Introduzione all’acustica

Docente: ing. Gaspare Giovinco

Definizioni

Acustica: è la scienza del suono, inteso sia come fenomeno fisico (che, prodotto da vibrazioni meccaniche, si propaga per onde in un mezzo elastico) sia come sensazione psicologica che queste onde producono sull'uomo.

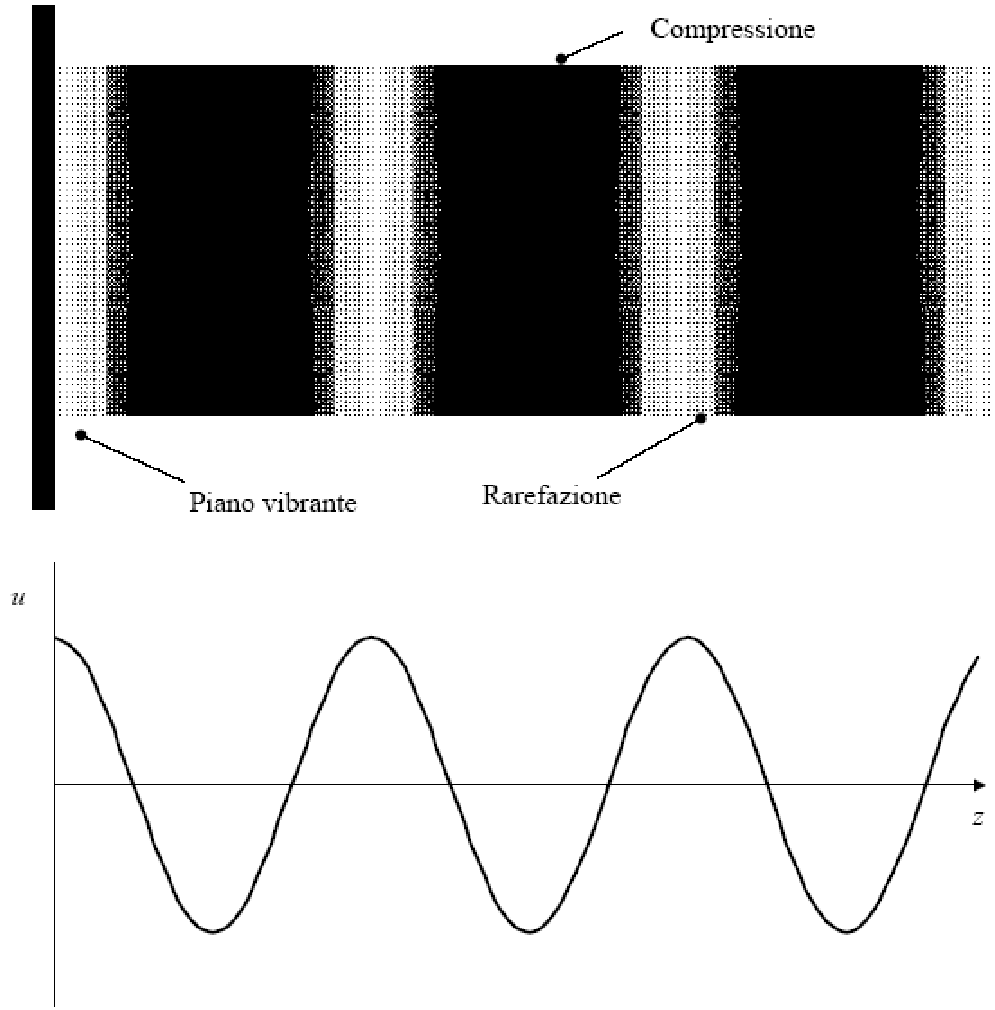
Suono: perturbazione (prodotta da una sorgente sonora) che, propagandosi in un mezzo elastico, provoca una variazione di pressione ed uno spostamento di particelle, tale da poter essere rilevata da una persona o da uno strumento acustico.

Pertanto, il fenomeno acustico, dal punto di vista tecnico, prevede la presenza contemporanea della sorgente sonora, del mezzo di trasmissione e del ricevitore.

Il fenomeno ondulatorio, connesso con il suono, fa sì che le varie particelle del mezzo in cui esso si trasmette vibrino, propagando così la perturbazione alle particelle vicine. Mentre questa perturbazione, che trasporta sia l'informazione sia l'energia, si propaga a distanza, le singole particelle, anche nel caso di fluidi (cioè gas e liquidi), rimangono sempre in prossimità della loro posizione originale. Si hanno cioè delle vibrazioni locali (compressione e rarefazione) di particelle:

- nel caso di gas o liquidi, che non possono trasmettere sforzi di taglio, tali vibrazioni sono sempre parallele alla direzione dell'onda che si propaga, per cui si parla di onde longitudinali;
- al contrario, nel caso dei solidi, che possono trasmettere sforzi di taglio, ci sono anche vibrazioni perpendicolari alla direzione dell'onda, cui corrispondono perciò delle onde trasversali.

Esempio di propagazione di onde longitudinali



Velocità di propagazione del suono

Le **onde sonore** si propagano con velocità caratteristica del mezzo di trasmissione. Mentre la frequenza delle vibrazioni locali dipende dalla sorgente, la velocità di propagazione dipende esclusivamente dal mezzo di trasmissione.

Nel caso dei **gas ideali,** la **velocità di propagazione del suono**, che indicheremo con c, può essere espressa mediante la seguente relazione:

$$c = \sqrt{\gamma \cdot \frac{p}{\rho}} = \sqrt{\gamma R T}$$

$$\gamma = \frac{c_p}{c_v}$$

Per aria alla temperatura di 20°C, la velocità di propagazione del suono sarà pari a:

$$c = \sqrt{1.4 \cdot 287.13 \cdot (20 + 273.15) \cdot \frac{\mathrm{J}}{\mathrm{kg} \times \mathrm{K}} \cdot \mathrm{K}} = \sqrt{117841 \cdot \frac{\mathrm{kg} \cdot \mathrm{m} \cdot \mathrm{m}}{\mathrm{s}^2} \cdot \frac{1}{\mathrm{kg} \times \mathrm{K}} \cdot \mathrm{K}} \cong 343.2 \frac{\mathrm{m}}{\mathrm{s}}$$

$$c/\left(m \cdot s^{-1}\right) = 331.2 + 0.6 \cdot t/°C$$

Temperatura (°C)	Velocità del suono (m/s)
-10	325
0	331
10	337
20	343
30	349
40	355

Velocità di propagazione del suono

Una relazione semplice come quella espressa dall'equazione per i gas non esiste per i liquidi. Tuttavia la velocità di propagazione del suono dipende dalla temperatura del liquido ed in maniera inferiore dalla sua pressione.

$$c = \sqrt{\frac{1}{K \cdot \rho}}$$

Dove K, Pa^{-1}, è il coefficiente di comprimibilità del liquido in condizioni adiabatiche.

