

# Fisica Applicata all'ambiente

## Inquinamento acustico

<http://www.ge.infn.it/~prati>

# Riferimenti Bibliografici

D.E. Hall - Basic Acoustic J. Wiley & Sons

(Biblioteca di Fisica)

R. Spagnolo (a cura di) Manuale di acustica, UTET 2001

(Biblioteca ARPAL)

Legge 26/10/95: Legge quadro sull'inquinamento acustico

(GU 30/10/95 - n. 254 Serie Generale)

DPCM 14/11/97: Determinazione dei valori limite delle sorgenti sonore

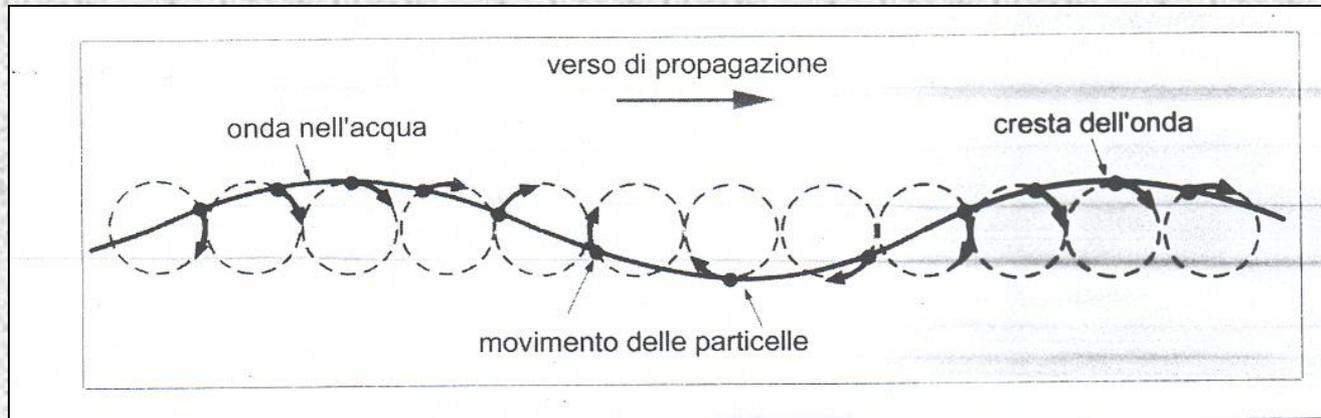
(GU 1/12/97 - n. 280 Serie Generale)

DM 16/03/98: Tecniche di rilevamento e misurazione dell'inquinamento acustico

(GU 1/04/98 - n. 76 Serie Generale)

# Natura del suono 1

Il suono e la sua propagazione presenta analogie con molti altri fenomeni fisici ondulatori (onde e.m., onde sismiche, oscillazioni, etc) in cui l'onda costituisce una perturbazione delle condizioni locali di riposo che si sposta nel mezzo interessato.



L'onda sonora è la propagazione di un moto oscillatorio rettilineo che le particelle del mezzo si comunicano sequenzialmente l'una all'altra senza che ciascuna si sposti dalla propria posizione di equilibrio. [Il fenomeno è possibile solo se il mezzo è elastico e dotato di inerzia.](#) Nei fluidi si possono propagare solo onde longitudinali mentre nei solidi sono possibili anche onde trasversali (o di taglio). Nel vuoto non ci può essere alcuna propagazione.

# Natura del suono 2

La situazione più comune è la propagazione di onde sonore in aria. Bisogna distinguere tra la velocità locale delle particelle (*velocità di particella*) e la velocità di propagazione dell'onda sonora (*velocità del suono*).

Se si considera un volume elementare del mezzo, l'oscillazione delle particelle provoca una variazione locale della densità e quindi pressione. La propagazione dell'onda è quindi accompagnata da una perturbazione del campo di pressione. La differenza tra pressione locale e pressione statica (in aria la pressione atmosferica) è detta *pressione sonora* od *acustica* e, anche se inferiore di diversi OdG alla pressione atmosferica, è la grandezza solitamente rilevata dall'orecchio e/o dagli strumenti.

La velocità di propagazione dell'onda è data da:

$$v = \sqrt{\gamma \left( \frac{p_0}{\rho_0} \right)}$$

v = velocità di propagazione dell'onda sonora

# Velocità del suono in aria

Nell'ipotesi di gas perfetto ed assumendo per l'aria  $\rho_0 = 1.292 \text{ kg/m}^3$ ,  $\gamma = 1.402$  (per  $T=0 \text{ }^\circ\text{C}$  e  $p_0 = 1 \text{ atm} = 1.0133 \cdot 10^5 \text{ Pa}$ ) si ottiene:

$$v_0 = 331.6 \text{ m/s (valore "accettato": } v_0 = 331.45 \text{ m/s per U.R. =0)}$$

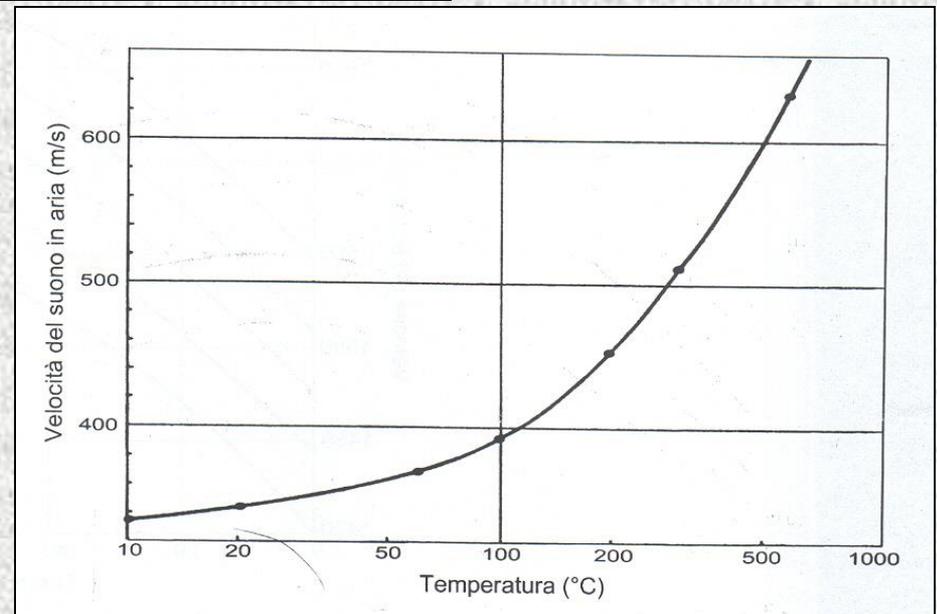
$v$  non dipende dalla pressione barometrica  
( $P/\rho$  costante se  $T$  è costante, gas perfetti)

