide raggiungono e superano i 2000Hz. Per capire se un suono deriva da un violino o da una tromba, dobbiamo avere a disposizione le informazioni sulla oscillazione data dalla somma di tutte le frequenze armoniche. In assenza di queste, non solo non distingueremmo uno Stradivari da un violino da baraccone, ma avremmo persino difficoltà a riconoscere se il suono deriva dai piatti o da un clavicembalo!

Passando alla voce umana normale dalle nostre analisi risulta la presenza di componenti frequenziali elevate in misura significativa nelle vocali. La "U" maschile mostra uno spettro abbastanza stretto, con il 77,83% delle frequenze nella fascia da 0 a 1kHz. La "U" femminile vede invece la comparsa di una piccola componente di 7,22% tra 3 e 5 kHz e 9,31% tra 2 e 5 kHz. Nella "O" maschile si osserva uno spettro di frequenze sotto i 1000 Hz più ricco di quello femminile, nel quale si vedono le armoniche in modo più pulito e chiaro, con il 67,78% ed il 44,86% del totale rispettivamente. Si noti invece la comparsa di un picco evidente e discreto tra 3 e 5kHz che copre il 8,77% nel maschio ed il 23,01% nella femmina. Nelle vocale "A" si nota un aumento delle componenti spettrali a frequenza elevata, con solo 49,58% sotto i 1000Hz nel maschio e componenti frequenziali alte fino a ben oltre i 6000Hz. Le componenti tra 3 e 5kHz coprono il 10,44% del totale. Nella voce femminile i rapporti si accentuano a favore delle componenti alte, le frequenze basse coprono solo il 20,15%, la percentuale coperta dalle frequenze tra 3 e 5kHz è ormai del 20,10%! Meno di metà delle componenti frequenziali pesate cadono sotto i 1000Hz.

Le vocali "E" ed "I" seguono un andamento parallelo, con la comparsa nella vocale "I" di una componente acuta aggiuntiva. Nella "E" maschile, simile alla "O", le componenti frequenziali sotto il kilohertz costituiscono il 65,54%, in quella femminile cadono a 13,13%. Le frequenze tra 3 e 5 kHz ammontano a 9,53% (26,11% se si considera l'intervallo 2-5kHz) nel maschio e 47,09% nella femmina (63,81 nell'intervallo 2-5kHz). Nella "I" maschile si aggiunge un secondo picco a 4kHz, portando l'analisi dell'incidenza a 34,89% entro i 1000Hz e al 48,35% tra i 3 ed i 5kHz. Nella "I" femminile è ormai in larga misura prevalente l'insieme delle frequenze tra 3 e 5kHz, che ammontano al 65,15%, lasciando un magro 6,72% alle frequenze sotto il 1000.

Si è dato per confronto uno sguardo ad un suono sibilante per antonomasia, la "S", registrato con voce maschile per partire dalla fondamentale più bassa. Si notano componenti frequenziali distribuite per tutto lo spettro acustico fino a 10kHz e oltre, con un 21,63% iscritto entro i 1000Hz ed il 20,82% tra 3 e 5 kHz. La percentuale dello spettro superiore ai 3kHz era di 64,04%.

Lo studio del sistema ha rivelato un rumore di fondo trascurabile per ampiezza del segnale e che era costituito da uno spettro di frequenza con un picco a 50Hz, verosimilmente dato dalla corrente di alimentazione a 220V e 50Hz. Nella trasformata di Fourier l'ampiezza relativa dei 50Hz era posta ad 1 e quella delle frequenze oltre i 100Hz non superava gli 0,18, con una incidenza sui componenti in esame del segnale complessivo del tutto trascurabile (Fig. 4.3.1).

Possiamo vedere da questa analisi che mettendo insieme tutte le vocali della lingua italiana, le frequenze sotto il 1000 incidono per il 59,12% nel maschio e per il 29,87% nella femmina, con una media del 41,38%, quando le frequenze tra i 3 ed i 5 kHz rappresentano rispettivamente il 16,34% ed il 32,93% con una media del 24,64%. Se si considerano le frequenze tra 2 e 5 kHz l'incidenza diventa addirittura del 23,49% nel maschio e del 43,05% nella femmina, con una media del 33,27%. Circa un terzo di tutte le informazioni contenute nella voce umana sono costituite da frequenze sopra i 2kHz e un quarto cade sopra i 3kHz! (Tab IV).

F. Conclusioni

Abbiamo visto due argomenti fondamentali nella valutazione del trauma acustico da rumore. Un tracciato audiometrico va scomposto nelle sue componenti di danno, non confondendo un danno metabolico o presbiacusico con uno da rumore. Quest'ultimo ha un suo andamento specifico e una traccia con un minimo tra i 3000 ed i 4000Hz. Il danno deriva da tutti i rumori dello spettro frequenziale ma si esplica sulla coclea partendo dai 4kHz. Un danno a tale frequenza di 45-50 dB denota la perdita completa della funzionalità delle cellule ciliate esterne nella corrispondente area dell'organo di Corti. Dal punto di vista fisiologico un danno può essere considerato senz'altro significativo se raggiunge tale livello a 4kHz. In questo modo possiamo considerare lieve, ovvero senza rilevanza sociale in relazione all'indebolimento dell'udito, qualsiasi perdita inferiore ai 50dB HTL a 4000Hz, quando sarà invece da ritenere significativa una perdita che supera un tale livello. La naturale progressione del danno vedrà poi compromessi gli 8000Hz ed i 2000Hz, con un coinvolgimento sempre maggiore anche delle frequenze più basse, potendosi a questo punto parlare di danno grave o gravissimo (Tab. II). Assumere il livello di perdita di 50dB a 4000Hz come linea di demarcazione tra udito compromesso in modo lieve e significativo indebolimento del senso acustico, trova motivo anche nella compromissione di frequenze più basse, come i 2000Hz, che inizia ad incidere da questo livello di danno in poi e che, sommandosi alla preesistente ed elevata perdita sui 3000Hz, indebolisce sensibilmente e significativamente la capacità del soggetto di servirsi dell'udito. Si ricordi infine che un normale livello di conversazione oscilla tra i 40 ed i 50dB, vedendosi pertanto escluse, di fronte ad analogia entità della perdita uditiva, tutte le frequenze acute del messaggio verbale. Si può quindi facilmente dedurre quale importanza venga ad assumere un tale tipo di danno.

Da parte di una larga parte dei tecnici del settore si è sempre ritenuto che le frequenze acute come il 2000, 3000 e 4000 Hz siano di scarsa importanza per la funzionalità sociale dell'organo uditivo in genere e della comprensione del linguaggio in particolare avendo la voce umana una fondamentale di molto inferiore. La loro utilità rimarrebbe confinata all'orecchio fine di qualche professionista del suono come i musicisti. Le analisi eseguite dimostrano invece come tali frequenze siano essenziali nella composizione del linguaggio quotidiano, dall'ordinazione al Bar sino al discorso con la propria moglie ed una loro compromissione crea distorsioni nel messaggio verbale tanto da poterlo compromettere in modo grave.