Per acqua distillata:

Temperatura (°C)	Velocità del suono (m/s)
0	1407
10	1449
20	1484
30	1510

Velocità di propagazione del suono

Per un solido, la velocità di propagazione del suono per onde longitudinali, è data da:

$$c = \sqrt{\frac{E}{\rho}}$$

dove E rappresenta il modulo di Young (o modulo di elasticità) del materiale e ρ è la sua massa volumica.
Ad esempio, considerando un acciaio con massa volumica pari a 7850 kg/m^3 ed un modulo di Young pari a 207 GPa, la velocità di propagazione sarà pari a:

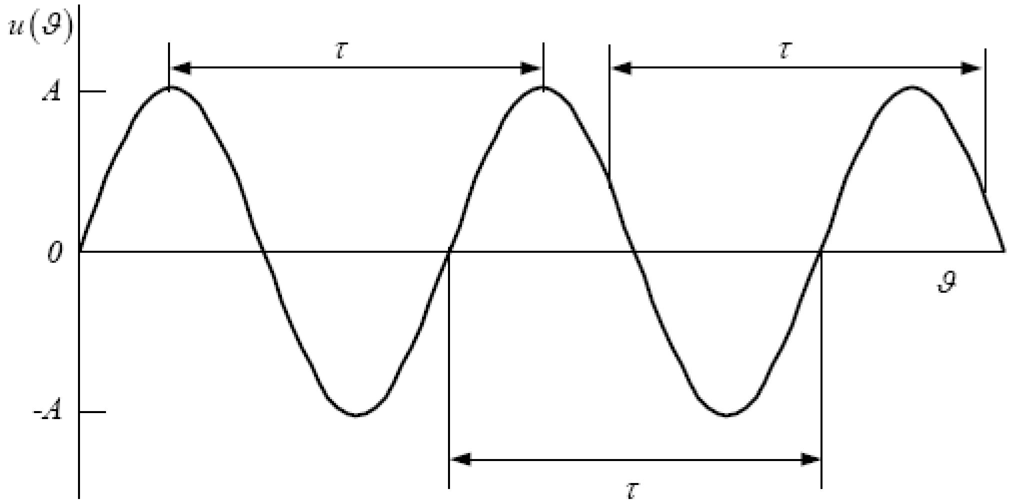
$$c = \sqrt{\frac{207 \times 10^9}{7850} \cdot \frac{\mathrm{Pa}}{\frac{\mathrm{kg}}{\mathrm{m}^3}}} = \sqrt{\frac{207 \times 10^9}{7850} \cdot \frac{\mathrm{kg} \cdot \mathrm{m}}{\mathrm{s}^2 \cdot \mathrm{m}^2} \frac{1}{\frac{\mathrm{kg}}{\mathrm{m}^3}}} \cong 5135 \frac{\mathrm{m}}{\mathrm{s}}$$

Per onde trasversali:

$$c = \sqrt{\frac{E}{2 \cdot (1 + \nu) \rho}}$$

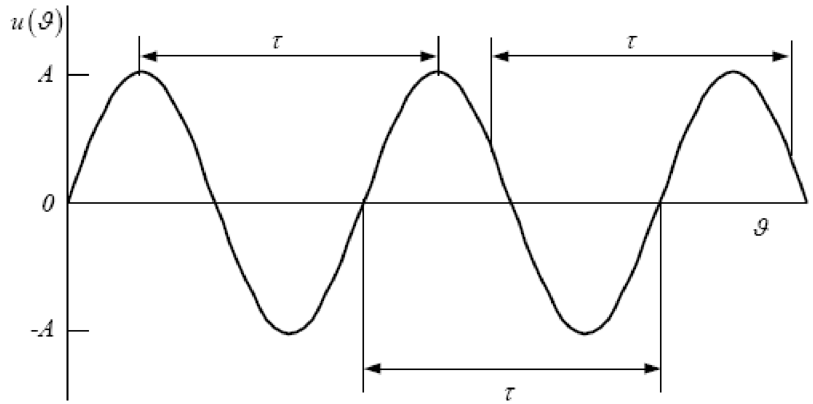
Tono puro

Poiché tale fenomeno è un fenomeno ondulatorio, il suono potrebbe contenere una sola frequenza, come nel caso di un’onda sinusoidale stazionaria, o molteplici frequenze, come nel caso del rumore emesso da un motore di un autoveicolo.
Il tipo più semplice di onda sonora è quella rappresentata matematicamente da una sinusoide:



Tono puro

$$u(\vartheta) = A \cdot sin\left(2\pi\frac{\vartheta}{\tau} + \phi\right)$$



$$f = \frac{1}{\tau} \qquad \omega = 2\pi f = \frac{2\pi}{\tau}$$

$$u(\vartheta) = A \cdot sin(2\pi f \cdot \vartheta + \phi) = A \cdot sin(\omega \cdot \vartheta + \phi)$$

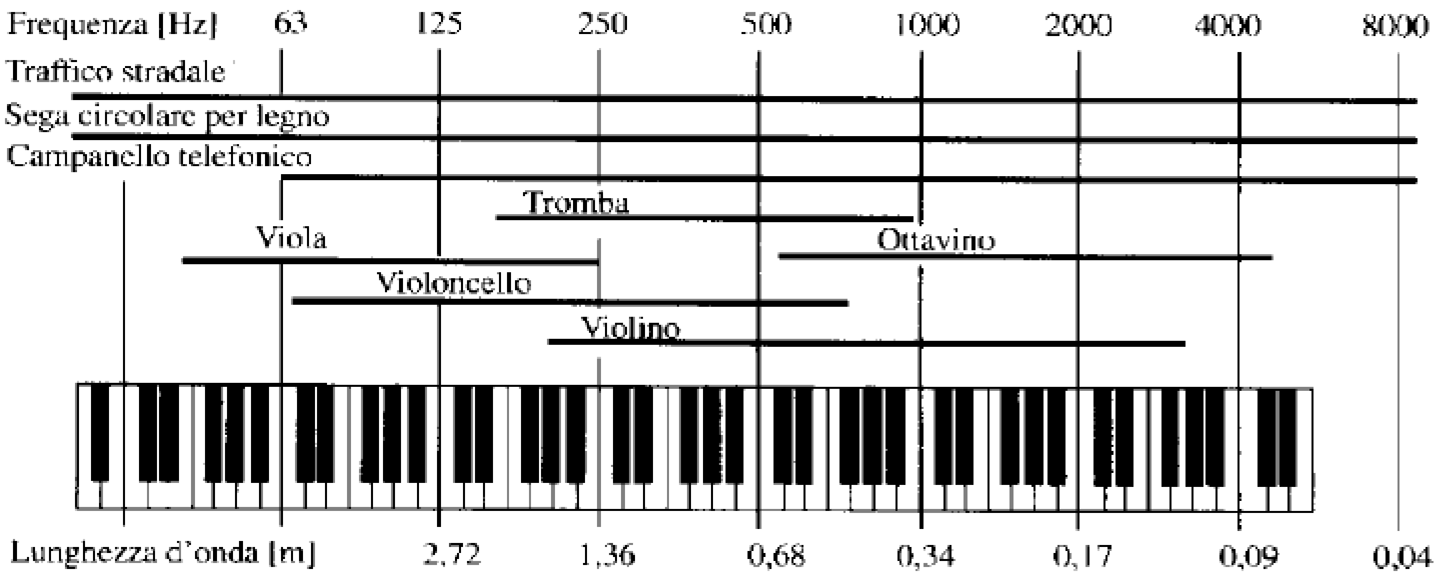
La distanza λ percorsa dalla perturbazione in un periodo è detta lunghezza d'onda, ed è espressa dalla relazione:

$$\lambda = c \cdot \tau = \frac{c}{f}$$

Con c = 340 m/s si ha:

f [Hz]	31,5	63	125	250	500	1000	2000	4000	8000	16000
λ (mm)	10794	5397	2720	1360	680	340	170	85	43	21

Frequenza



Per soggetti normal udenti, il campo dell'udibile si estende approssimativamente tra 20 Hz e 20 kHz.

Campo dell’udibile

Considerando la propagazione del suono nell’aria in condizioni normali, è importante definire il cosiddetto campo dell’udibile, ossia il campo di lunghezze d’onda (o, ciò che è lo stesso, di frequenze) che l’orecchio umano può percepire: si trova che la lunghezza d’onda varia all’incirca tra λ=17m (corrispondente alla frequenza minima di 20Hz) e λ=17mm (corrispondente alla frequenza massima di 20kHz), con conseguenze molto importanti ogniqualvolta risulta comparabile con le dimensioni degli ambienti edificati o degli oggetti presenti.