Ma dipende dalla temperatura dell'aria

$$PV = nRT \rightarrow PV = \frac{M}{A} RT$$

$$P = \frac{\rho}{A} RT \rightarrow \frac{P}{\rho} = \frac{1}{A} RT \rightarrow v \propto \sqrt{T}$$

$$v \approx 331.6 + 0.6T(^{\circ}\text{C}) \text{ m/s}$$



# Onde armoniche

La propagazione di un'onda armonica nello spazio è esprimibile come:

$$f(x) = A \cos\left(\frac{2\pi}{\lambda} x\right)$$

Ma la perturbazione si propaga anche nello spazio e la relazione tra posizione e tempo è espressa da:

$$x = \lambda \frac{t}{T} \Rightarrow x - \lambda \frac{t}{T} = 0 \Rightarrow x(t) - \lambda \frac{t}{T} = x(0)$$

$$x = x(t) \Rightarrow x = \alpha t$$

$$x = \frac{\lambda}{2} \text{ per } t = \frac{T}{2}; \quad x = \frac{\lambda}{4} \text{ per } t = \frac{T}{4}, \text{ etc}$$

$$\text{quindi: } \alpha = \frac{\lambda}{T} \text{ e } x = \frac{\lambda}{T} t$$

Unendo le due relazioni si ottiene:

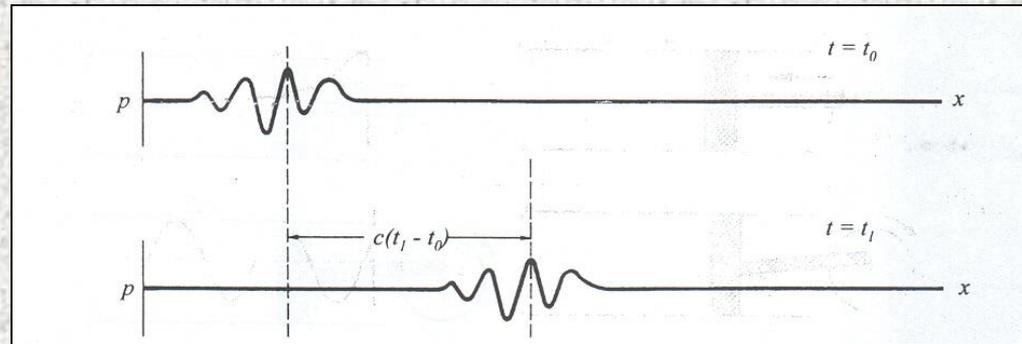
$$f(x, t) = A \cos\left[\frac{2\pi}{\lambda} \left(x - \lambda \frac{t}{T}\right)\right] = A \cos\left(\frac{2\pi}{\lambda} x - \frac{2\pi}{T} t\right)$$

$$f(x, t) = A \cos(kx - \omega t)$$

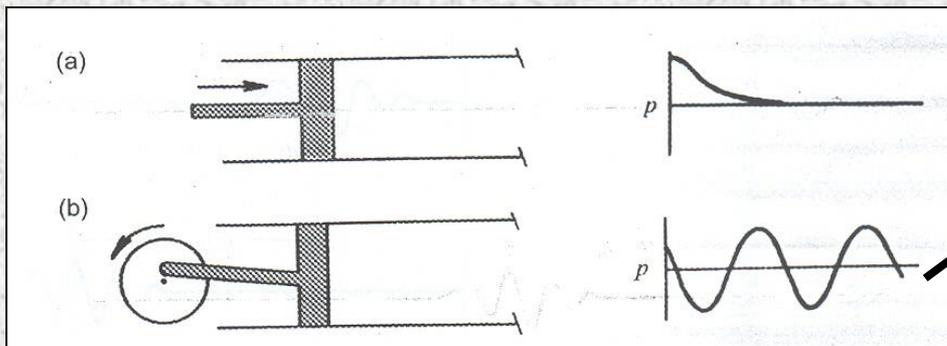
# Propagazione per onda piana

Se le grandezze del campo acustico variano lungo una sola coordinata spaziale allora  $p = p(x,t)$  e

$$p = f\left(t - \frac{x}{v}\right) + g\left(t + \frac{x}{v}\right)$$



Se, come accade spesso, l'onda si propaga in un solo verso il II termine ( $g$ ) è =0.



$$p = p_{\max} \cos\left[\omega\left(t - \frac{x}{v}\right) + \varphi\right]$$
$$p = p_{\max} \cos[\omega t - kx + \varphi]$$

# Propagazione per onda sferica

Un'altro importante caso è quello di onde che si propagano con simmetria radiale da una sorgente puntiforme in un mezzo omogeneo:

La soluzione generale è:

$$p = \frac{1}{r} \left[ f\left(t - \frac{r}{c}\right) + g\left(t + \frac{r}{c}\right) \right]$$

Se il mezzo è infinito → no riflessioni

Anche in questo caso si può scrivere la soluzione armonica:

$$p = \frac{p_{\max}}{r} \cos(\omega t - kr + \varphi)$$

**p si attenua con r**  
(conservazione dell'energia)

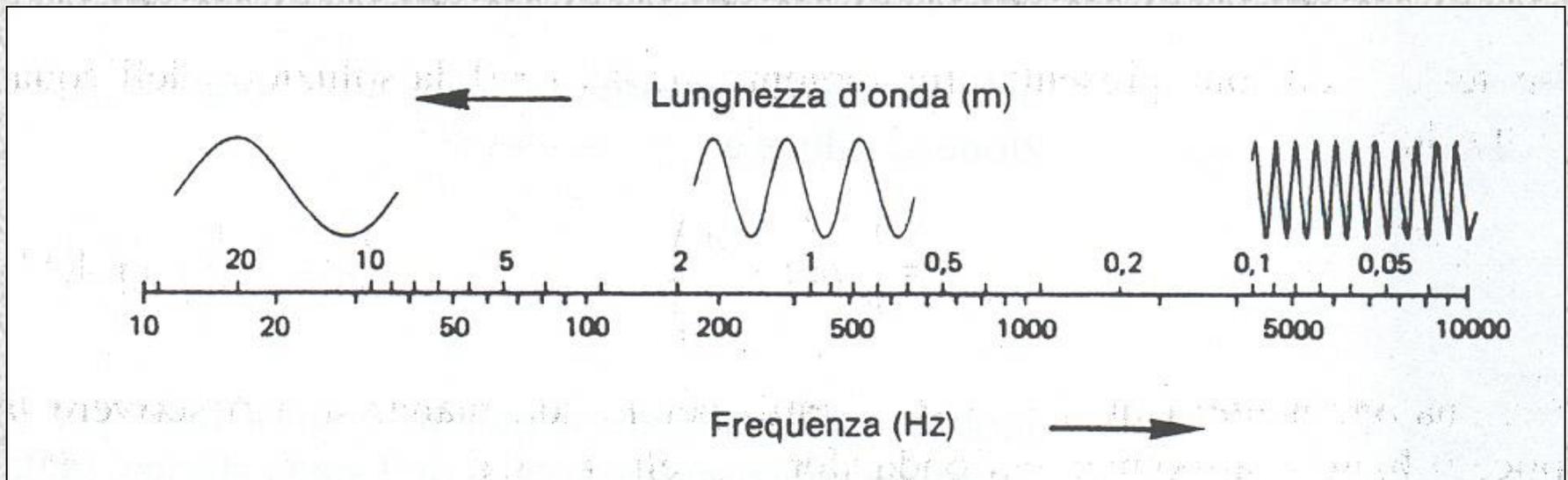
# Frequenza e lunghezza d'onda

$$\lambda = 2\pi/k = 2\pi v/\omega = v/\nu = vT$$

In aria a  $T = 23\text{ }^\circ\text{C}$ ,  $v = 345.4\text{ m/s}$  e quindi:

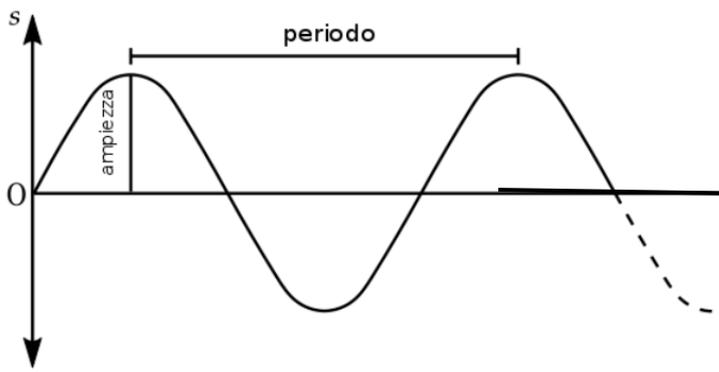
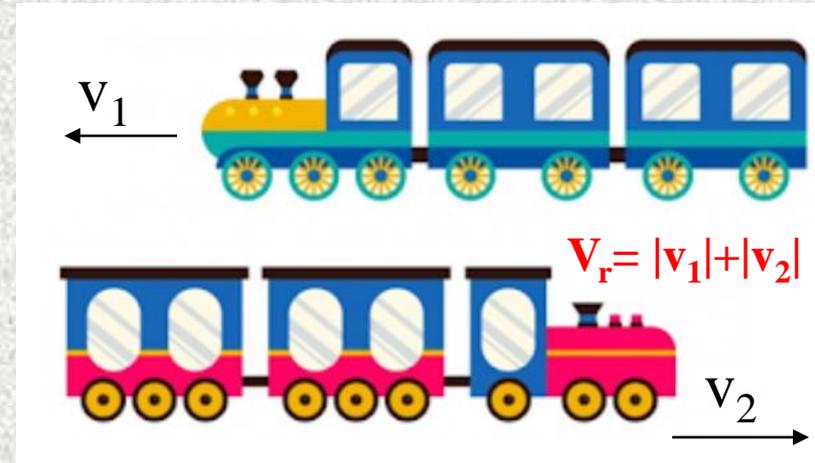
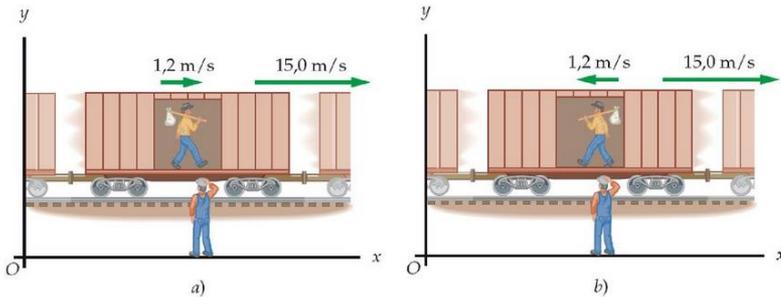
$$10\text{ Hz} \rightarrow \lambda = 34.5\text{ m}$$

$$10\text{ kHz} \rightarrow \lambda = 3.45\text{ cm}$$

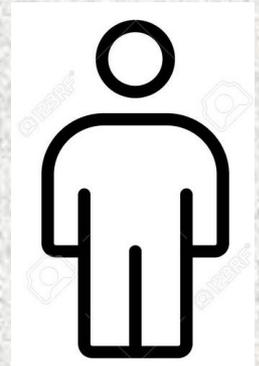


# Velocità assoluta e relativa

La velocità del passeggero rispetto al suolo dipende dalla direzione relativa delle velocità del passeggero e del treno.



$$v = v_p / \lambda$$



Ma se l'osservatore e/o la sorgente dell'onda sono in movimento ?

# Effetto Doppler

La frequenza dell'onda acustica (ma non solo !) varia se la sorgente sonora e/o l'osservatore sono in movimento

## 1: osservatore in movimento rispetto alla sorgente

$$V = \lambda \nu$$

$u = \text{velocità osservatore}$

$$V' = V + u$$

$$\nu' = \frac{V'}{\lambda} = \frac{V + u}{\lambda} \Rightarrow \nu' = \frac{V + u}{\frac{V}{\nu}} = \left( \frac{V + u}{V} \right) \nu = \left( 1 + \frac{u}{V} \right) \nu$$

$$\text{In generale : } \nu' = \left( 1 \pm \frac{u}{V} \right) \nu$$

# Effetto Doppler

2: sorgente in movimento rispetto all'osservatore

*in generale:  $\lambda = VT$*

*$u = \text{velocità sorgente}$*

$$\lambda' = VT - uT = (V - u)T$$

*$V$  dipende solo dal mezzo  $\Rightarrow V = \lambda' \nu'$*

$$\nu' = \frac{V}{\lambda'} = \frac{V}{(V - u)T} = \frac{V}{(V - u) \frac{1}{\nu}} = \frac{V}{V - u} \nu = \left( \frac{1}{1 - \frac{u}{V}} \right) \nu$$

*$\nu' > \nu$  se  $u > 0$*

$$\text{In generale: } \nu' = \left( \frac{1}{1 \pm \frac{u}{V}} \right) \nu$$

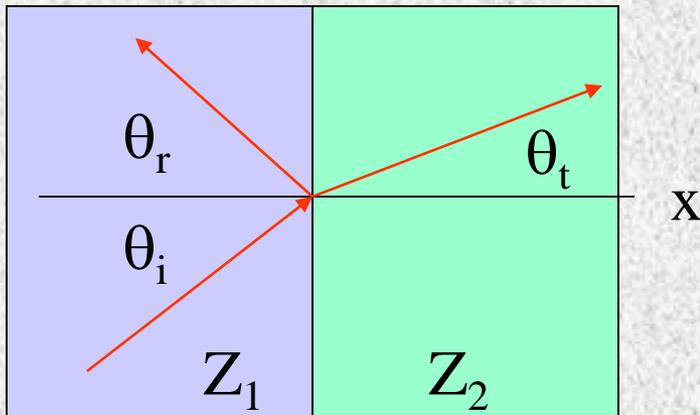
# Effetto Doppler

## 3: sorgente ed osservatore entrambi in movimento

$$\nu' = \left( \frac{1 \pm \frac{u_o}{V}}{1 \pm \frac{u_s}{V}} \right) \nu$$

L'effetto Doppler viene sfruttato in numerosi ambiti tra cui la medicina (ecografia dinamica) e velocità relative della galassie («red shift»), controllo della velocità dei veicoli («pistola radar»)

# Riflessione ed angolo di incidenza



La situazione è del tutto simile a quella dell'ottica geometrica:

$$\sin \theta_r = \sin \theta_i \quad \mathbf{e} \quad \frac{\sin \theta_t}{\sin \theta_i} = \frac{c_2}{c_1}$$

Si può definire anche in questo caso un angolo critico oltre il quale c'è riflessione totale:

$$\sin \theta_c = \frac{c_1}{c_2}$$

Se l'onda si propaga in un mezzo in cui è presente un gradiente termico, ad es. l'atmosfera, c'è una variazione continua dell'impedenza caratteristica e quindi dell'angolo critico che può portare anche ad un'inversione della direzione di propagazione dell'onda

# Interferenza delle onde acustiche

Frequenza del segnale emesso in fase dai due autoparlanti = 221 Hz.  
 $D = 4.3 \text{ m}$ ;  $d_1 = 2.8 \text{ m}$

In generale si ha:

**Interferenza costruttiva**

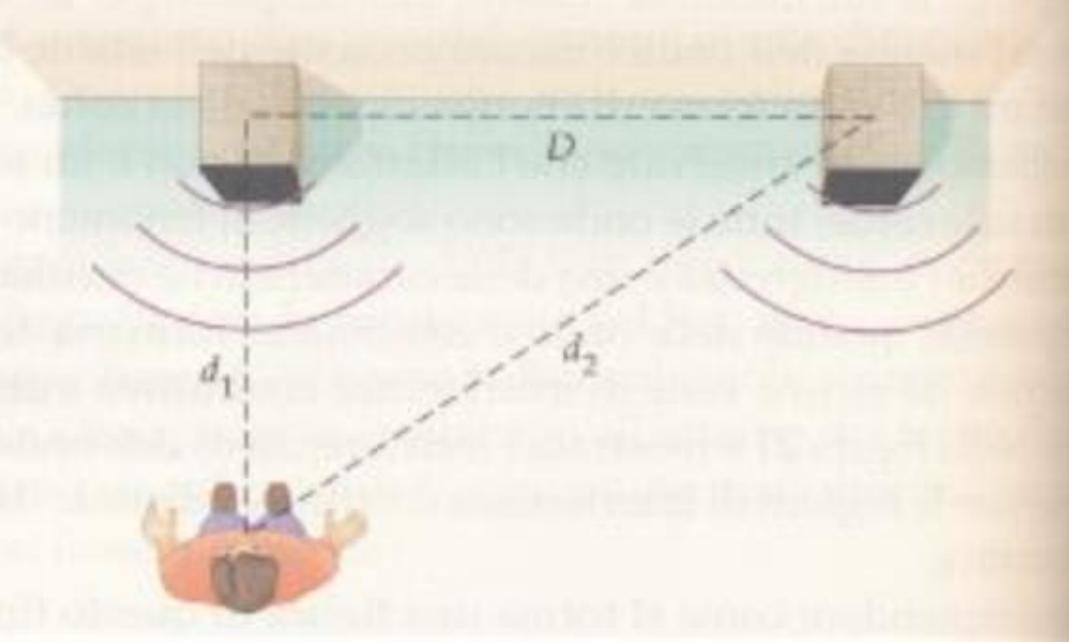
se:

$$D = k\lambda \quad (k \text{ intero})$$

**Interferenza distruttiva**

se

$$D = k \frac{\lambda}{2}$$

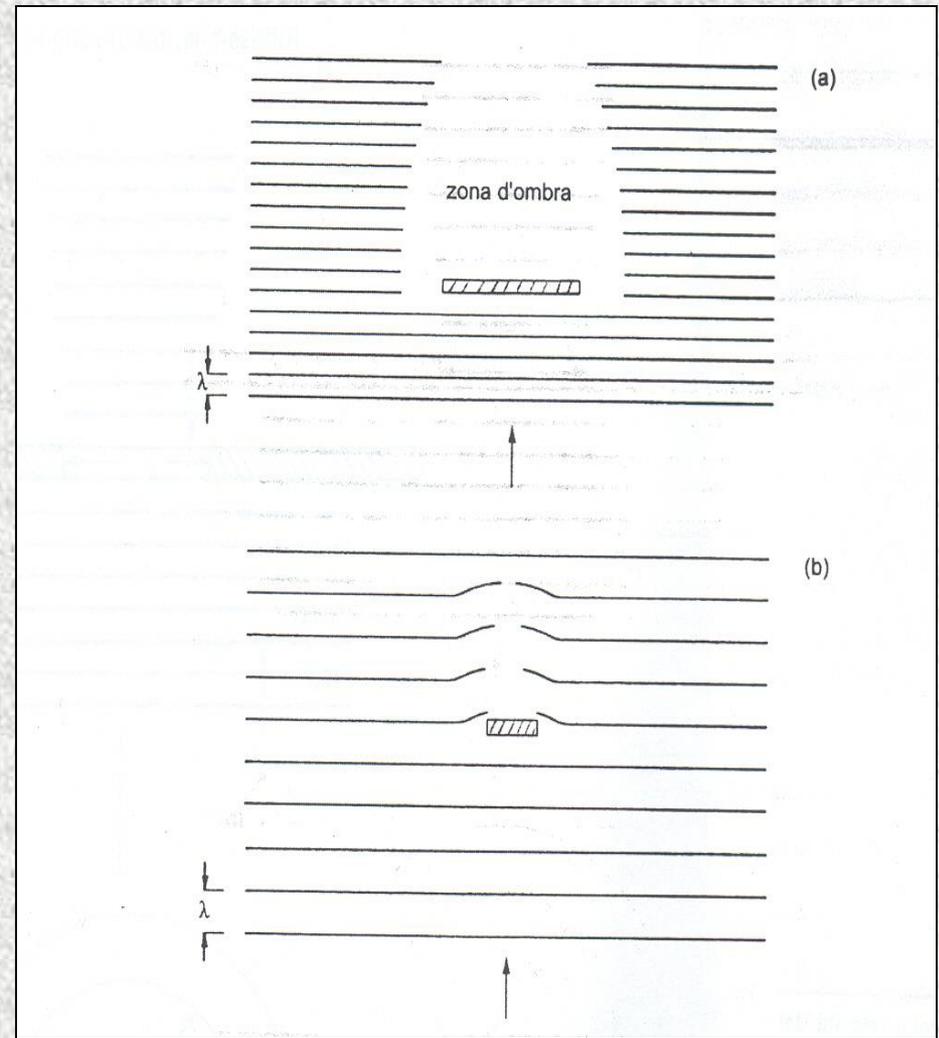
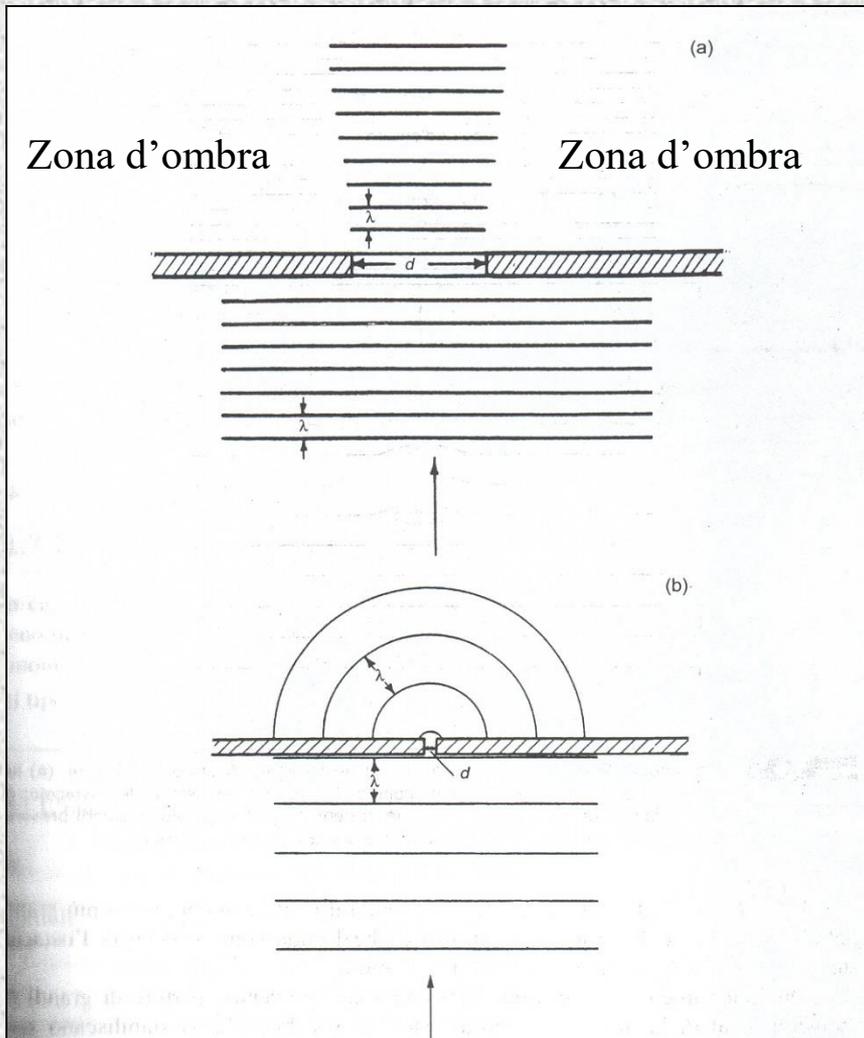