Il danno da rumore occupa una posizione preminente nella società moderna. La sua incidenza non è più confinata a piccoli gruppi di lavoratori addetti a particolari mansioni, ma interessa fasce di persone sempre più estese, essendosi moltiplicate a dismisura le fonti sonore in questa seconda metà del secolo. Il rumore degli spari si somma a quello delle discoteche, delle macchine e delle moto, oltre che a quello lavorativo e l'inquinamento acustico sta assumendo una importanza uguale a quello atmosferico. E' chiaro che ogni persona va esaminata, tentando di scindere non solo il danno da trauma acustico da altre forme di danno, ma anche ricercando una corretta anamnesi acustica, soprattutto nei giovani ove spesso il trauma da cuffie musicali e discoteche viene sottovalutato. Questo per non incolpare erroneamente un danno ad una lavorazione o ad un tipo di esposizione, del tutto secondari. Ma è anche venuto il tempo in cui i mezzi di analisi digitale ed i modelli matematici devono assisterci nella valutazione del danno e fare giustizia di alcune impostazioni empiriche ormai superate. Limitare l'analisi del danno a frequenze inferiori ed uguale ai 2kHz è evidentemente limitativo e non rende giustizia del reale indebolimento dell'organo. Possiamo tranquillamente affermare che, se da una parte sono da evitare astrattismi concettuali che finiscono col parlare in termini avulsi da ogni realtà sociale e clinica - qualsiasi danno andrebbe sempre ricondotto dal suo modello matematico teorico al reale significato nell'uomo -

non ci si dovrebbe nemmeno adagiare sul passato e persistere in una posizione a tratti di eccessiva accondiscendenza a pressioni che derivano da fonti molteplici, più o meno giustificate, ma comunque lontane dalle finalità mediche e dallo spirito di una legge intesa a proteggere l'integrità fisica della persona. Siamo oggi avviati verso la costruzione di modelli matematici del funzionamento cocleare sempre più articolati, che attraverso una prima fase di valutazione generale permetteranno, con l'ausilio della predittività statistica, la ricostruzione del danno ed del suo aggravamento nel tempo in modo sempre più preciso, separando le componenti legate al trauma da rumore da quelle presbiacusiche e metaboliche. E' inoltre importante sottolineare quanto sia fondamentale l'elemento distorsivo del suono nella intelligibilità del messaggio verbale. Una ipoacusia in cui esista un elevato elemento di distorsione, come è tipico nel danno da rumore, specifico e diverso per ogni frequenza, incide maggiormente sulla funzione globale dell'udito di quanto non faccia una ipoacusia pantonale, di entità comparabile ma con poca distorsione. E per essere attendibile, la diminuzione globale del senso dell'udito dovrà realmente essere valutata come somma delle sue componenti e non più ridursi ad una imprecisa misurazione parziale (Tab. III). Le esigenze economiche non possono sostituirsi a quelle della integrità fisica della persona, soprattutto visto che oggi esistono comunque mezzi idonei di protezione o gestione dell'orario di lavoro per eseguire ogni lavorazione senza danno.

Tab. I: Caratteristiche del danno da rumore

- è un danno neurosensoriale
 - è bilaterale con traccia simmetrica
 - la perdita è progressiva durante l'esposizione con andamento asintotico
 - raggiunge un plateau di peggioramento dopo 15 anni di esposizione
 - da distruzione di vario grado delle cellule cigliate esterne
 - la perdita inizia sui 3000-4000Hz
 - la perdita a 3000Hz è peggiore che a 1000Hz
 - esiste una inversione della curvatura della traccia tra il tratto 1-4 e quello 4-8kHz
-

Tab. II: Riassunto: a 50 dB HTL a 4000Hz si ha:

- perdita completa funzione cellule cigliate esterne
 - inizia generalmente la compromissione del 2000 e del 8000 Hz e si ha conseguentemente:
 - sicura compromissione delle frequenze utili alla intelligenza della parola
-

Tab. III: Il danno uditivo deve essere valutato in base all'insieme dei dati:

- matematico: valutato in base alle ricostruzioni matematiche
- strumentale: aumento della soglia all'esame audiometrico
- soggettivo: riduzione della intelligenza del messaggio verbale ed extraverbale

Tab. IV: : Analisi frequenziale con trasformata di Fourier delle vocali della lingua italiana in voce maschile e femminile. Percentuali di incidenza in range di frequenza

Lettera	Sesso	Range di frequenza						
		0-1000	1-2kHz	2-3kHz	3-4kHz	4-5kHz	2-5kHz	3-5kHz
'u'	m	77,83	3,84	2,24	3,10	1,53	6,87	4,63
	f	64,50	5,06	4,12	7,22	2,09	13,43	9,31
'o'	m	67,78	4,35	2,55	2,90	5,87	11,32	8,77
	f	44,86	6,62	4,13	11,33	11,68	27,14	23,01
'a'	m	49,58	24,47	7,89	5,02	5,42	18,33	10,44
	f	20,15	34,06	13,67	14,40	5,70	33,77	20,10
'e'	m	65,54	3,69	16,58	7,13	2,40	26,11	9,53
	f	13,13	2,55	16,72	18,22	28,87	63,81	47,09
'i'	m	34,89	2,60	6,46	32,62	15,732	54,81	48,35
	f	6,72	1,11	11,94	23,94	41,21	77,09	65,15
's'	m	21,63	4,70	8,63	13,47	7,35	29,45	20,82
Valori medi (solo vocali)	m	59,12	7,79	7,14	10,15	6,19	23,49	16,34
	f	29,87	9,88	10,12	15,02	17,91	43,05	32,93
entrambi		44,50	8,84	8,63	12,59	12,05	33,27	24,64

