

TIMPANOMETRIA A BANDA LARGA CON MICROSONDE P-V

Domenico Stanzial (1), Martina Buiat (1), Giorgio Sacchi (1), Silvano Prosser (2)

1) CNR-IDAS "Corbino" Sezione di Ricerca di Ferrara, c/o Dipartimento di FISICA dell'Università di Ferrara, v. Saragat, 1- 44122 Ferrara, domenico.stanzial@cnr.it

2) Università di Ferrara, Dip. Discipline Medico-Chirurgiche Scienze Comportamento e Comunicazione ORL – Audiologia.

1. Introduzione

Uno dei test audiologici oggettivi che potrebbe trarre vantaggi dall'impiego delle tecniche di misura, basate sulle microsonde pressione-velocità rese oggi disponibili dalla tecnologia MEMS, è la timpanometria. Questa metodica clinica, in uso fin dal 1970, contribuisce infatti (benché in batteria con altri test) a evidenziare la presenza di eventuali patologie dell'orecchio medio e della membrana timpanica attraverso misure di *ammettenza acustica* eseguite a livello del condotto uditivo esterno [1,2]. I dati raccolti vengono presentati come grafici, detti timpanogrammi, che mostrano l'andamento dell'ammettenza acustica (tipicamente per un tono di 226 Hz) in funzione di una differenza di pressione statica ΔP misurata tra l'orecchio esterno e quello medio. Tale differenza ΔP è creata artificialmente durante il test, sigillando il volume d'aria contenuto nel condotto uditivo tramite un apposito auricolare in lattice di gomma, ed è contenuta di solito nell'intervallo $[-600, +400]$ daPa. I valori riportati nei timpanogrammi "tonali" cioè i valori dell'ammettenza acustica corrispondenti ad uno stimolo monocromatico sono misurati in mmho (*millimho*) su una scala precedentemente tarata con un volume d'aria di 2 cc contenuta in una cavità a parete rigida. La misura di ammettenza acustica è in questo modo ricondotta, di fatto, a una misura di volume acustico equivalente V_{eq} nell'ipotesi che, nelle condizioni di taratura, l'ammettenza acustica a bassa frequenza (226 Hz) sia completamente dominata dalla compliance. Per questa ragione, a volte, in corrispondenza alle varie ascisse $\Delta P = [-300, \dots, 0, \dots, 200]$, il timpanogramma tonale a 226 Hz riporta nella scala delle ordinate direttamente i valori in cc di volume acustico equivalente invece dei valori in mmho corrispondenti al modulo dell'ammettenza. Nella pratica clinica il valore di compressione timpanica differenziale corrispondente per un soggetto sano in condizioni normali ai +200 daPa è considerato sufficiente a tendere e spostare completamente la membrana timpanica verso l'orecchio medio e viene pertanto assunta come zero dell'ammettenza (volumica equivalente). In queste condizioni infatti l'unico assorbimento di energia acustica è dovuto alla compliance dell'aria racchiusa nel condotto uditivo sigillato verso l'esterno con l'auricolare e pertanto questo assorbimento non è significativo per la misura dell'assorbimento di energia acustica da parte

del sistema timpanico-ossiculare. L'ammittenza in timpanometria è pertanto relativa al livello misurato per $\Delta P = +200$ daPa. Si noti che il valore assoluto dello zero timpanometrico espresso in cc di volume acustico equivalente e letto sulla scala di un dispositivo tarato tramite il volume standard di 2 cc, può essere usato per effettuare la misura indiretta del volume effettivo dell'aria contenuta nel condotto uditivo del soggetto sotto test. Studi statistici riportano infatti valori compresi tra 0.3 e 0.9 cc per bambini sotto i 7 anni, e di 1.3 e 1.5 cc rispettivamente per donne e uomini adulti.

Oltre al tono a "bassa" frequenza di 226 Hz, nella metodica attualmente in uso, si utilizzano anche stimoli di frequenza superiore (678, 800, 1000 Hz) che, in contrapposizione a quello a "bassa" frequenza di 226 Hz vengono chiamati stimoli ad "alta" frequenza ritenuti utili per evidenziare eventuali assorbimenti acustici dovuti alle caratteristiche di massa dell'orecchio medio. A tutt'oggi tuttavia non esistono chiare indicazioni su come utilizzare i risultati ottenuti dalla timpanometria ad alta frequenza e sta crescendo di conseguenza un rinnovato interesse per lo sviluppo di tecniche di misura dirette, più affidabili e robuste per la misura dell'assorbimento a banda larga dell'energia acustica da parte dell'orecchio [3].