Il campo di frequenze udibili dall’uomo consente di dare un definizione precisa di perturbazione acustica: una perturbazione ondulatoria è di tipo acustico quando è in grado di sensibilizzare l’orecchio umano, il che significa che la frequenza della perturbazione deve essere compresa nell’intervallo [20 Hz, 20 kHz].

Equazione delle onde

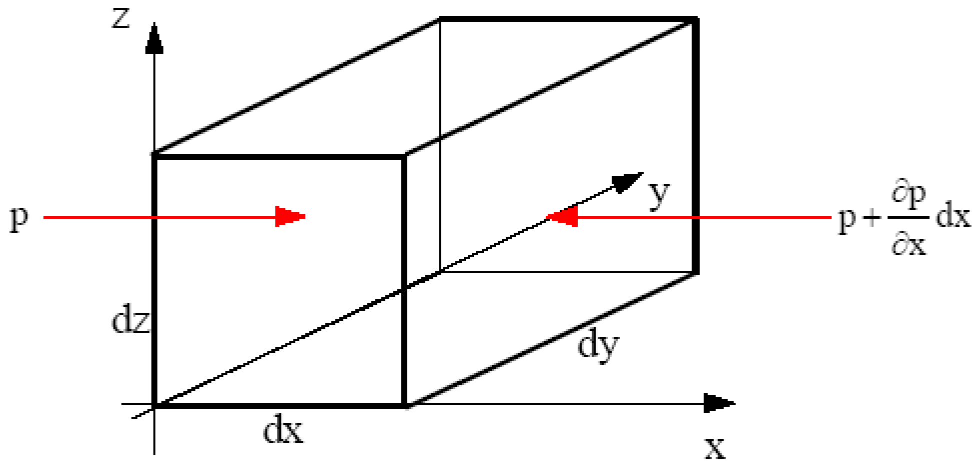
Per quanto detto in precedenza, nel mezzo di propagazione si avranno dunque variazioni di densità e di pressione, entrambe funzioni del tempo e dello spazio:

$$P\left(x,y,z,\vartheta\right) = p_0 + \underbrace{p\left(x,y,z,\vartheta\right)}_{\text{pressione sonora}}$$

E' importante osservare che le variazioni della pressione sonora (vale a dire della differenza tra la pressione istantanea e quella atmosferica) prodotte nel gas dall'onda sonora, avvengono in generale così rapidamente da non permettere scambi di calore tra volumi adiacenti. Ecco perché, dal punto di vista termodinamico, le trasformazioni subite dal gas per effetto del fenomeno sonoro si possono considerare adiabatiche.

Equazione delle onde

Consideriamo un volume elementare di gas all'interno di un mezzo elastico, isotropo, omogeneo, non viscoso, soggetto a un'onda acustica che si propaga lungo l'asse x.



Applicando un bilancio di forze si avrà:

$$F=\left[p-\left(p+\frac{\partial p}{\partial x}\cdot\Delta x\right)\right]\cdot\Delta y\cdot\Delta z=-\frac{\partial p}{\partial x}\cdot V_0$$

Equazione delle onde

Dalla legge di Newton:

$$F = m\frac{dv}{d\vartheta}$$

$$\frac{m}{V_0}\cdot\frac{dv}{d\vartheta} = -\frac{\partial p}{\partial x} \rightarrow \underbrace{\rho_0 \cdot \frac{dv}{d\vartheta} = -\frac{\partial p}{\partial x}}_{\text{equazione del moto}}$$

Equazione delle onde

Dall'equazione della trasformazione adiabatica internamente reversibile:

$$P \cdot V^{\gamma} = cost$$

$$\frac{dP}{P} = -\gamma \cdot \frac{dV}{V}$$

$$P = p_0 + p \quad con \quad p \ll p_0$$

$$V = V_0 + \hat{V} \quad con \quad \hat{V} \ll V_0$$

$$\frac{p}{p_0} = -\gamma \cdot \frac{\hat{V}}{V_0}$$

Derivando rispetto al tempo:

$$\underbrace{\frac{1}{p_0}\frac{\partial p}{\partial \vartheta} = -\frac{\gamma}{V_0} \cdot \frac{\partial \hat{V}}{\partial \vartheta}}_{equazione\ dei\ gas}$$

Equazione delle onde

Per ottenere l'equazione di conservazione della massa scriviamo:

$$\hat{V} = \left(\left(\xi_x + \frac{\partial \xi_x}{\partial x} \cdot \Delta x \right) - \underbrace{\xi_x}_{\text{spostamento delle particelle sulla faccia sinistra del volume di controllo}} \right) \cdot \Delta y \cdot \Delta z$$

Da cui:

$$\frac{\partial \hat{V}}{\partial \vartheta} = \frac{\partial}{\partial \vartheta} \left(\frac{\partial \xi_x}{\partial x} \cdot V_0 \right) = V_0 \cdot \frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{\partial \xi_x}{\partial \vartheta} \right) = V_0 \cdot \frac{\partial v}{\partial x}$$

$$\underbrace{\frac{\partial \hat{V}}{\partial \vartheta} = V_0 \cdot \frac{\partial v}{\partial x}}_{\text{equazione di conservazione della massa}}$$

Equazione delle onde

Combinando le 3 equazioni ottenute abbiamo:

$$\frac{1}{p_0}\frac{\partial p}{\partial \vartheta} = -\frac{\gamma}{p_0}\cdot\frac{\partial \hat{V}}{\partial \vartheta} = -\frac{\gamma}{V_0}\cdot V_0\cdot\frac{\partial v}{\partial x} = -\gamma\cdot\frac{\partial v}{\partial x}$$

Derivando ambo i membri rispetto al tempo:

$$\frac{\partial^2 p}{\partial \vartheta^2} = -\gamma\cdot p_0\cdot\frac{\partial}{\partial \vartheta}\left(\frac{\partial v}{\partial x}\right)$$

Dall'equazione del moto:

$$-\frac{\partial^2 p}{\partial x^2} = \rho_0\cdot\frac{\partial}{\partial x}\left(\frac{\partial v}{\partial \vartheta}\right) = \rho_0\cdot\frac{\partial}{\partial \vartheta}\left(\frac{\partial v}{\partial x}\right)$$

Ricordando che:

$$c = \sqrt{\gamma\cdot\frac{p_0}{\rho_0}}$$

Equazione delle onde

Otteniamo:

$$\underbrace{\frac{\partial^2 p}{\partial x^2} = \frac{1}{c^2} \cdot \frac{\partial^2 p}{\partial \vartheta^2}}_{\text{equazione delle onde}}$$

Sostituendo a p la velocità v:

$$\frac{\partial^2 v}{\partial x^2} = \frac{1}{c^2} \cdot \frac{\partial^2 v}{\partial \vartheta^2}$$

Per onde sferiche:

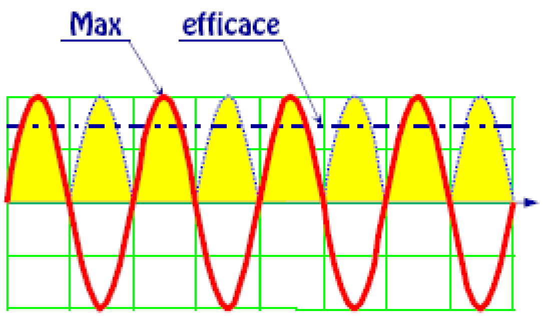
$$\frac{\partial^2 p}{\partial r^2} + \frac{2}{r}\frac{\partial p}{\partial r} = \frac{1}{c^2} \cdot \frac{\partial^2 p}{\partial \vartheta^2}$$

Onde piane

$$\frac{\partial^2 p}{\partial x^2} = \frac{1}{c^2} \cdot \frac{\partial^2 p}{\partial \vartheta^2}$$

$$p(x,\vartheta) = \underbrace{F(c \cdot \vartheta - x)}_{\text{onda diretta di pressione (verso positivo delle x)}} + \underbrace{G(c \cdot \vartheta + x)}_{\text{onda inversa di pressione (verso negativo delle x)}}$$