$$\sum_{n=0}^t A_n \text{sen}(x * 2^n)$$

ove t= numero massimo armoniche
An= Fattore di ampiezza

Fig.1: Sommatoria della fondamentale e delle armoniche

Fig. 2.1: Tipi di danno neurosensoriale uc

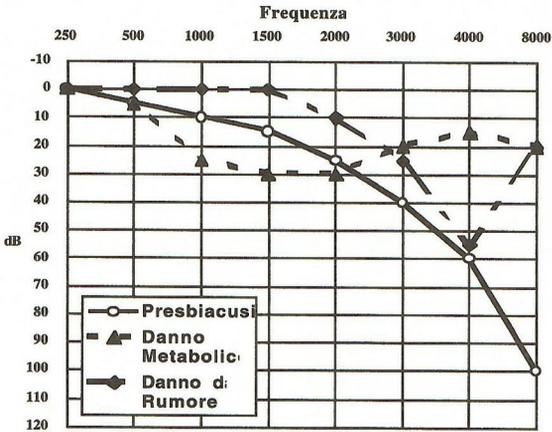


Fig. 2.2: Livelli del danno da run

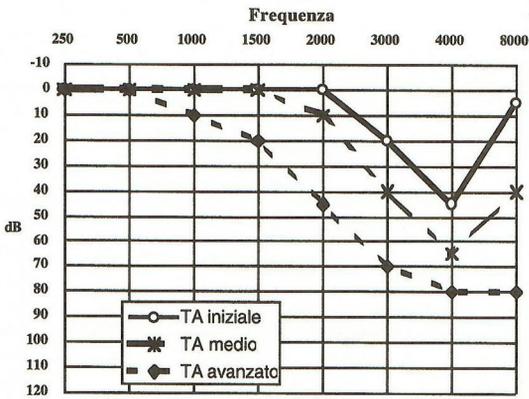


Fig. 2: Tracce audiometriche di danno da rumore

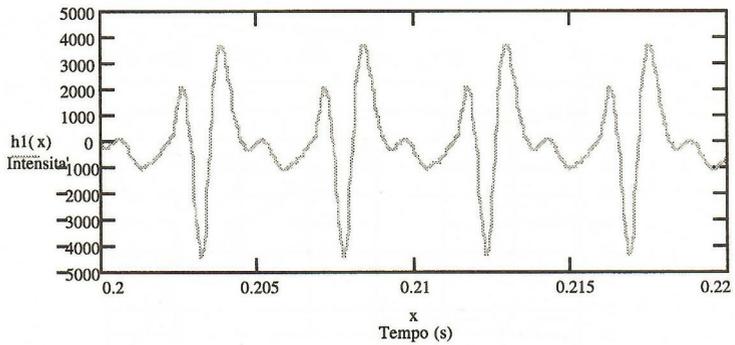
Fig.3: Registrazione del LA della prima ottava di diversi strumenti musicali

Fig.3.1: LA1 - Clavicembalo

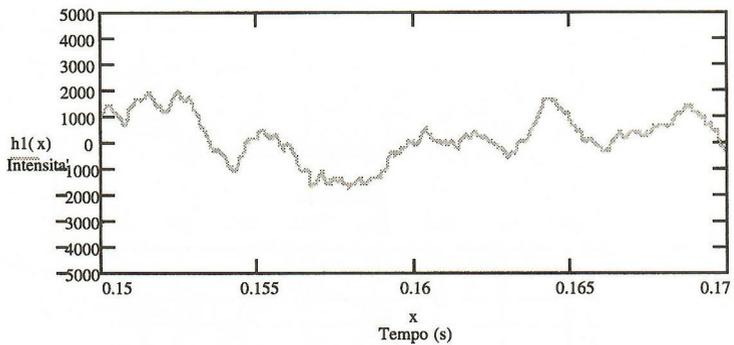


Fig.3.2: LA1 - Pianoforte

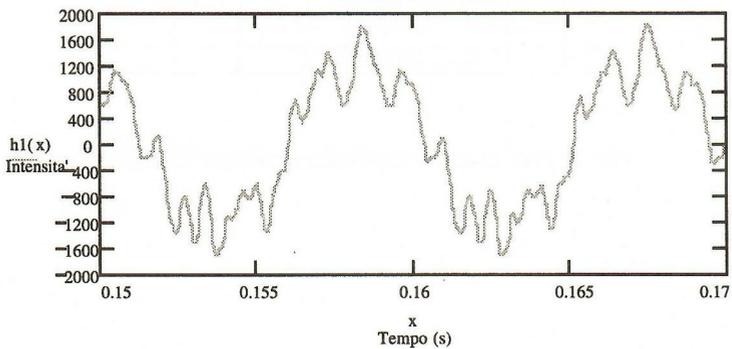


Fig. 3.3: LA1 - Violino

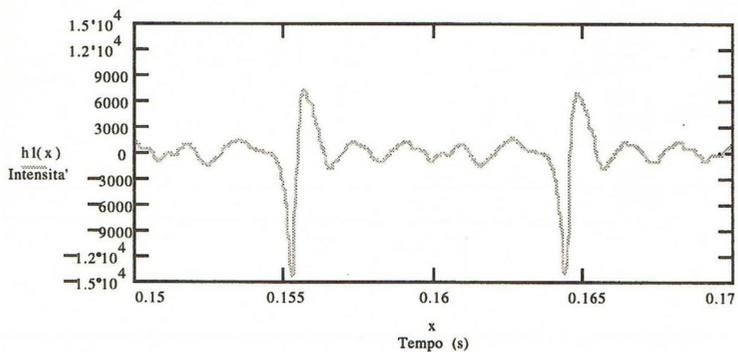


Fig.3.4: LA1 - Tromba

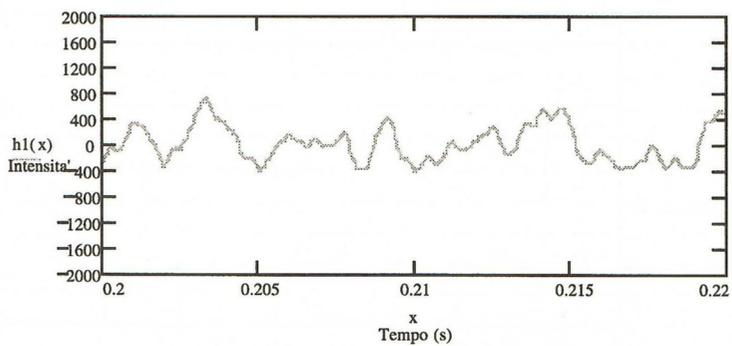
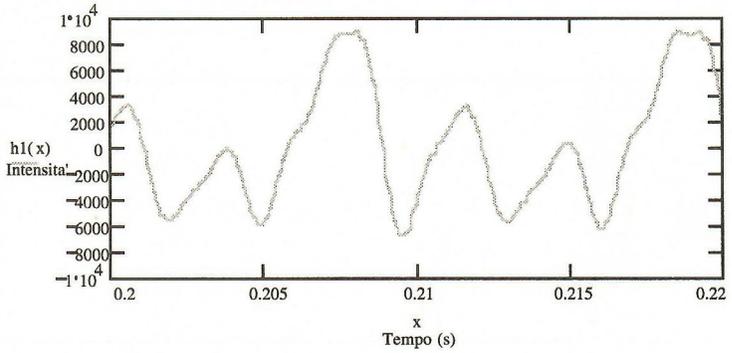
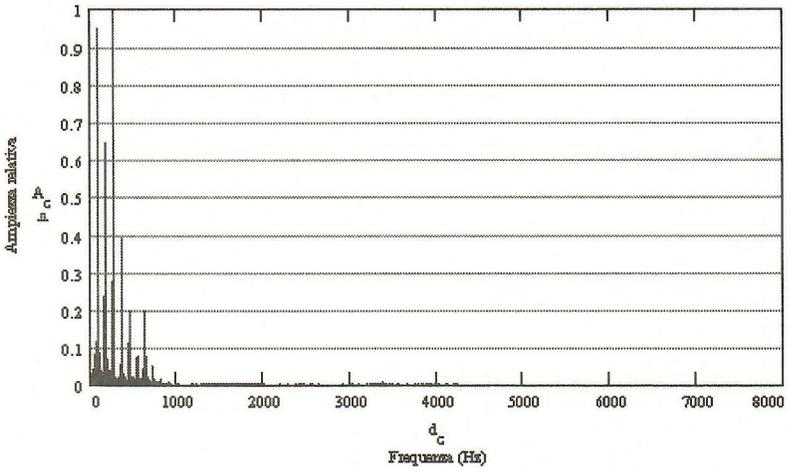