Questa comunicazione fornisce un primo resoconto sullo stato dell'arte delle ricerche applicative in corso nel settore audiometrico presso il Laboratorio di Acustica G115 del CNR-IDAS "Corbino" operativo presso il Dipartimento di Fisica dell'Università di Ferrara.

2. Misura dell'assorbanza energetica a banda larga con sonde p-v collocate all'ingresso del condotto uditivo

In linea con le più recenti ricerche riguardanti la misura dell'*Energy Absorbance* (EA) a banda larga [3], due degli autori hanno posto, in un recente lavoro [4], le basi fisiche della misura dell'assorbanza dell'energia acustica, definendo il corretto metodo di elaborazione numerica dei segnali di pressione e velocità e fornendo, tra le applicazioni proposte, un esempio in campo audiometrico. Si riporta qui, per comodità del lettore, in Fig. 1, un particolare della procedura sperimentale seguita nel lavoro [4]. La Fig. 2 mostra i grafici ottenuti per EA in 1/12 d'ottava nell'intervallo 20-9000 Hz, dall'elaborazione numerica delle risposte all'impulso di pressione e velocità misurate direttamente all'ingresso del condotto uditivo esterno dei soggetti testati. Tali grafici risultano consistenti con quelli già riportati in letteratura [3].

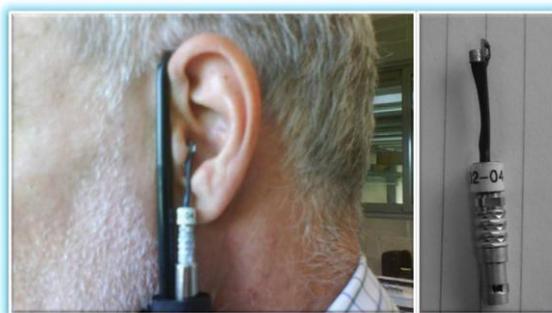


Figura 1 – Sonda p-v (dx) e suo utilizzo per misure audiometriche (sx).

Questa metodica presenta tuttavia alcuni inconvenienti di natura sperimentale: 1) le microsonde utilizzate non sono sufficientemente robuste per misure in campo; 2) lo stimolo 3-D esterno comporta o un alto livello sonoro intorno alla testa del soggetto o un povero rapporto segnale-rumore nelle risposte misurate. Negli sviluppi qui presentati

si è pertanto optato per il confronto diretto delle nuove metodiche con le tecnologie attualmente utilizzate per le indagini cliniche. Questa scelta ha portato al riadattamento di una sonda impedenzometrica tradizionale in modo che il suo funzionamento usufruisca