Nel solo caso di onda diretta:



$$\overline{p}(x,\vartheta) = \sqrt{2} \cdot p_{eff} \cdot e^{j \cdot k \cdot (c \cdot \vartheta - x)} = \sqrt{2} \cdot p_{eff} \cdot e^{j \cdot (\omega \cdot \vartheta - k \cdot x)}$$

$\omega = 2 \cdot \pi \cdot f$ *pulsazione (rad/s)*

$k = \omega / c$ *numero d'onda (rad/m)*

$$p_{eff} = \sqrt{\frac{1}{\tau} \int_0^{\tau} p^2(\vartheta) \cdot d\vartheta}$$

Onde piane

$$p\left(x,\vartheta\right)=Re\left\{\overline{p}\left(x,\vartheta\right)\right\}=Re\left\{\sqrt{2}\cdot p_{eff}\cdot e^{j\cdot k\cdot\left(c\cdot\vartheta-x\right)}\right\}=\sqrt{2}\cdot p_{eff}\cdot cos\left(\omega\cdot\vartheta-k\cdot x\right)$$

La quantità reale p(x,θ) rappresenta una vibrazione armonica, nello spazio e nel tempo.
Questa soluzione è particolarmente importante in quanto, sulla base del noto teorema di Fourier (applicabile sotto certe condizioni che risultano sempre verificate nei casi di interesse fisico), una funzione periodica è esprimibile come sommatoria di infiniti termini armonici.

Impedenza acustica specifica e caratteristica

Dall'equazione del moto:

$$\rho_0 \frac{\partial v}{\partial \vartheta} = -\frac{\partial p}{\partial x}$$

$$dv = \left(-\frac{1}{\rho_0} \cdot \frac{\partial p}{\partial x} \right) d\vartheta$$

Integrando:

$$v(x,\vartheta) = -\frac{1}{\rho_0} \cdot \int \frac{\partial p}{\partial x} d\vartheta = \frac{1}{\rho_0 \cdot c} p(x,\vartheta)$$

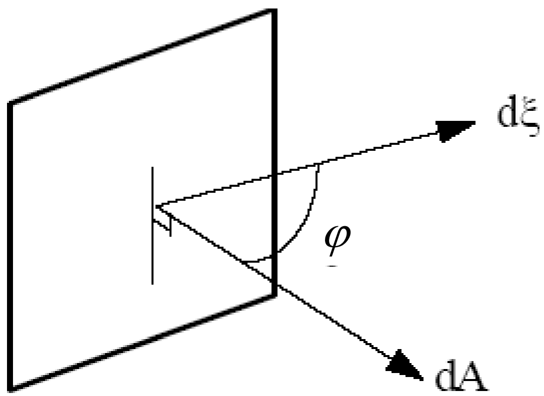
$$\frac{p(x,\vartheta)}{v(x,\vartheta)} = \rho_0 \cdot c \quad \textit{impedenza acustica specifica } \boldsymbol{Z}_s$$

Per le onde piane, abbiamo appena visto che si tratta di una quantità reale (e prende il nome di impedenza acustica caratteristica, indicata con Z_C), mentre, in generale, tale rapporto è un numero complesso, in conseguenza del fatto che pressione e velocità non sono in fase tra loro.

Intensità acustica istantanea

Vogliamo adesso determinare l'energia sonora che fluisce, nel tempo infinitesimo dθ, attraverso la generica superficie, di area dA, immersa nel fluido in cui si propaga l'onda sonora. A tale scopo, basta considerare che il fenomeno di propagazione del suono si verifica in quanto il fluido esercita sulla superficie dA una forza F=p·dA. Se, nell'intervallo di tempo dθ, il fluido di sposta in direzione perpendicolare alla superficie dA, esso avrà compiuto un lavoro massimo. Tale lavoro sarà nullo se si sarà spostato in direzione tangente alla superifcie:

$$d\ell = p \cdot dA \cdot d\xi \cdot cos(\varphi)$$



Intensità acustica istantanea (W/m^2):

$$I_\varphi(\vartheta) = \frac{d\ell}{dA \cdot d\vartheta} = p \cdot \frac{d\xi}{d\vartheta} \cdot cos(\varphi) = p \cdot v \cdot cos(\varphi)$$

Intensità acustica

$$I_{\varphi} = \frac{1}{\tau}\int_{0}^{\tau} I_{\varphi}(\vartheta)\, d\vartheta = Re\left\{\overline{p}^{*} \cdot \overline{v}\right\} \cdot cos(\varphi)$$

Per onda sonora piana:

$$I_{\varphi} = \frac{p_{eff}^{2}}{\rho_0 \cdot c} \cdot cos(\varphi)$$

$$D = \frac{I_{\varphi,max}}{c} = \frac{p_{eff}^{2}}{\rho_0 \cdot c^{2}} \text{ densita di energia acustica } (W/m^{3})$$

Livelli sonori

Così come la pressione sonora [20 μPa, 10^4 Pa] anche l'intensità acustica varia in intervalli molto ampi, da 10^{-8} a 10^{-1} W/m^2.

Conviene pertanto utilizzare delle scale logaritmiche, introducendo i livelli di grandezze acustiche:

$$L_I = 10 \cdot \log_{10} \frac{I}{I_{rif}} \qquad I_{rif} = 10^{-12} \frac{W}{m^2} \qquad I = I_{rif} \cdot 10^{\frac{L_I}{10}}$$

$$L_W = 10 \cdot \log_{10} \frac{W}{W_{rif}} \qquad W_{rif} = 10^{-12} W \qquad W = W_{rif} \cdot 10^{\frac{L_W}{10}}$$

$$L_p = 10 \cdot \log_{10} \frac{p_{eff}^2}{p_{eff,rif}^2} = 20 \cdot \log_{10} \frac{p_{eff}}{p_{eff,rif}} \qquad p_{eff,rif} = 2 \cdot 10^{-5}\, Pa \qquad p_{eff} = p_{eff,rif} \cdot 10^{\frac{L_p}{20}}$$

$$L_I = L_p + 10 \cdot \log_{10} \frac{p_{eff,rif}^2}{\rho_0 \cdot c \cdot I_{rif}}$$

Sovrapposizione di più toni

$$I_{TOT} = \sum_i I_i$$

$$log_{10} \frac{I_{TOT}}{I_{rif}} = log_{10} \frac{\sum_i I_i}{I_{rif}}$$

$$L_{I_{TOT}} = 10 \cdot log_{10} \frac{\sum_i I_i}{I_{rif}} = 10 \cdot log_{10} \sum_i 10^{\frac{L_I}{10}}$$