The diagram shows two speakers on a surface, separated by a distance  $D$ . A listener is positioned below the speakers. The distance from the left speaker to the listener is  $d_1$ , and the distance from the right speaker to the listener is  $d_2$ . The path difference is  $d_2 - d_1$ .

$$\lambda = \frac{v}{f} = \frac{343 \text{ m/s}}{221 \text{ Hz}} = 1,55 \text{ m}$$
$$d_2 = \sqrt{D^2 + d_1^2} = \sqrt{(4,30 \text{ m})^2 + (2,80 \text{ m})^2} = 5,13 \text{ m}$$
$$d_2 - d_1 = 5,13 \text{ m} - 2,80 \text{ m} = 2,33 \text{ m}$$
$$\frac{d_2 - d_1}{\lambda} = \frac{2,33 \text{ m}}{1,55 \text{ m}} = 1,50$$

# Diffrazione delle onde

In acustica  $\text{cm} < \lambda < \text{m}$  e le dimensioni dei mezzi attraversati spesso non possono essere trascurate



# Intensità di energia

Intensità sonora (o acustica),  $I$  = Energia che fluisce nell'unità di tempo attraverso una superficie unitaria posta perpendicolarmente alla direzione di propagazione dell'onda:

$$I = \frac{E}{At} = \frac{W}{A}$$

Questa espressione è valida quando la sorgente dell'onda è molto lontana

Nel caso di una sorgente puntiforme si deve tenere conto che l'energia emessa dalla sorgente si distribuisce su superfici di ampiezza crescente con la distanza ovvero:

$$I = \frac{W}{A} = \frac{W}{4\pi r^2}$$

# Potenza sonora

Se tutta l'energia che fluisce nel mezzo è prodotta da una sola sorgente allora l'energia irradiata per unità di tempo è la sua potenza  $W$ , integrando su una superficie  $S$  che circondi completamente la sorgente.

$$W = \int_S I ds$$

Se la sorgente è isotropa allora  $S$  è una superficie sferica e:

$$W = 4\pi r^2 I = 4\pi r^2 \frac{p^2}{\rho_0 v_{suono}}$$

E la misura della potenza sonora si riconduce a quella della pressione sonora ad una distanza  $r$  dalla sorgente

# Scala dei Decibel e livelli sonori 1

L'orecchio umano percepisce, in media, una pressione sonora minima di 20  $\mu\text{Pa}$  mentre oltre  $p = 60 \text{ Pa}$  subisce danni immediati. Poiché la risposta soggettiva è più correlata all'energia  $\propto p^2$  l'intervallo di interesse è ampio 12 OdG  $\rightarrow$  conviene usare una scala logaritmica.

Livello di pressione sonora:

$$L_p = 10 \log \frac{p^2}{p_0^2} = 20 \log \frac{p}{p_0} \text{ dB}$$

Si assume convenzionalmente  $p_0 = 20 \mu\text{Pa}$ . Nell'intervallo di pressione sonora di interesse per gli effetti sull'uomo abbiamo:  $0 < L_p < 120 \text{ dB}$

Livello di potenza sonora:

$$L_W = 10 \log \frac{W}{W_0} \text{ dB}, \quad W_0 = 1 \text{ pW}$$

Livello di intensità sonora:

$$L_I = 10 \log \frac{I}{I_0} \text{ dB}, \quad I_0 = 1 \text{ pW/m}^2$$

# Scala dei Decibel e livelli sonori 2

| Potenza sonora (W) | $L_w$ (dB) |
|--------------------|------------|
| 1.000.000          | 180        |
| 100.000            | 170        |
| 10.000             | 160        |
| 1.000              | 150        |
| 100                | 140        |
| 10                 | 130        |
| 1                  | 120        |
| 0,1                | 110        |
| 0,01               | 100        |
| 0,001              | 90         |
| 0,0001             | 80         |
| 0,00001            | 70         |
| 0,000001           | 60         |
| 0,0000001          | 50         |
| 0,00000001         | 40         |
| 0,000000001        | 30         |

**Tab. 1.8.1** Corrispondenza tra potenza sonora (in watt) e livelli di potenza sonora (in decibel)

Esempio:  $L_I$  a 10 m da una sorgente isotropa con  $W=0.1$  W.

$$I = \frac{W}{4\pi r^2} = \frac{0.1}{4\pi 100} = 7.95 \cdot 10^{-5} \text{ W/m}^2$$

$$L_I = 10 \log \frac{7.95 \cdot 10^{-5}}{10^{-12}} = 79 \text{ dB}$$

| Potenza sonora (W) | $L_w$ (dB) | Sorgente                         |
|--------------------|------------|----------------------------------|
| $10^4$             | 160        | Turboreattore                    |
| $10^1$             | 130        | Piena orchestra                  |
| 1                  | 120        | Martello perforatore             |
| $10^{-1}$          | 110        | Apparecchio radio ad alto volume |
| $10^{-2}$          | 100        | Autoveicolo su autostrada        |
| $10^{-3}$          | 90         | Voce gridata                     |
| $10^{-6}$          | 60         | Conversazione normale            |
| $10^{-9}$          | 30         | Bisbiglio                        |