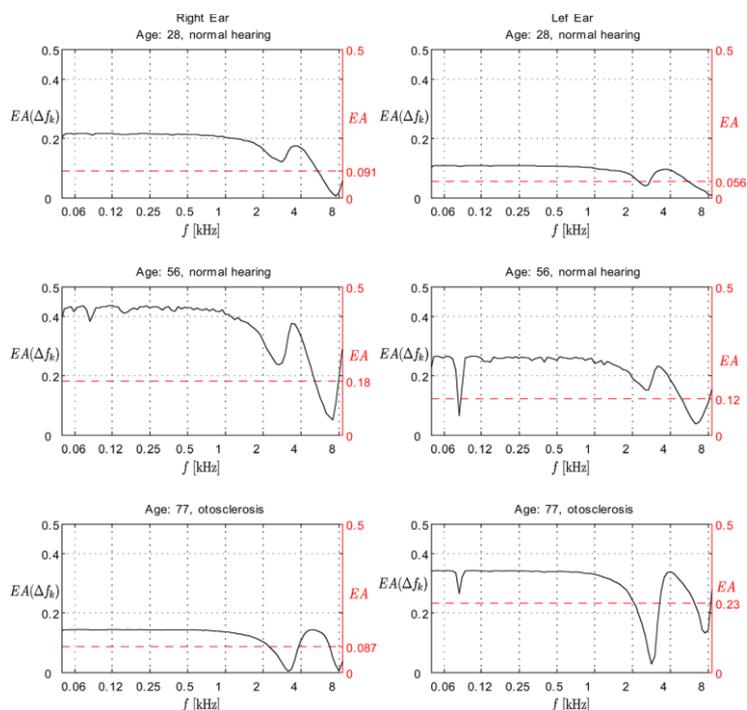


Figura 2 – Esempi di assorbanza energetica (EA) calcolati per tre diversi soggetti in bande di dodicesimi di ottava.

dei vantaggi della misura diretta dell'ammittenza acustica con i microsensori p-v mantenendo tuttavia il setup sperimentale tradizionale. Il prototipo della nuova sonda impedenzometrica p-v e il confronto dei dati con essa ottenuti per l'ammittenza specifica a banda larga, con i dati ottenuti con la timpanometria tonale standard per $\Delta P = 0$, saranno riassunti nella prossima sezione.

3. Misura dell'ammittenza acustica tramite sonda audiometrica con microsensori p-v e confronto con i dati ottenuti dalla timpanometria tonale a 226 Hz

Una sonda impedenzometrica standard consiste tipicamente di un piccolo cilindro cavo contenente tre tubicini collegati, a un attuatore miniaturizzato, a un microfono, e alla pompa responsabile della variazione di pressione statica. Una base del cilindro è raccordata con un ear-plug morbido che garantisce il corretto inserimento della sonda nel condotto uditivo del paziente e la tenuta stagna del sistema sonda+condotto.

La sonda modificata è stata adattata a questo modello standard, creando un innesto adatto a ospitare un rivelatore p-v assiale (Microflown PU Match) e accoppiando la sorgente sonora direttamente al cilindro: in questo modo si superano le difficoltà sperimentali esposte al termine del paragrafo precedente. Si è scelto inoltre di limitare la misura a banda larga di ammettenza specifica nell'intervallo 50-1500 Hz comprendente tutte le frequenze dei toni usati normalmente nella timpanometria standard. In Fig. 3 sono fotografati alcuni particolari della sonda impedenzometrica modificata, mentre in Fig. 4 si mostra una serie di grafici-tipo ottenuti dalle misure con tecnica p-v.

Come già esposto nell'introduzione, l'interpretazione dei dati impedenzometrici standard ad "alte" frequenze (678, 800, 1000 Hz) è tutt'ora oggetto di studio, poiché già

a queste frequenze viene a cadere l'ipotesi di assorbimento dell'energia sonora dovuto soltanto al puro contributo elastico dell'aria nel condotto (compliance). Pertanto, il confronto diretto tra i due metodi è possibile solo per la frequenza più bassa usata in timpanometria, quella di 226 Hz evidenziata in Fig. 4 dalla linea verticale rossa. Il valore assoluto di ammettenza misurato a questa frequenza per $\Delta P = 0$ deve perciò essere utilizzato come riferimento per la timpanometria a banda larga.

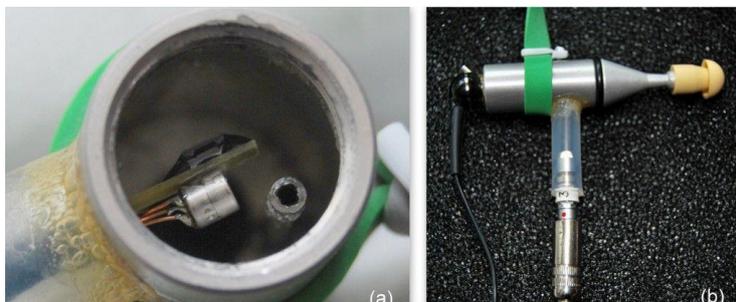


Figura 3 – Sonda impedenzometrica modificata: (a) particolare del sensore p-v; (b) panoramica.