Analisi in frequenza

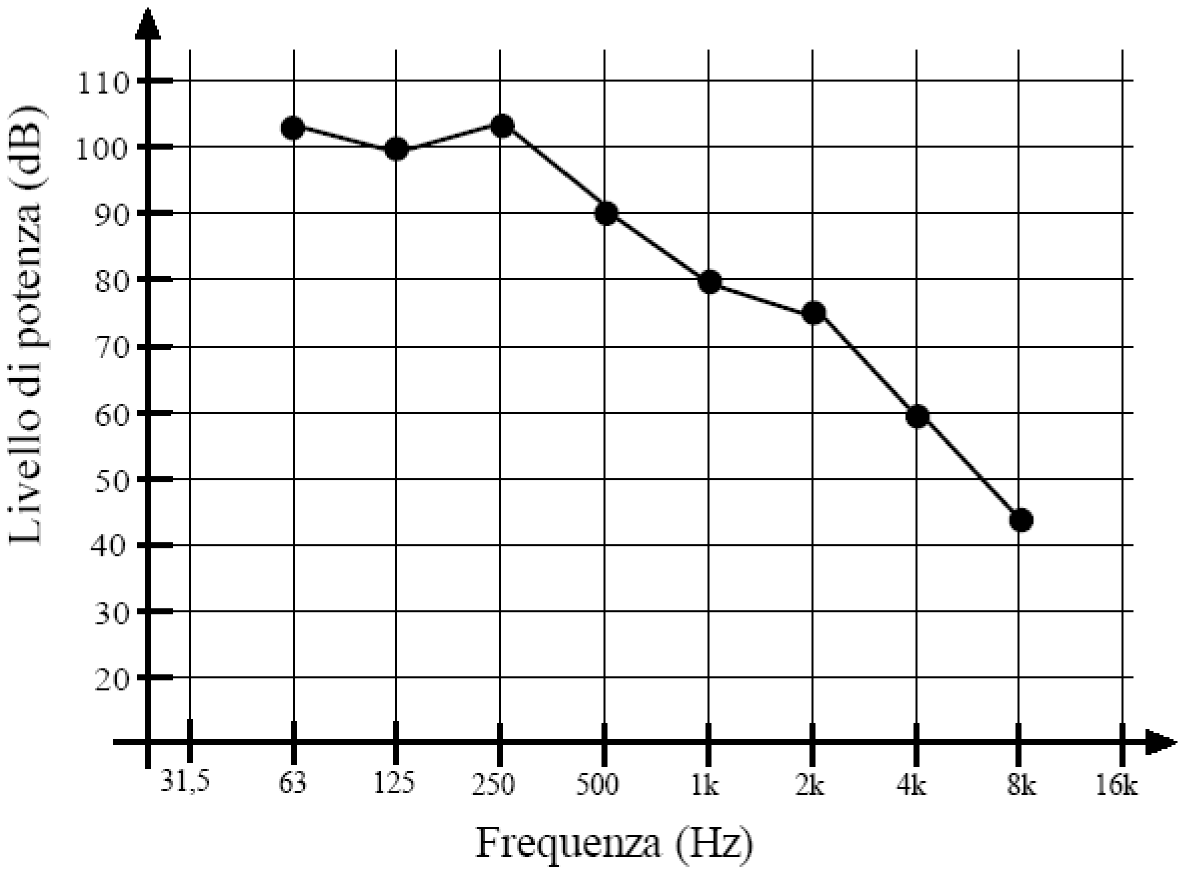
$$x(\vartheta) = \sum_{n=-\infty}^{+\infty} x_n e^{j 2\pi f_n \vartheta}$$

$$x_n = \frac{1}{\tau} \int_{-\tau/2}^{\tau/2} x(\vartheta) e^{-j 2\pi f_n \vartheta} d\vartheta$$

In base al teorema di Fourier, dunque, un suono periodico può sempre essere scomposto in un insieme di suoni puri di diversa frequenza (le cosiddette armoniche).

Allora, la rappresentazione del livello di pressione di ogni armonica del suono (periodico) considerato prende il nome di spettro sonoro del suono stesso.

Analisi in frequenza



$$f_c = \sqrt{f_1 \cdot f_2}$$

$$f_2 = 2^n \cdot f_1$$

Suono o rumore?

Usualmente si definiscono:

SUONO:

Segnali sonori composti da frequenze fisse ben definite: insieme di onde sinusoidali con periodicità ben definita

RUMORE:

Segnali sonori completamente casuali costituiti da infinite componenti con fase e ampiezza aleatorie

In relazione all'individuo possono essere definiti:

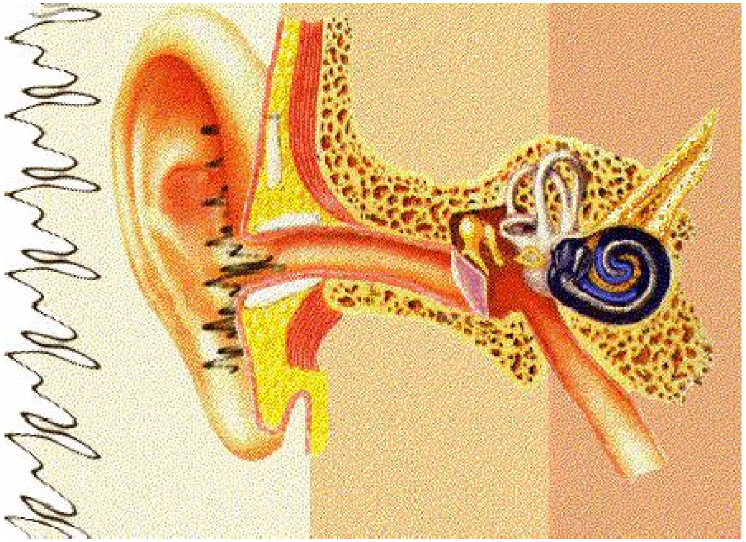
SUONO:

Segnali sonori piacevoli per una percentuale considerevole di potenziali ricettori

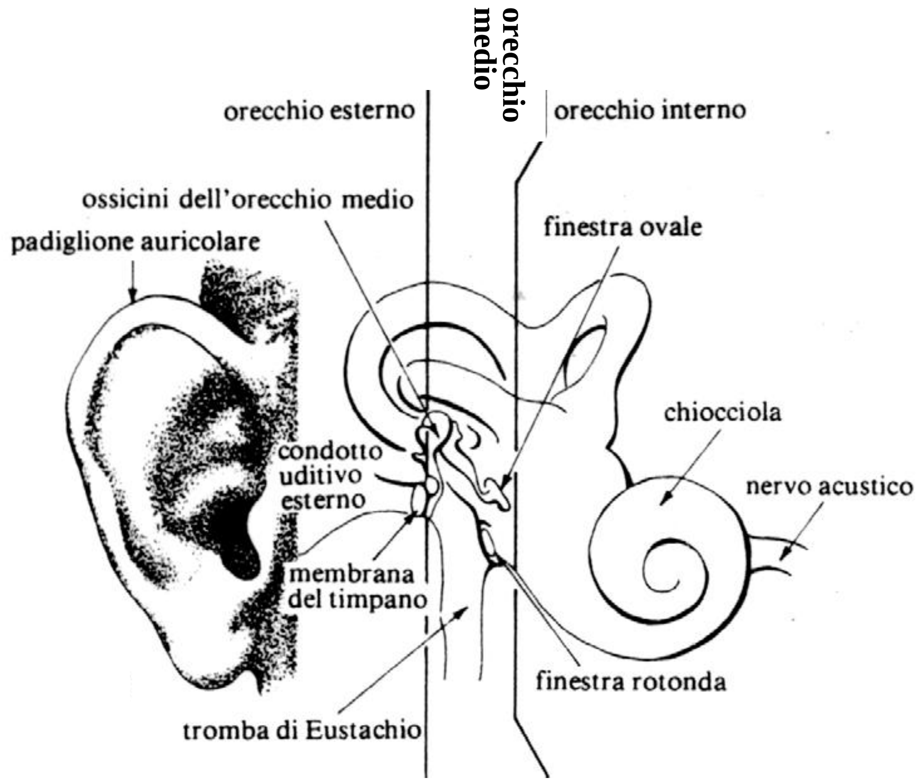
RUMORE:

Segnali sonori sgradevoli, anche se col concorso della soggettività individuale e di concomitanze casuali (stato d'animo, condizione fisica, etc.)