**Tab. 1.8.2** Potenza sonora e corrispondenti livelli di potenza sonora di alcune tipiche sorgenti

# La percezione del suono 1

Orecchio medio:  
adattatore di  
impedenza

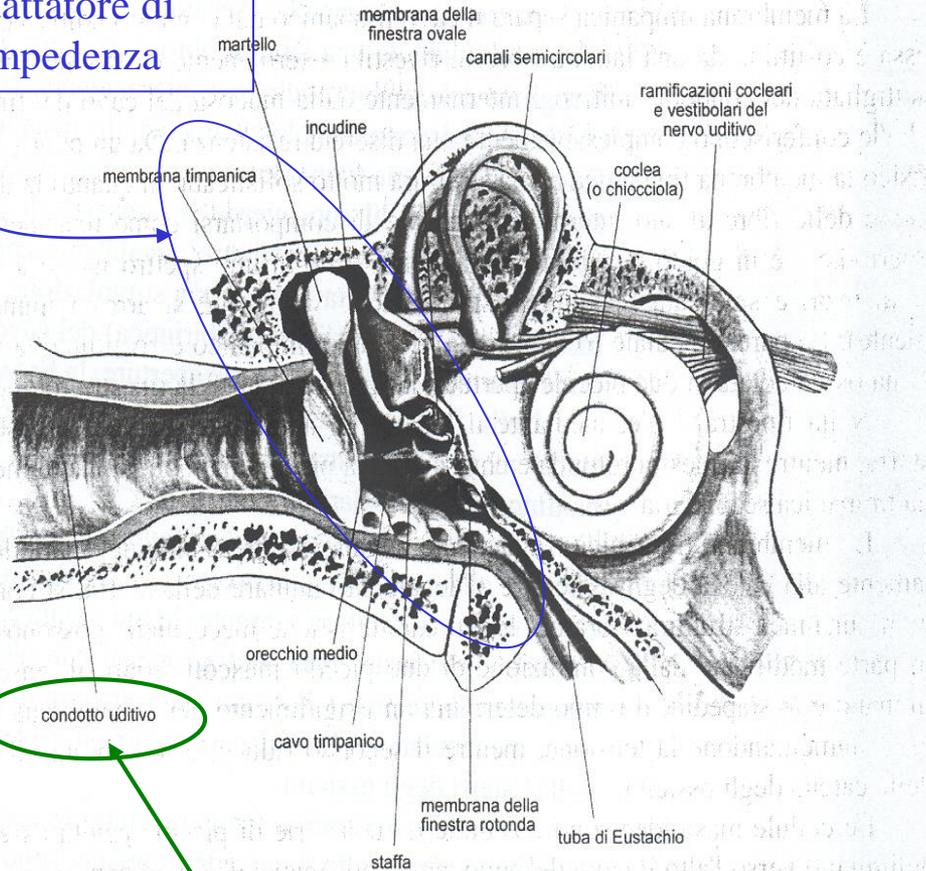


Fig. 2.2.1 Schema anatomico dell'orecchio medio e della coclea

Risonatore con frequenza di risonanza  
tra 3 e 4 kHz

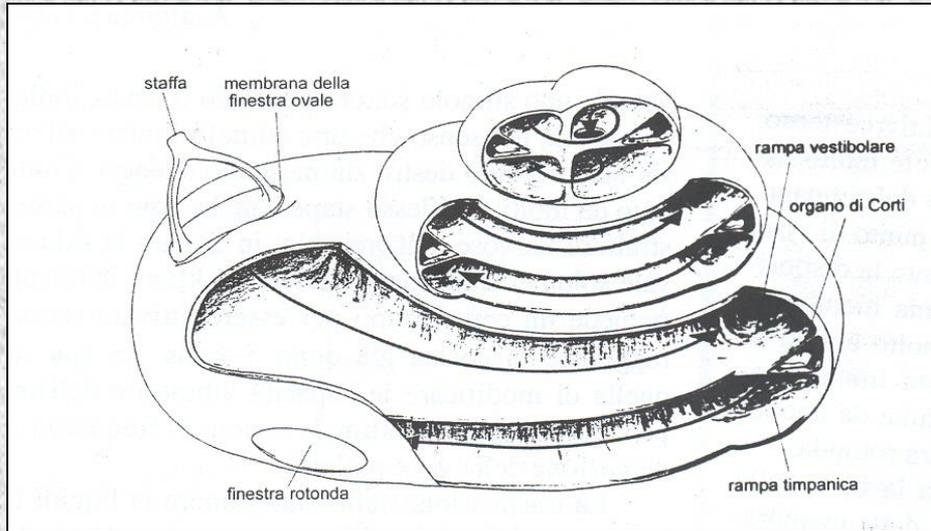
L'apparato uditivo si suddivide in:

- Orecchio esterno
- Orecchio medio
- Orecchio interno
- Sistema uditivo centrale

Oppure in:

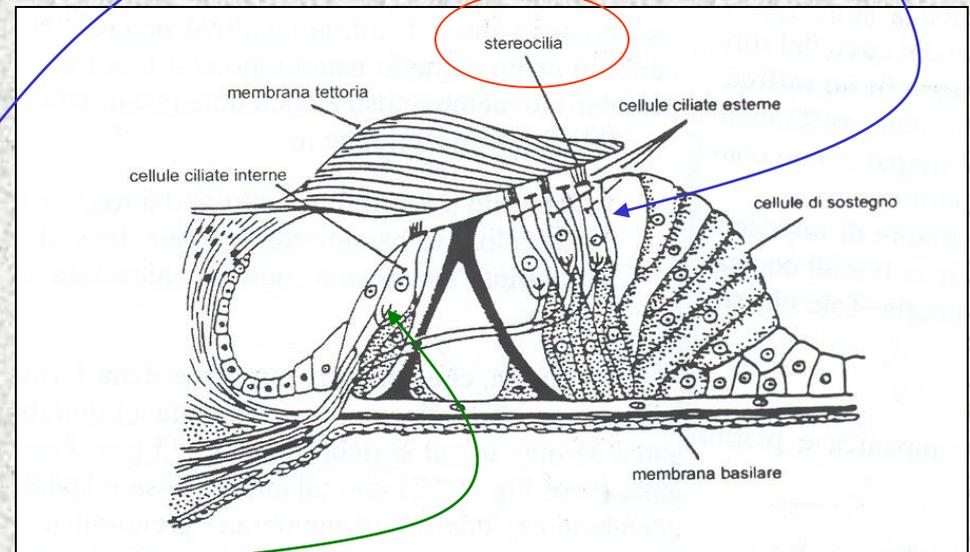
- Funzione di trasmissione della pressione sonora
- Funzione di trasformazione della  $p$  in segnali del sistema nervoso periferico
- Funzione di Analisi dei segnali
- Funzione di riconoscimento dei segnali

# La percezione del suono 2



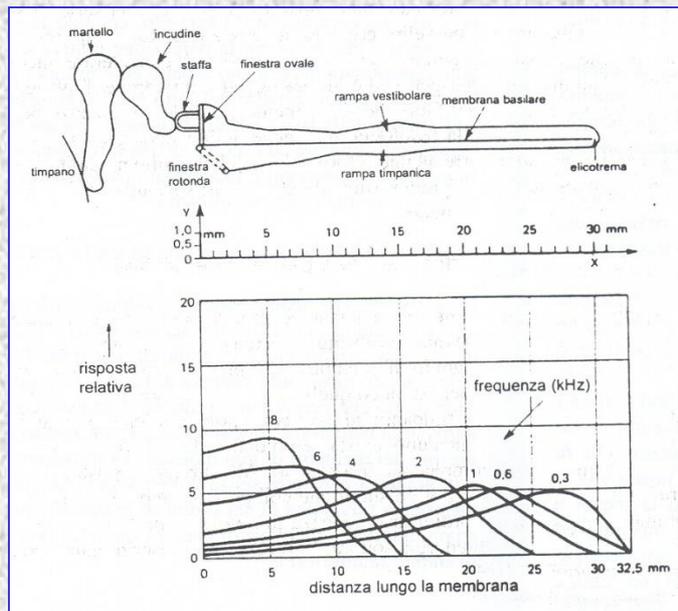
Coclea:  $l = 35$  mm, 3.75 giri, divisa in 3 condotti uno dei quali ospita l'organo di Corti (trasduttore  $p \rightarrow V$ )

Nell'organo di Corti ci sono 24.000 cellule ciliate (3/4 sono in collegamento 1-1 con le sinapsi del nervo acustico mentre l'1/4 esterno è in collegamento 1/10 con le sinapsi del nervo acustico e con altre cellule nervose afferenti). Sono in pratica dei trasduttori piezoelettrici!