Fig. 3.5: LA1 - Piatti

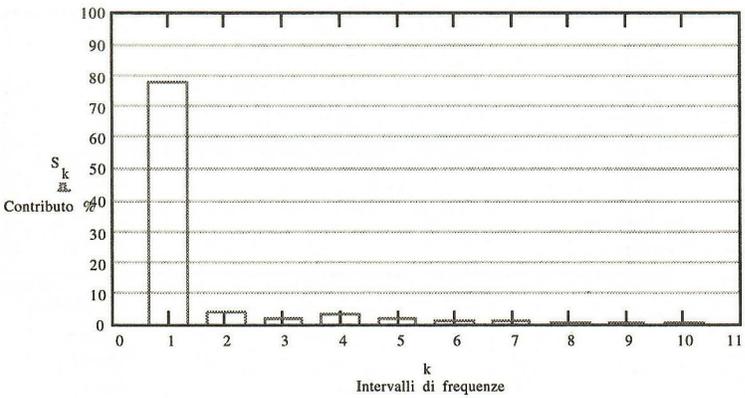
Fig. 4: Analisi della voce umana normale



a

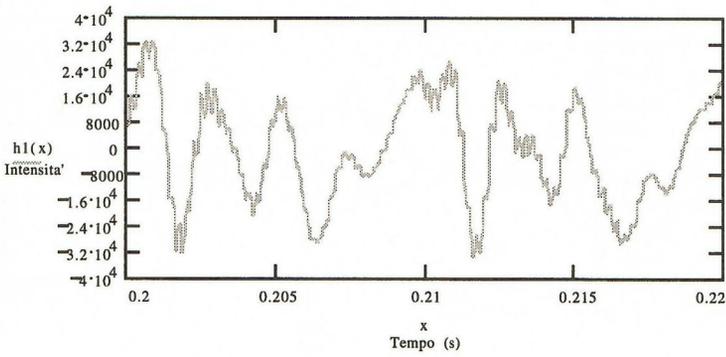


b

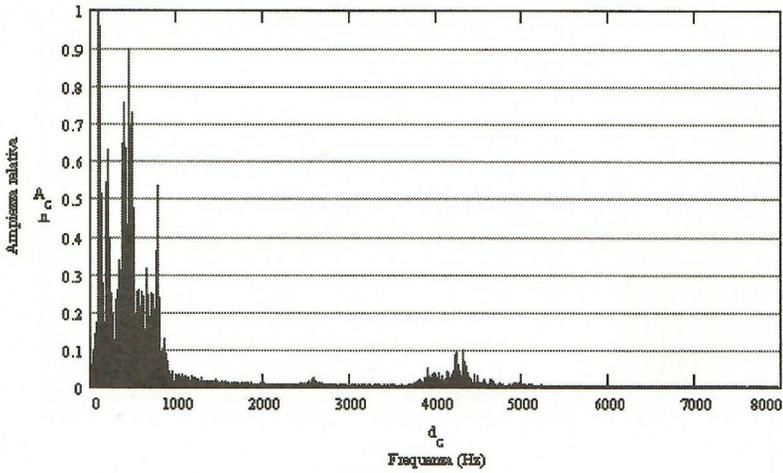


c

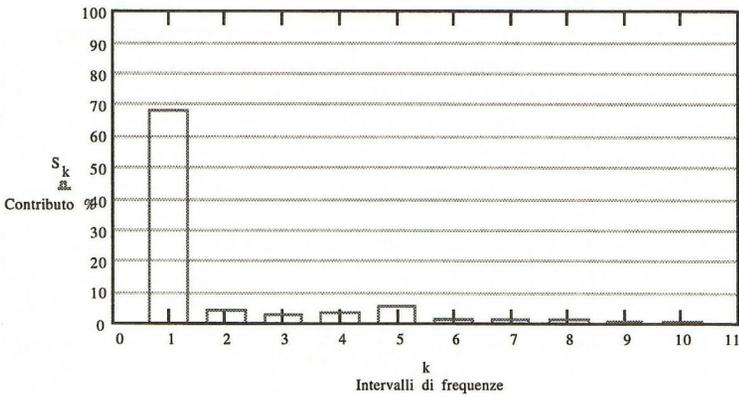
Fig. 4.1.1: Voce maschile, vocale "U"



a

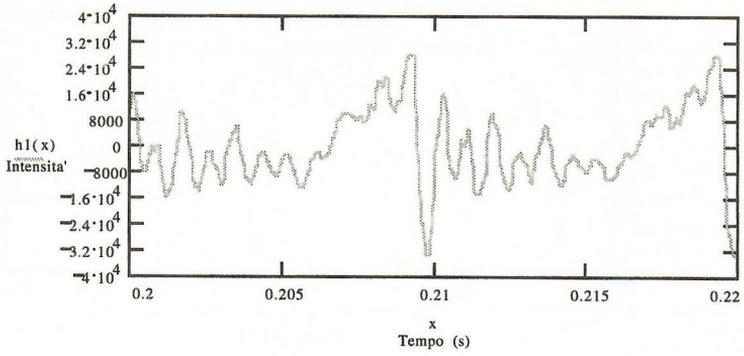


b

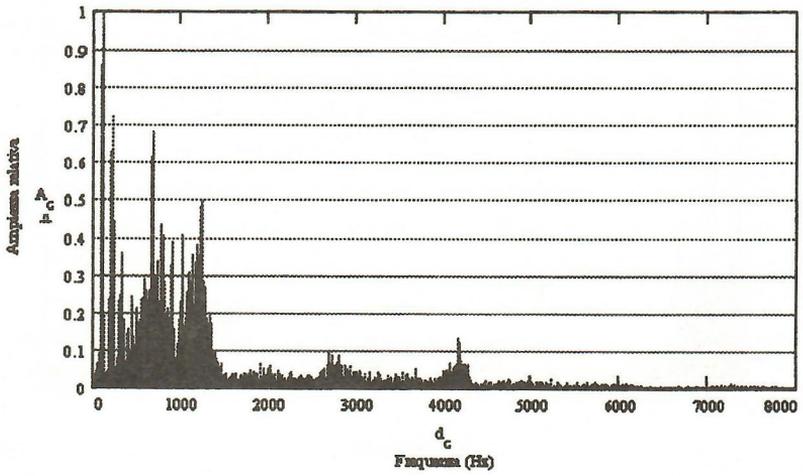


c

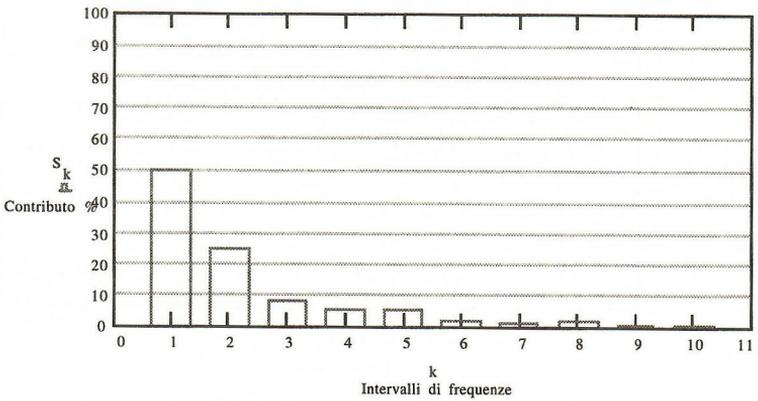
Fig. 4.1.2: Voce maschile, vocale "O"