L’orecchio umano

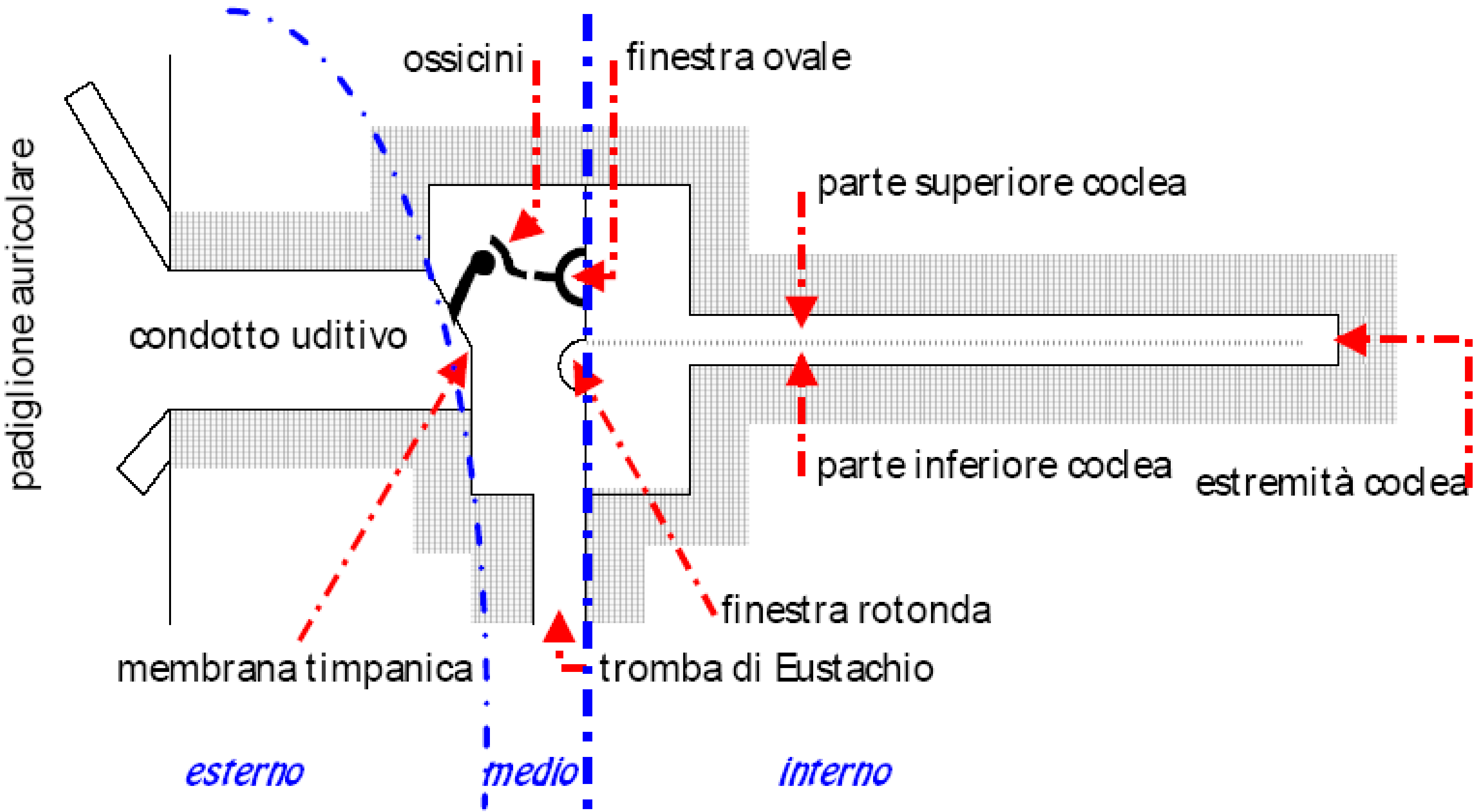


L’organo che permette all’uomo di percepire i suoni é l’orecchio. Tramite quest’organo le onde sonore vengono trasformate in impulsi nervosi che, una volta trasmessi al cervello, noi percepiamo come suoni.



Da un punto di vista anatomico l’orecchio viene diviso in tre parti: la prima parte è *l’orecchio esterno* che riceve l’onda sonora e fa vibrare la membrana del timpano, la seconda è *l’orecchio medio* che collega meccanicamente la membrana del timpano con l’orecchio interno, la terza parte è *l’orecchio interno* dove hanno origine gli impulsi nervosi che attraverso il nervo acustico vengono trasmessi al cervello.

Schema funzionale dell'orecchio



L’orecchio esterno

Il padiglione auricolare è la componente visibile dell’orecchio esterno; la sua funzione principale è di contribuire alla ricezione del suono.

E’ la forma del padiglione che può influenzare l’amplificazione o l’attenuazione di determinate frequenze. Dal padiglione parte il condotto uditivo esterno che convoglia le onde sonore alla membrana del timpano.

La spiccata sensibilità dell’orecchio umano alle frequenze attorno ai 3000 Hz si spiega con il fatto che il condotto si comporta come un tubo chiuso all’estremità con una frequenza di risonanza all’incirca di 3000 Hz.

L’orecchio esterno è separato dall’orecchio medio dalla membrana del timpano: essa ha la forma di un cono piatto con un diametro di circa sette millimetri e la convessità rivolta verso l’interno.

L'orecchio medio

L'orecchio medio è una cavità piena d'aria che contiene la catena di ossicini ossia tre piccole ossa, il martello, l'incudine e la staffa, che forniscono il movimento meccanico per far passare la vibrazione dal timpano all'orecchio interno. Il martello è appoggiato sul timpano e quando viene messo in vibrazione colpisce l'incudine, il secondo ossicino che funge da connessione con il terzo, la staffa. Questa è a contatto con la finestra ovale, un'altra membrana che segna l'entrata della chiocciola.

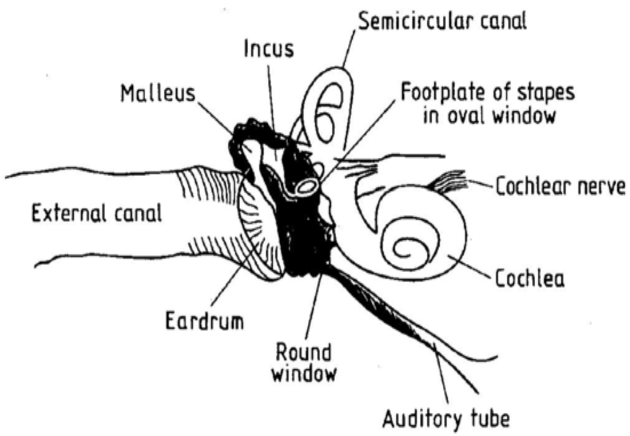
La catena d'ossicini è connessa a dei legamenti e posta in tensione attraverso due piccoli muscoli: il tensore del timpano e lo strapedio. Il primo è connesso al martello, il secondo alla staffa. Questo sistema da una parte è un efficace meccanismo di trasmissione tra orecchio esterno e finestra ovale, dall'altra funziona come apparato protettivo in quanto limita la vibrazione trasmessa alla finestra ovale.

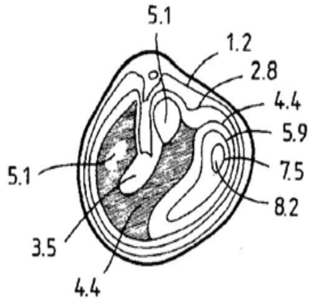
La presenza di aria nell'orecchio medio fa in modo di compensare la spinta della pressione atmosferica sul timpano, ciò avviene tramite il tubo di Eustachio che mette in comunicazione l'orecchio medio con il setto nasale.

L’orecchio interno

L’orecchio interno si presenta come un complesso sistema di canali colmi di liquido inseriti nell’osso temporale.

Nell’uomo il senso dell’equilibrio e dell’udito viene dato dai nervi sensori posti all’interno di questi canali che terminano nella chiocciola. All’interno di quest’ultima troviamo una membrana detta basale che viene eccitata attraverso l’energia trasmessa alla chiocciola dalla finestra ovale.





Questa membrana a seconda della frequenza del suono risulta più eccitata in un punto rispetto ad un altro: le basse frequenze generano maggiore eccitazione all’estremità della chiocciola, le alte invece nei pressi della finestra ovale.