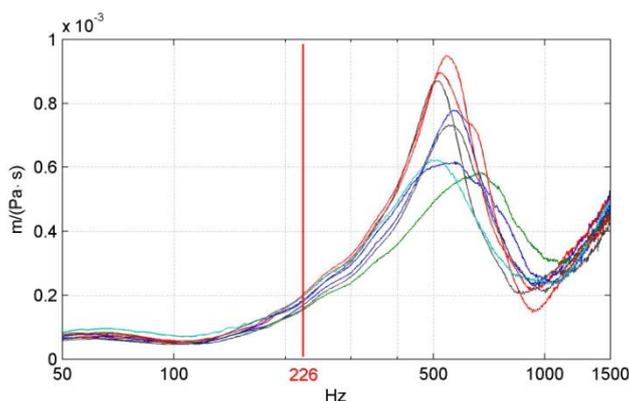


Figura 4 – Alcuni esempi di modulo di ammettenza specifica misurati su pazienti normoudenti. Si evidenzia la frequenza a 226 Hz, utilizzata per la timpanometria tradizionale.

Il confronto è stato condotto in un'unica sessione di misura su 13 soggetti maschi e femmine di età compresa tra 20 e 30 anni, normoudenti, sottoposti prima ad un tradizionale esame timpanometrico con $\Delta P = [-300, \dots, 0, \dots, 200]$ daPa e quindi a quello a banda larga, con sonda p-v non sigillata sul condotto uditivo e quindi misurando l'ammettenza specifica alla pressione atmosferica. Il confronto è stato quindi eseguito chiaramente soltanto per il tono a 226 Hz estrapolando il valore dell'ammettenza (in cc) misurato con la timpanometria standard per $\Delta P = 0$.

Occorre qui sottolineare che le due procedure, per effetto dei differenti principi di misura, danno come risultato grandezze fisiche distinte: l'ammettenza Y della timpanometria standard è il rapporto tra velocità volumica e pressione acustica, mentre l'ammettenza specifica Y_s , misurata nella timpanometria p-v è il rapporto tra la velocità della particella d'aria e la pressione acustica. In formule

$$(1) \quad Y_s = \frac{v}{p} \quad \left[\frac{\text{m}}{\text{Pa}\cdot\text{s}} \right]$$

$$(2) \quad Y = \frac{V}{p} = \frac{Sv}{p} \quad \left[\frac{\text{cm}^5}{\text{dyne}\cdot\text{s}} =: \text{mho} \right]$$

I due risultati perciò sono consistenti a meno di un termine proporzionale ad una superficie, interpretabile come l'area efficace di assorbimento dell'energia acustica alla frequenza in esame da parte del contorno. Sapendo che il diametro del condotto uditivo è in media tra 5 e 10 mm, una stima del valore dell'area efficace di assorbimento può essere ottenuta per confronto delle due metodiche e quindi utilizzata come parametro di controllo del metodo sperimentale innovativo qui proposto, assumendo come corretto quello attualmente utilizzato per la diagnostica audiologica.

I risultati sono stati ottenuti rispettivamente con un impedenzometro clinico Amplaid 728, in dotazione alla clinica di otorinolaringoiatria dell'Arcispedale S. Anna di Ferrara, e con un sistema non commerciale composto dalla sonda timpanometrica modificata illustrata in Fig. 3, una scheda I/O NI-4431 e un PC dotato di software per acquisizione dati e analisi segnali su piattaforma Matlab. Nella Tabella 1 vengono riportati i valori ottenuti per le grandezze misurate con le due metodiche e in Tabella 2 le stime dell'area equivalente di assorbimento calcolate dalla Tabella 1 e relativo diametro equivalente del sistema condotto/timpano.

I valori trovati per il diametro sono distribuiti secondo una media di $1,04 \pm 0,29$ cm, una stima senz'altro compatibile con i dati clinici medi della popolazione.

Tabella 1 – Misure di ammettenza e ammettenza specifica sui soggetti.