a

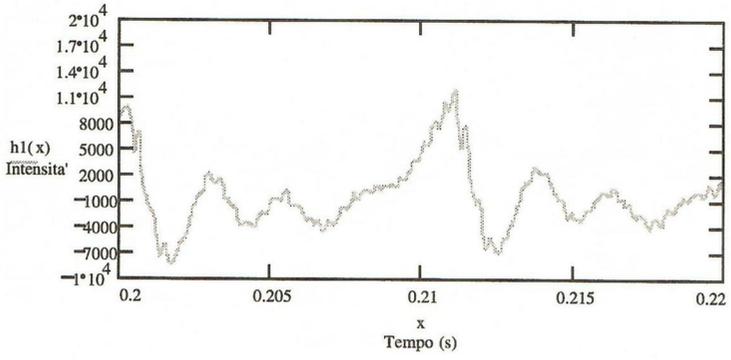


b

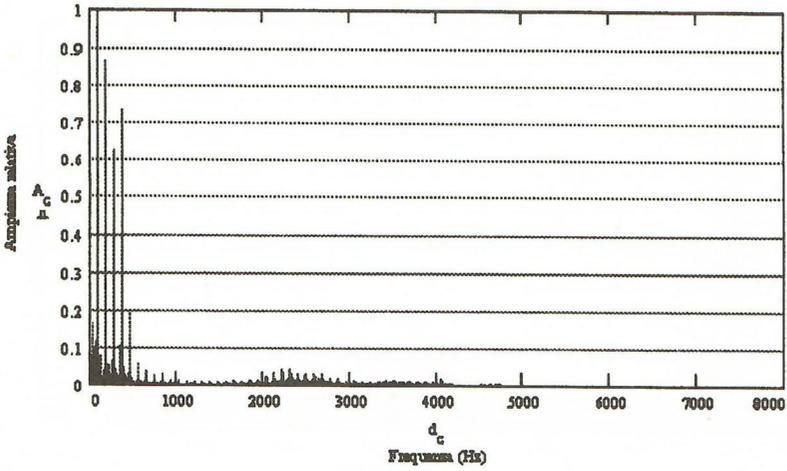


c

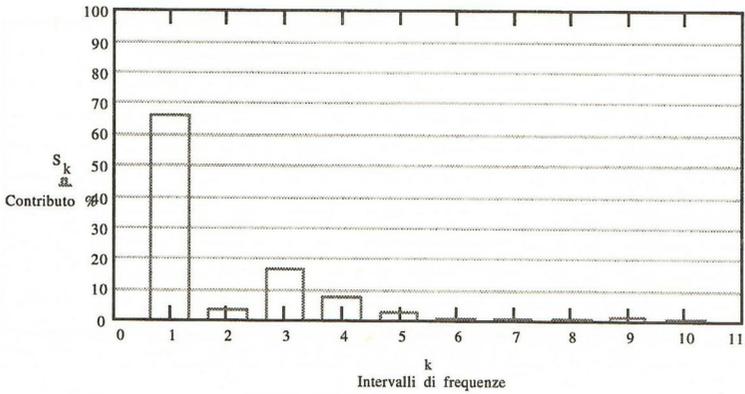
Fig. 4.1.3: Voce maschile, vocale "A"



a

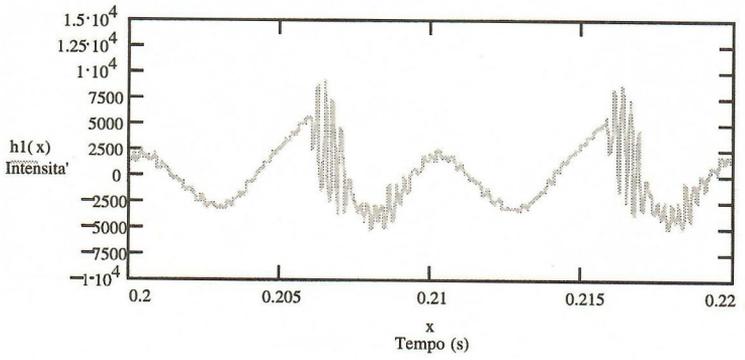


b

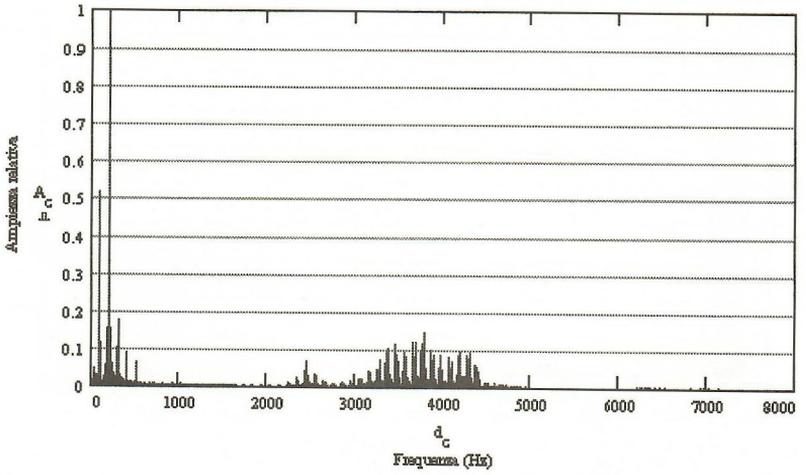


c

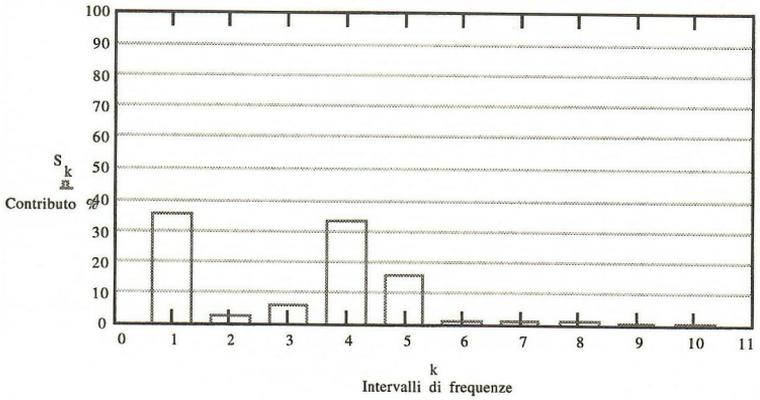
Fig. 4.1.4: Voce maschile, vocale "E"



a



b



c

Fig. 4.1.5: Voce maschile, vocale "l"