La stimolazione delle fibre nervose coinvolge una complessa struttura posta sulla membrana basale chiamata organo di Corti.

Le cellule ciliate interne ed esterne che fanno parte di quest’organo sono le principali responsabili del processo di stimolazione nervosa, pare infatti vi sia una dipendenza diretta tra il danno subito da queste cellule e la perdita di udito dovuta al rumore.

Sezionando l’organo del Corti si ha che in pratica le terminazioni nervose sono comprese fra due lamine di tessuto organico che, per strofinio dovuto all’eccitazione acustica, eccitano le cellule nervose in zone differenti a seconda della frequenza di eccitazione.

L'orecchio interno

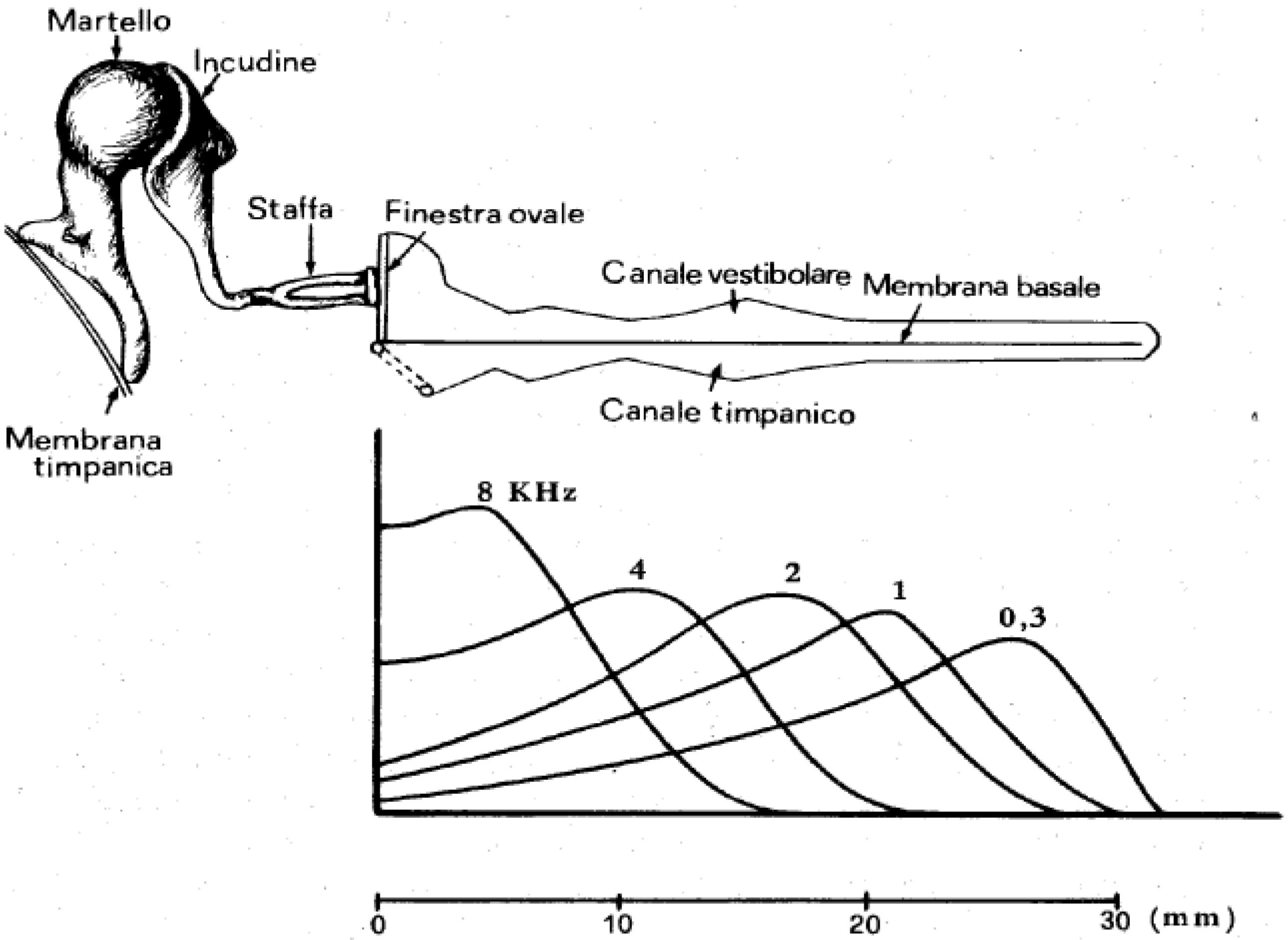
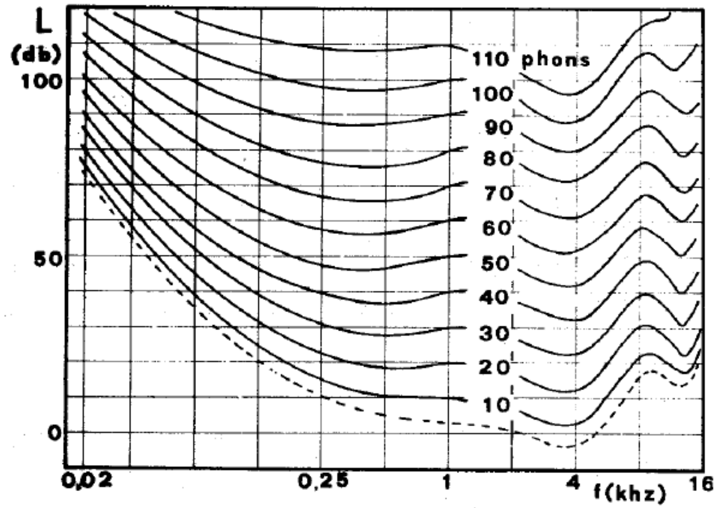


Fig. II-4

Audiogramma

Agli inizi degli anni '40 due studiosi americani, Fletcher e Munson, costruirono l'abaco in figura, detto Audiogramma Normale per suoni puri (vedasi la norma ISO 226). In esso è riportata in basso, tratteggiata, la soglia di udibilità e poi, andando verso l'alto, le curve isofoniche definite in modo che ogni curva rappresenta, per ciascuna frequenza, il livello sonoro di pari effetto (sensazione di forza) di un suono a 1000 Hz. Questo livello è chiamato Phon.
Si osservi come l'orecchio umano medio sia capace di sentire in modo diverso sia al variare della frequenza che al variare del livello. Ogni curva isofonica ha un andamento a campana: sentiamo meglio le frequenze intermedie (quelle della zona del parlato da 500 a 2000 Hz) mentre sentiamo peggio le basse e le alte frequenze.
Inoltre al crescere dell'intensità sonora le curve si appiattiscono per effetto della maggiore tensione muscolare dei muscoli del Timpano e dello Stabiale che riducono la sensibilità dell'orecchio medio (i tre ossicini, staffa, incudine e martello).