	Orecchio Destro		Orecchio Sinistro	
	$Y(\Delta P = 0 \text{ daPa})$ [mmho]	Y_s	$Y(\Delta P = 0 \text{ daPa})$ [mmho]	Y_s
S-01	1,60e+00	1,74e-04	1,89e+00	1,90e-04
S-02	1,08e+00	1,58e-04	8,83e-01	2,26e-04
S-03	2,03e+00	2,02e-04	1,89e+00	2,09e-04
S-04	n.d.	1,82e-04	1,46e+00	2,02e-04
S-05	2,82e+00	1,94e-04	1,90e+00	2,15e-04
S-06	4,98e-01	1,12e-04	6,30e-01	1,10e-04
S-07	1,76e+00	1,83e-04	1,46e+00	1,63e-04
S-08	2,93e+00	2,69e-04	3,46e+00	1,96e-04
S-09	2,10e+00	2,16e-04	1,65e+00	3,21e-04
S-10	1,38e+00	1,88e-04	1,12e+00	3,32e-04
S-11	1,15e+01	4,90e-04	1,21e+00	7,12e-05
S-12	3,32e+00	3,09e-04	1,82e+00	2,08e-04
S-13	4,16e-01	1,83e-04	1,56e+00	5,93e-04

Tabella 2 – Area equivalente e diametro ottenuti per confronto dei due metodi.

	DX		SX	
	S [cm ²]	D [cm]	S [cm ²]	D [cm]
S-01	9,19e-01	1,08e+00	9,97e-01	1,13e+00
S-02	6,86e-01	9,35e-01	3,91e-01	7,06e-01
S-03	1,00e+00	1,13e+00	9,03e-01	1,07e+00

S-04	n.d.	n.d.	7,25e-01	9,61e-01
S-05	1,45e+00	1,36e+00	8,85e-01	1,06e+00
S-06	4,43e-01	7,52e-01	5,70e-01	8,52e-01
S-07	9,59e-01	1,11e+00	8,94e-01	1,07e+00
S-08	1,09e+00	1,18e+00	1,76e+00	1,50e+00
S-09	9,73e-01	1,11e+00	5,14e-01	8,09e-01
S-10	7,33e-01	9,66e-01	3,36e-01	6,54e-01
S-11	2,35e+00	1,73e+00	1,70e+00	1,47e+00
S-12	1,07e+00	1,17e+00	8,75e-01	1,06e+00
S-13	2,27e-01	5,38e-01	2,62e-01	5,78e-01

4. Conclusioni

L'utilizzo di tecniche di misura dell'ammettenza acustica basate sull'acquisizione diretta dei segnali di pressione e velocità tramite microsonde p-v offre un'eccellente piattaforma tecnologica e metodologica per l'avanzamento della timpanometria in ambito clinico-diagnostico. Il vantaggio immediato è costituito dalla possibilità di sviluppare una timpanometria a banda larga senza la necessità di ricorrere a modelli fisici approssimati per il calcolo dell'ammettenza. Ciò comporta tuttavia un'accurata calibrazione delle sonde p-v da utilizzare per la nuova strumentazione audiometrica ma soprattutto l'abbattimento del loro costo commerciale per gli scopi qui prospettati.

5. Ringraziamenti

Gli autori desiderano ringraziare Fosca Fimiani per aver reso disponibili per questa comunicazione alcuni dati timpanometrici raccolti nell'ambito del proprio tirocinio per la Laurea triennale in Fisica. Si ringrazia altresì la Clinica ORL dell'Arcispedale S. Anna di Ferrara per l'uso dell'impedenzometro clinico Amplaid 728 nonché gli studenti del corso di Audioprotesi dell'Università di Ferrara che si sono sottoposti ai test impedenzometrici. Si ringrazia infine la Ditta Labat srl di Mogliano Veneto per la gentile concessione della sonda impedenzometrica che è stata adattata per l'acquisizione dei segnali con microsonde p-v.

6. Bibliografia

- [1] Kent R. D. (editor), *The MIT Encyclopedia of communication disorders*, Bradford books, 2004
- [2] van Camp K.J., Margolis R.H., Wilson R.H., Greten W.L., Shanks J.E., *Principles of Tympanometry*, ASHA Monographs n. 24, 1986
- [3] Liu Y.W., Sanford C.A., Ellison J.C., Fitzpatrick D.F., Gorga M.P., Keefe D.H., *Wideband absorbance tympanometry using pressure sweeps: System development and results on adults with normal hearing*, J. Acoust. Soc. Am., **124** (6), 2008, pp. 3708–3719
- [4] Stanzial D., Sacchi G., Schiffrer G., *On the physical meaning of the power factor in acoustics*, J. Acoust. Soc. Am., **131** (1), 2012, pp. 269-280