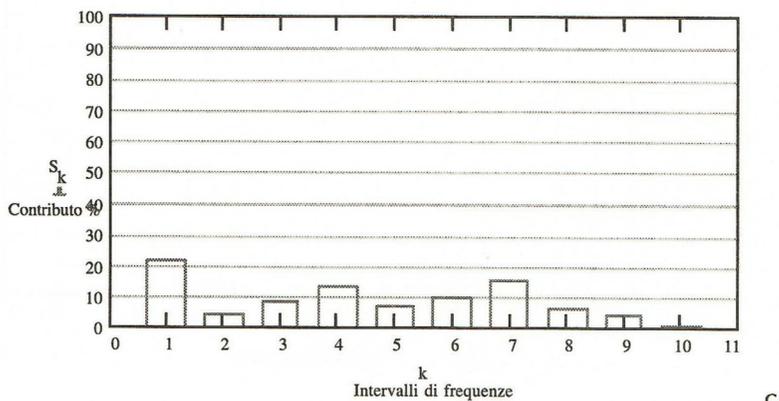
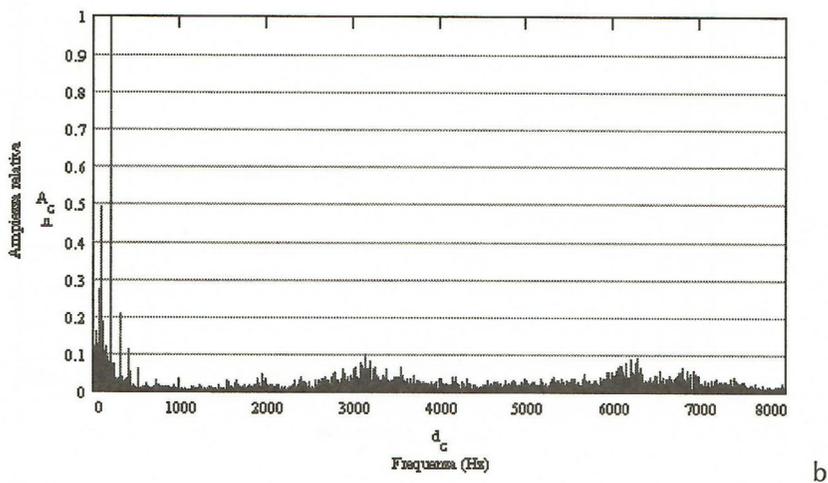
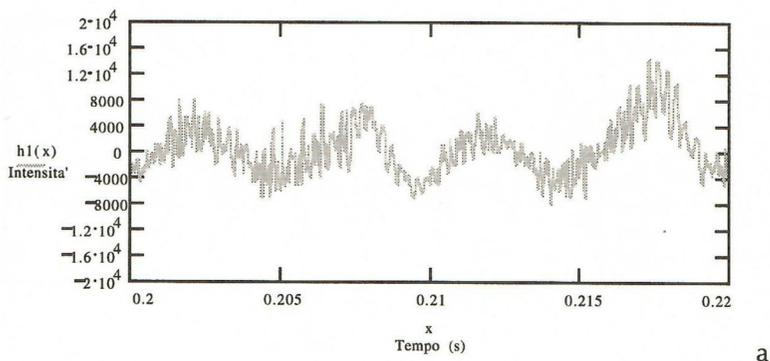
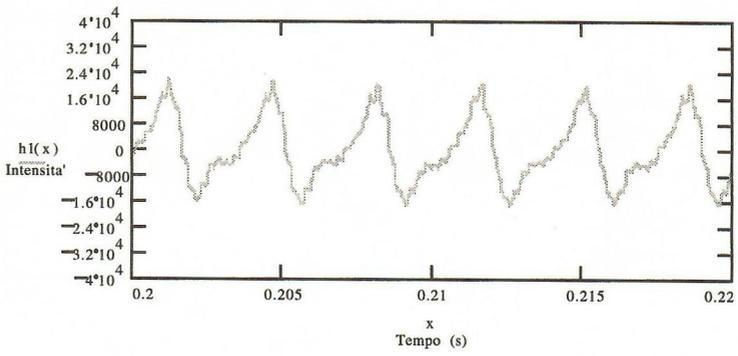
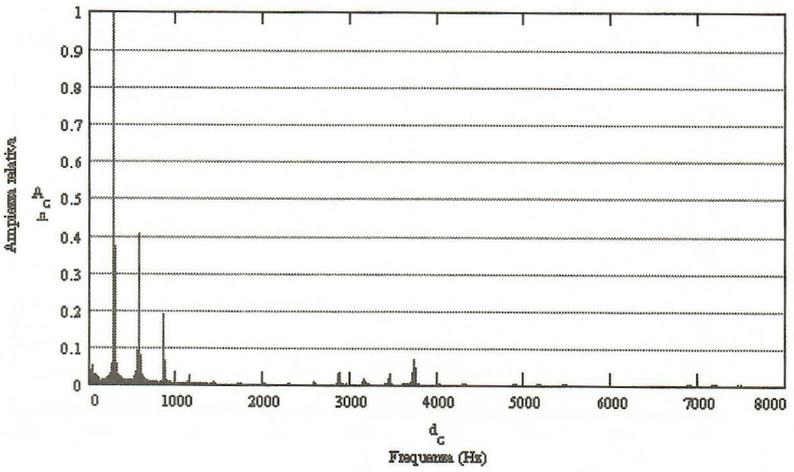


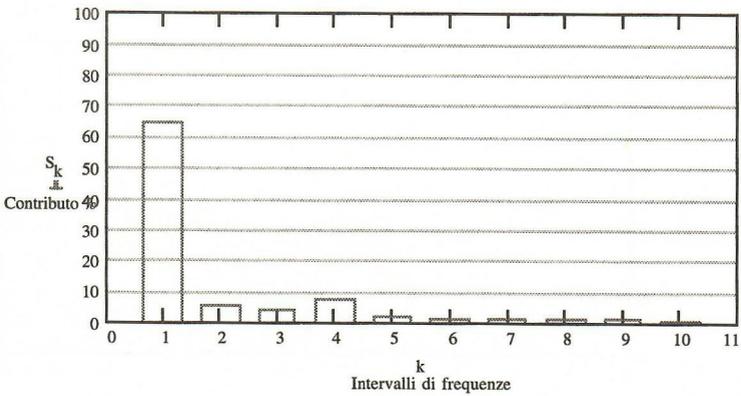
Fig. 4.1.6: Voce maschile, consonante sibilante "S"