# La risposta soggettiva

L'apparato uditivo umano è caratterizzato da elevata sensibilità e ampia "banda passante". Il suono più debole che riesce ad essere percepito provoca uno spostamento della membrana timpanica di  $\sim 10^{-10}$  m, i suoni più intensi al di sotto della soglia di dolore provocano oscillazioni del timpano di  $\sim 10^{-4}$  m. In tutto questo intervallo l'orecchio distingue variazioni di ampiezza inferiori al 10%. La "banda passante" va da 16-20 Hz a 16-20 kHz ma alle basse frequenze c'è una forte attenuazione. Con l'età, l'irrigidimento dei tessuti (presbiacusia) provoca una diminuzione di efficienza alle alte frequenze ed il limite massimo scende a 10-12 kHz.



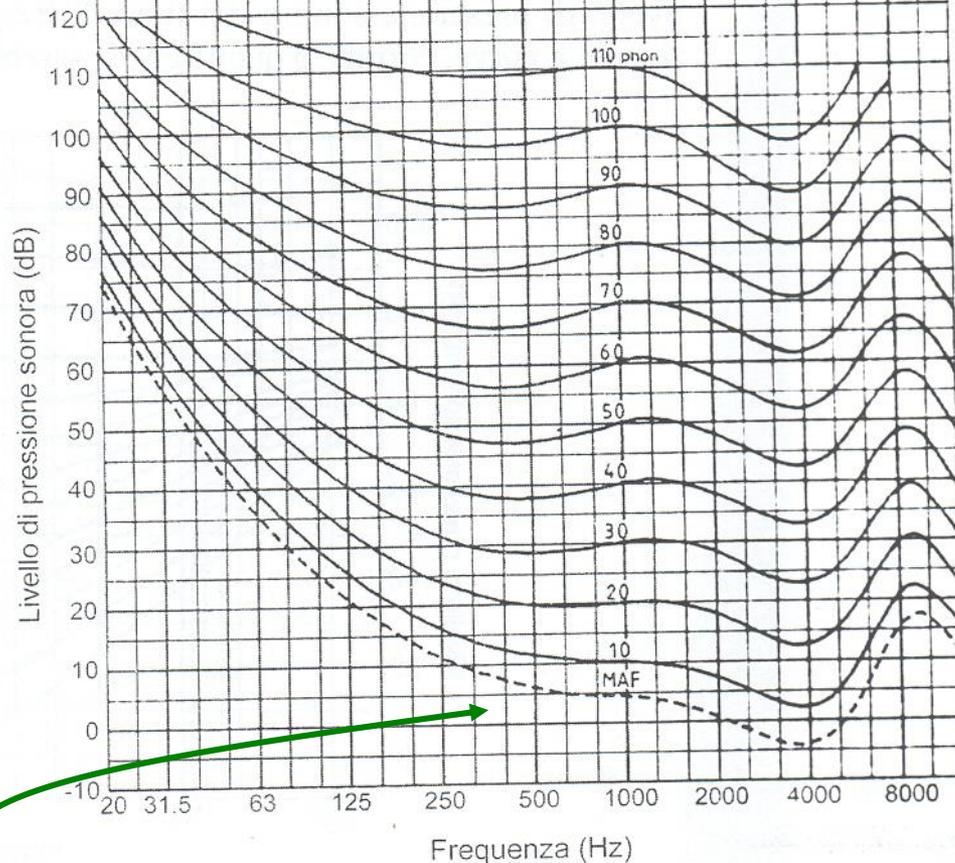
I suoni di frequenza maggiore sono percepiti all'inizio della membrana basilare dove l'apparato uditivo è più sensibile: sono quindi "misurati" con maggiore efficienza.

In ogni caso l'apparato uditivo si comporta come un analizzatore di frequenza e percepisce singole frequenze di ampiezza inferiore al rumore di fondo

# Sensazione sonora 1

## Curve isofoniche norma ISO 226

130 -140 dB Soglia del dolore



MAF= Minimum audible field =4.2 phon

La **Sensazione sonora**,  $S$ , (*loudness*) è la caratteristica di un suono in base alla quale esso viene giudicato più o meno intenso da un ascoltatore. E' una grandezza soggettiva e relativa perché si misura variando l'intensità di un suono rispetto ad uno di riferimento (1kHz).

Si definisce **Livello di sensazione sonora (P)** alla frequenza  $\nu$ , il livello di pressione sonora ( $L_p$ ) a 1 kHz / sensazione sonora = sensazione sonora alla frequenza  $\nu$  è la stessa.

$[P] = \text{phon}$

# Sensazione sonora 2

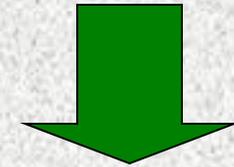
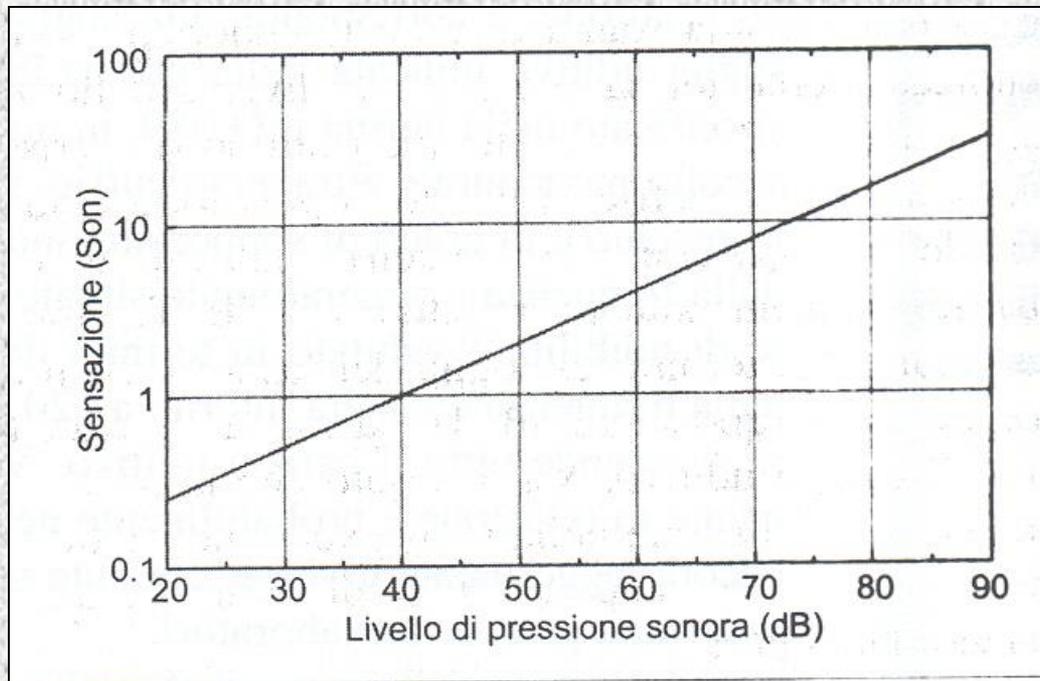
Attualmente, ma la relazione è oggi sottoposta a revisione, si considera che:

$$S = 2^{\frac{P-40}{10}} \text{ son, con } P \text{ in phon}$$
$$\log(S) = 0.03(P - 40) \text{ phon}$$

1 son è definito come la sensazione sonora di un suono a 1 kHz con  $L_{pr} = 40$  dB.