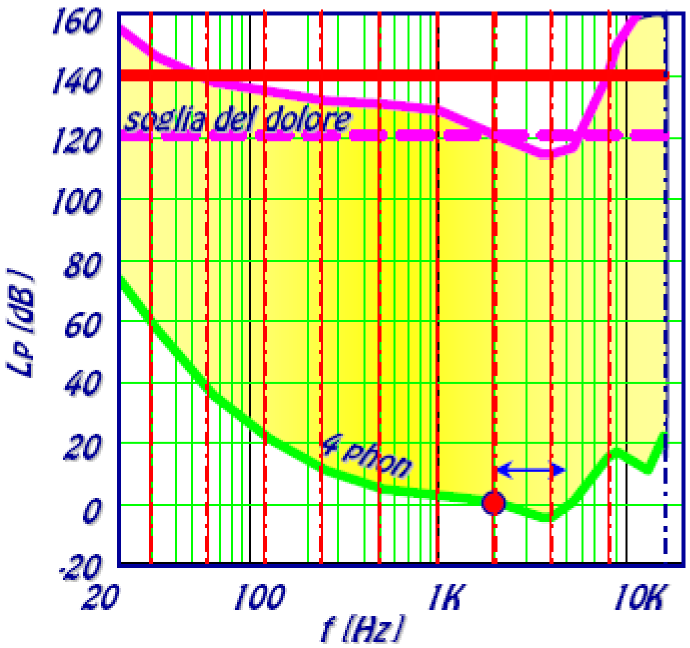
Audiogramma

La banda di frequenze fra 2500÷4000 Hz presenta una risonanza e quindi in questa zona si ha una maggiore sensibilità dell’orecchio che può portare ad effetti pericolosi fino alla parziale rottura delle terminazioni nervose (sordità parziale per effetto Bruel).
Si osservi che l’audiogramma normale ci informa su come l’organo di captazione del suono funziona, cioè come viene modificato il segnale prima di essere interpretato (sensazione) dal cervello. In pratica il nostro orecchio si comporta come un filtro passa-banda avente funzioni di trasferimento complesse date proprio dall’audiogramma di Fletcher e Munson. E’ interessante osservare come l’energia acustica non arrivi all’orecchio esterno esclusivamente per via aerea dal padiglione auricolare ma anche attraverso le ossa del cranio.
Se noi chiudiamo il condotto uditivo esterno con un tappo o una cuffia avvertiamo immediatamente il suono attraverso la conduzione ossea. Questa avviene attraverso vari cammini di trasmissione: anche le vibrazioni prodotte dalle altre parti del corpo possono essere trasmesse alla membrana basale attraverso i tessuti corporei e la struttura ossea.
E’ proprio a questa conduzione ossea che si deve la possibilità di percepire la direzione delle onde sonore in un piano verticale centrale rispetto alla sorgente. In pratica è la differenza di cammino dell’onda acustica fra orecchio destro e sinistro a far percepire al nostro cervello la direzione di provenienza del suono. Quando però l’orecchio è in un piano centrale simmetrico le condizioni di simmetria farebbero perdere la possibilità di individuare la direzione del suono se non ci fosse la possibilità di percepire anche differenze di cammino sonoro anche nel piano verticale per conduzione ossea.

Soglia uditiva

La valutazione delle capacità uditive è data dalla soglia uditiva, minimo livello di percezione di un suono puro.

In caso di udito normale la soglia uditiva è di 0 dB a 2000 Hz (curva isofonica ISO 226), e varia in modo sostanziale con la frequenza, dai circa 20 Hz (minima frequenza percepibile) a circa 16 ÷18 kHz (massima frequenza percepibile in funzione della storia acustica dell'individuo)



Curve di ponderazione

Nella valutazione del rumore si ha spesso a che fare con i cosiddetti livelli ponderati. I moderni strumenti per la misurazione presentano infatti dei filtri di pesatura denominati A, B, C (dB(A), dB(B), dB(C)).

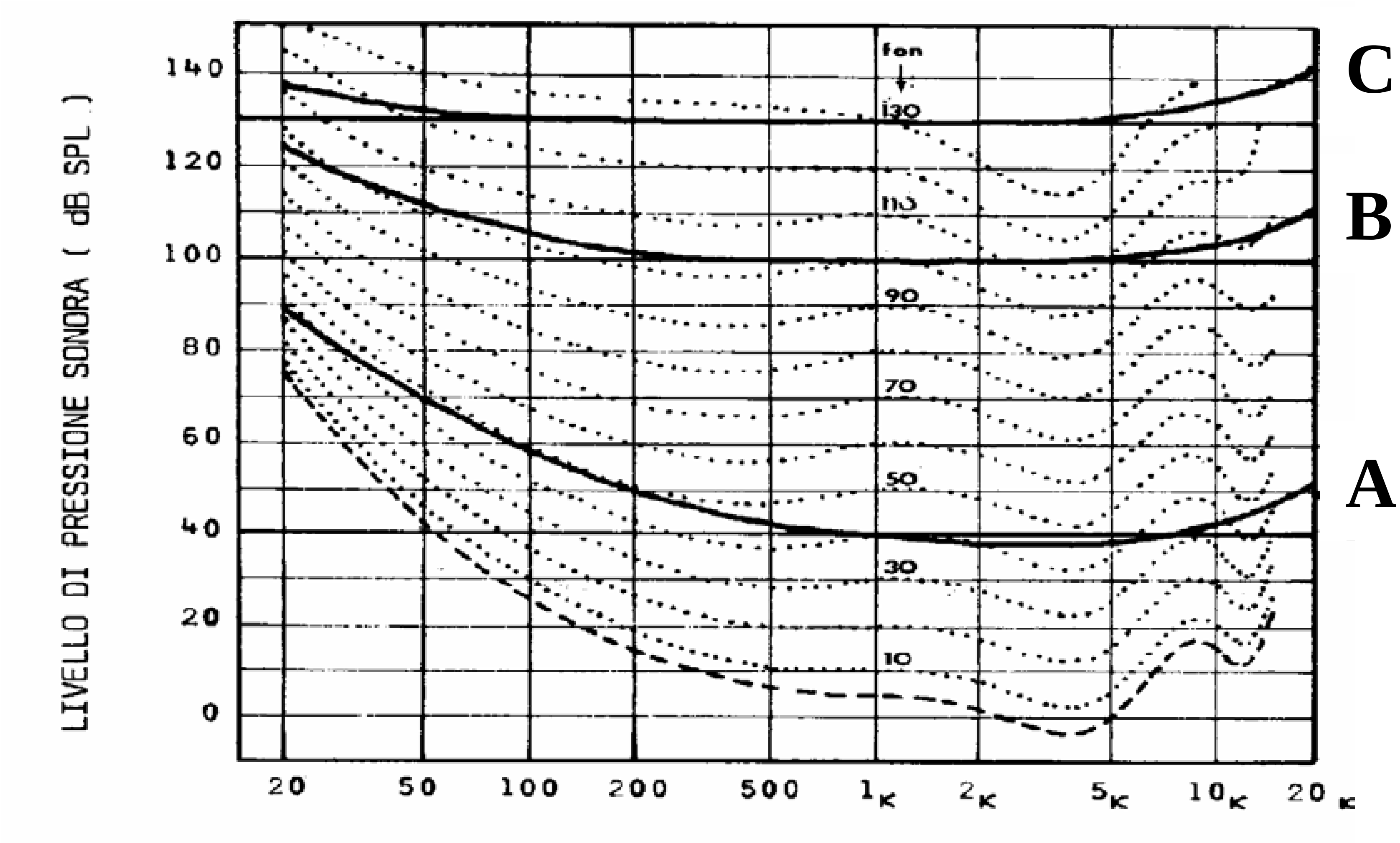
Esiste anche una scala denominata D utilizzata per misure di rumorosità in zone aeroportuali.

Come abbiamo già visto, la sensibilità dell'udito è incostante col modificarsi della frequenza e del livello sonoro; si presenta allora, per chiunque voglia eseguire delle misure di rumore attendibili, la necessità di adottare una strumentazione che emuli la caratteristica dell'organo uditivo.

La sensibilità dello strumento viene così regolata secondo tre curve conosciute come curve di ponderazione A, B, C che presentano andamenti della sensibilità leggermente diversi tra di loro anche se tutti decrescenti verso gli estremi del campo uditivo. Le curve di ponderazione derivano da considerazioni sull'audiogramma di Fletcher e Munson e presentano una forte analogia con le isofoniche misurate in Phon.

La scelta delle curve A,B e C si giustifica con la necessità di simulare il comportamento dell'orecchio umano medio ai livelli bassi, medi e alti.

Curve di ponderazione



Frequenza / Hz