a

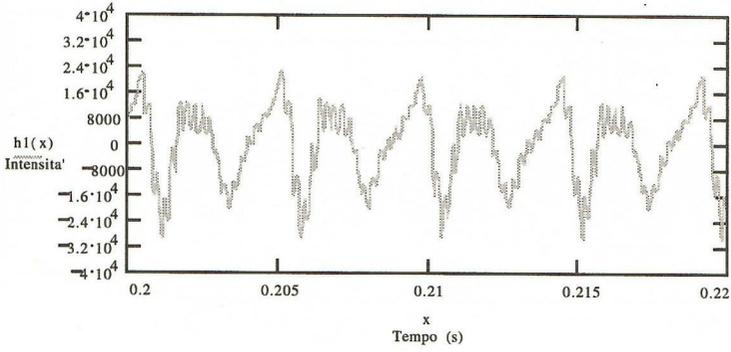


b

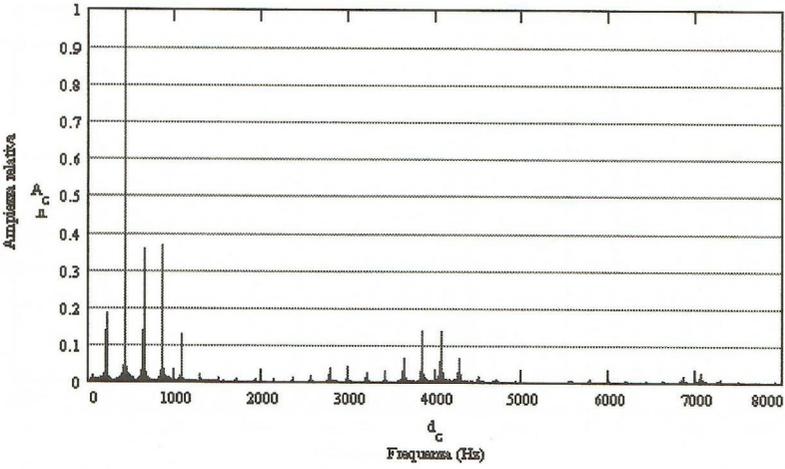


c

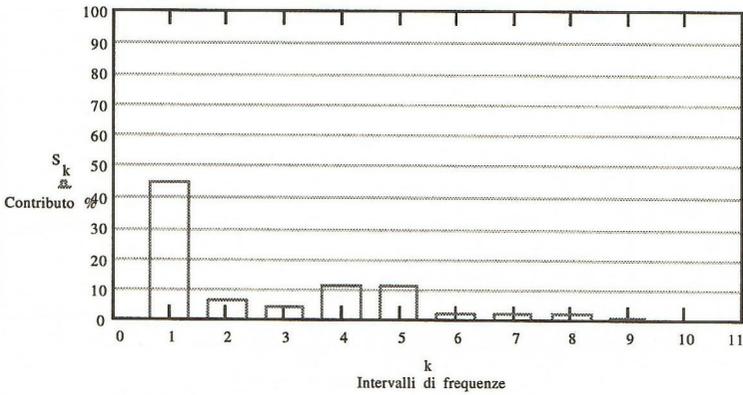
Fig. 4.2.1 Voce femminile, vocale "U"



a

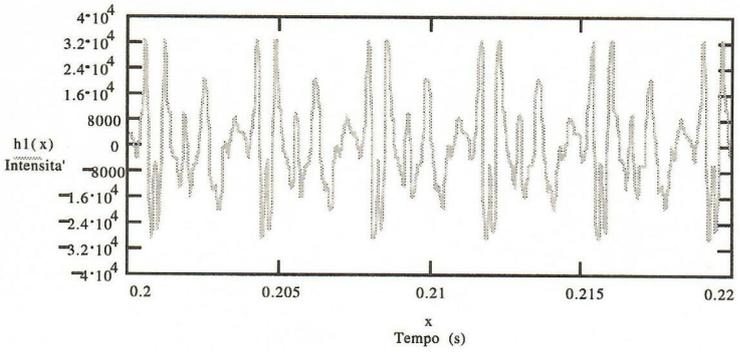


b

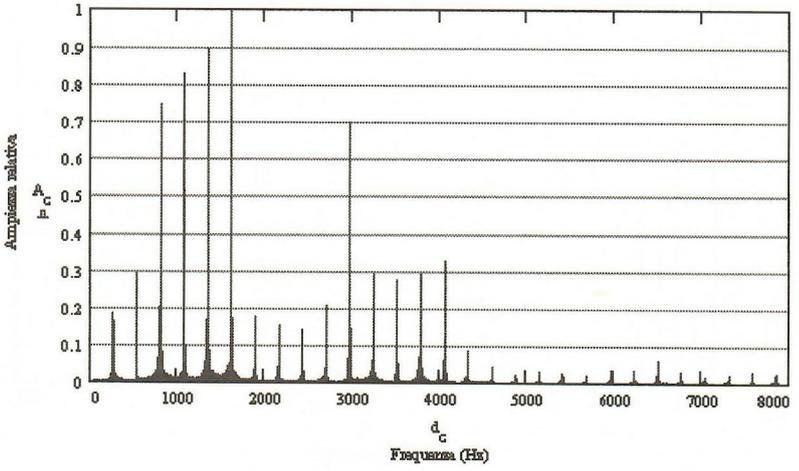


c

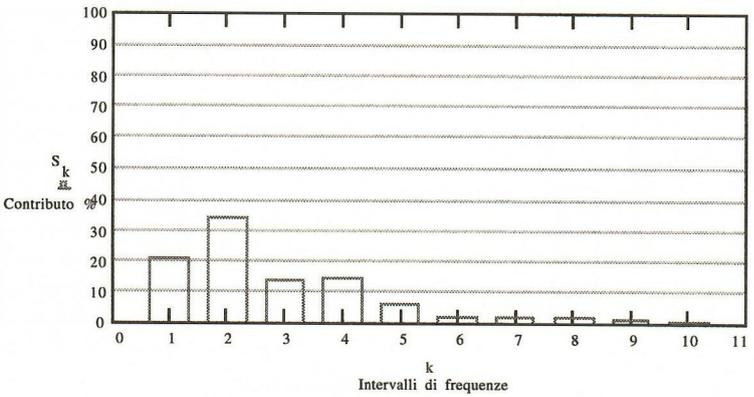
Fig. 4.2. Voce femminile, vocale "O"



a

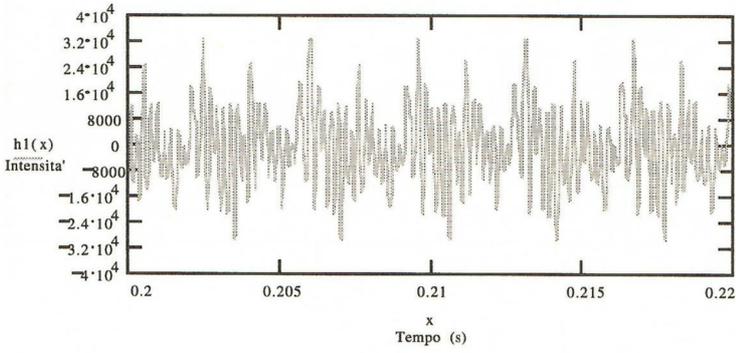


b

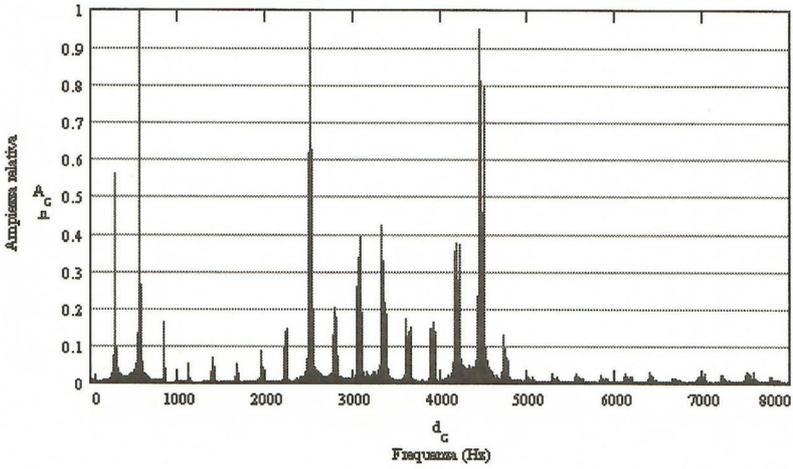


c

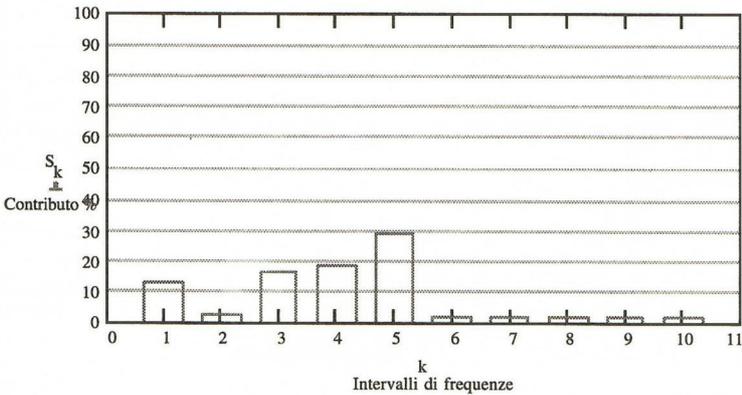
Fig. 4.2.3: Voce femminile, vocale "A"



a

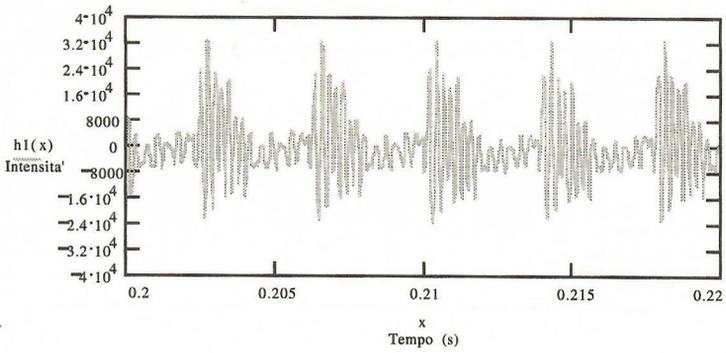


b

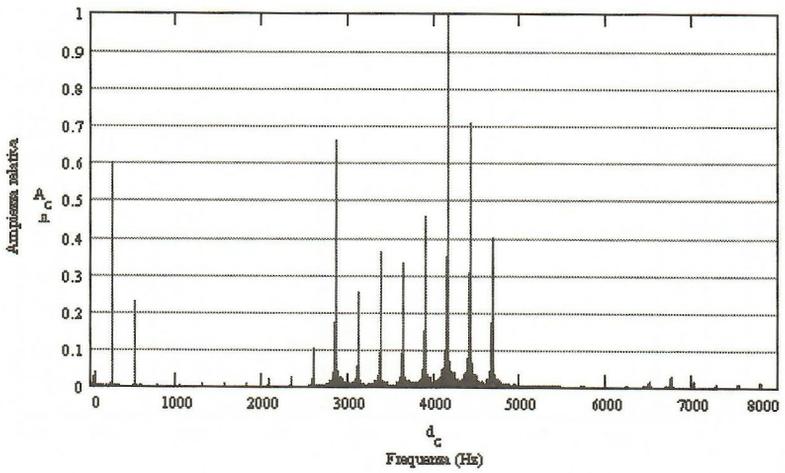


c

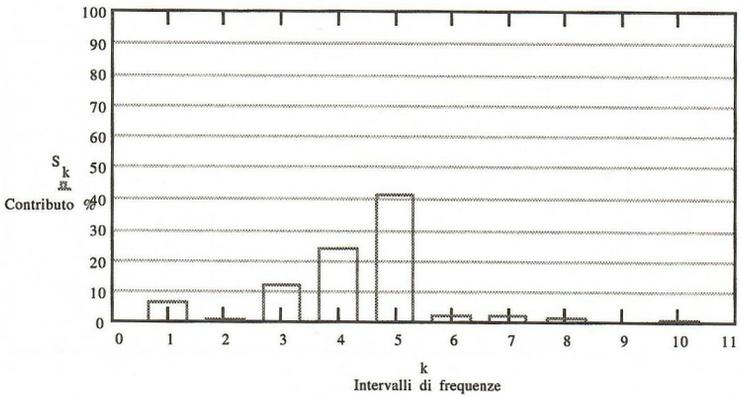
Fig. 4.2.4: Voce femminile, vocale "E"



a

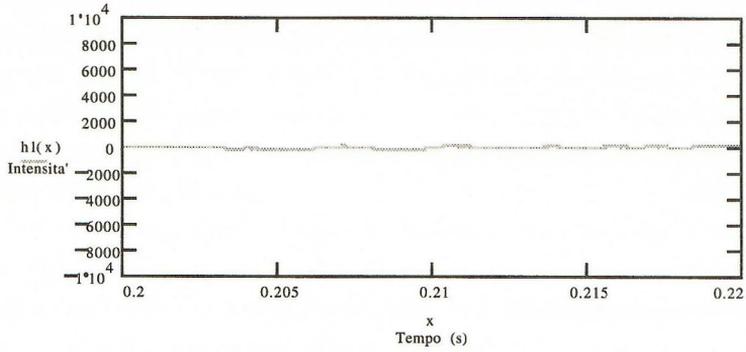


b

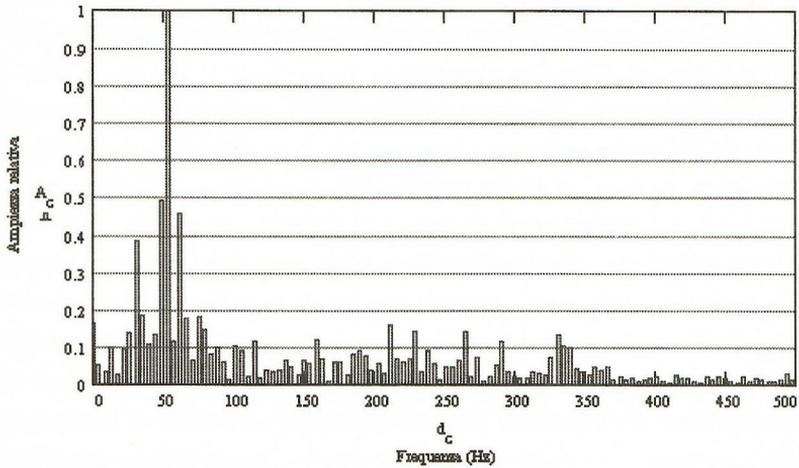


c

Fig. 4.2.5: Voce femminile, vocale "I"



a



b

Fig. 4.3.1 Analisi del rumore interno del sistema di registrazione