Per un suono puro a 1 kHz si ricava che:

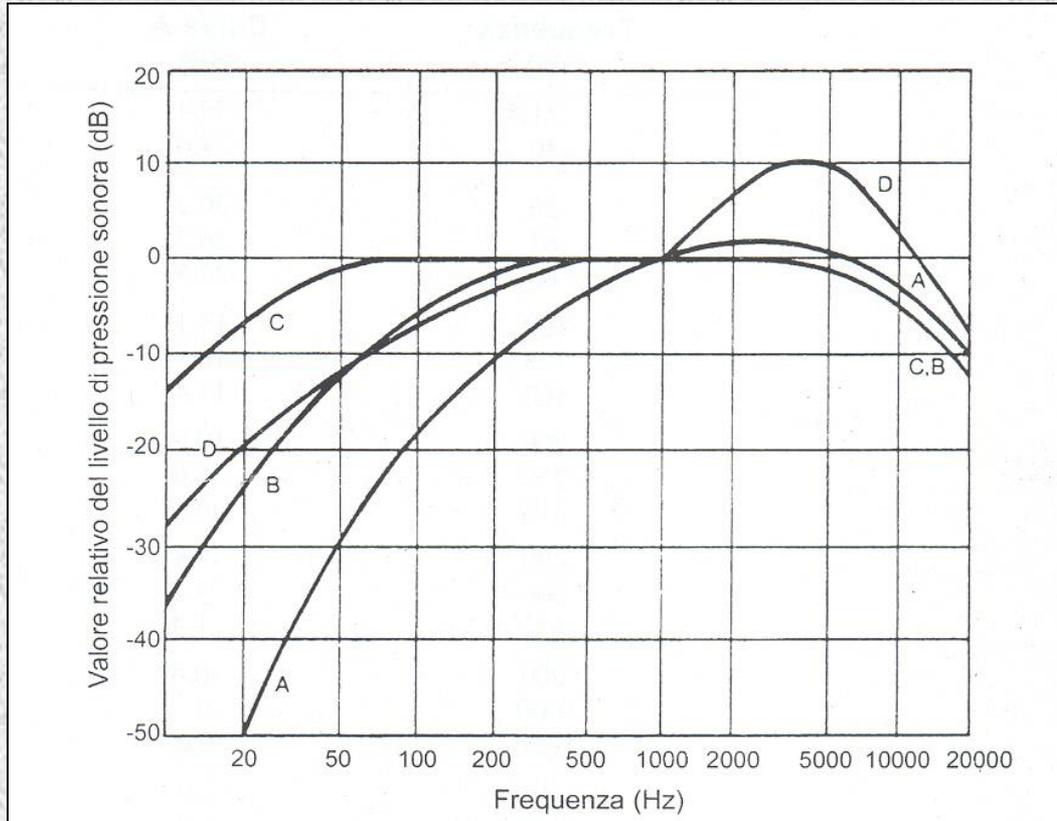
$$S = (0.01p/p_r)^{0.6} \text{ son}$$



La relazione tra Livello di Sensazione Sonora  $L_s$  (definito come tutti gli altri livelli citati =  $L_s = 10 \log(S/S_0)$ ) ed  $L_p$  è lineare: ogni 10 dB la sensazione raddoppia

# Curve di ponderazione 1

Le curve isofoniche hanno suggerito di inserire elettronicamente negli strumenti di misura “fattori peso” in modo da riprodurre la risposta dell'apparato uditivo (Sensazione sonora) alle diverse frequenze ed intensità. In linea di principio per ogni  $L_p$  sarebbe necessario utilizzare fattori di ponderazione diversi.



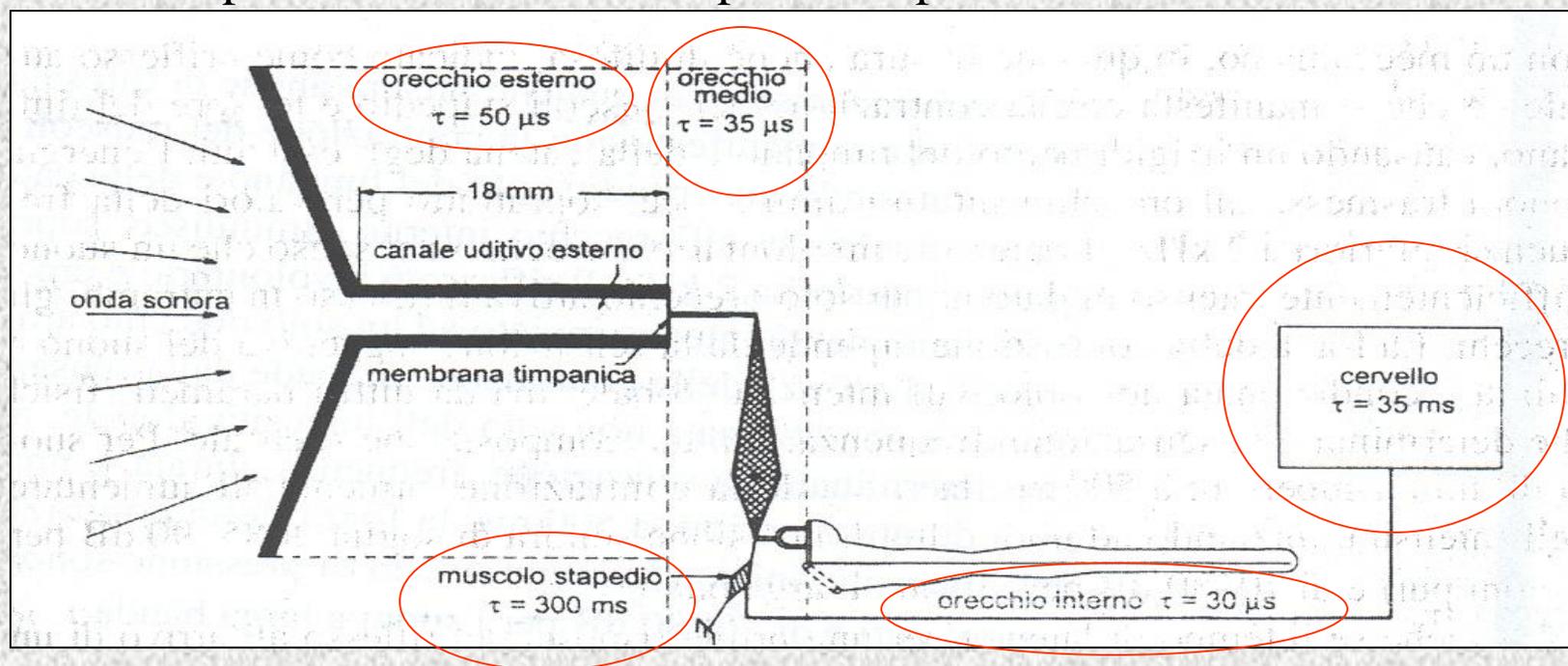
In pratica sono state “implementate” quattro diverse curve: A, B, C corrispondenti alle curve isofoniche a 40, 70 e 100 phon e D relativa alla scala di “ugual fastidio” (noisiness) utilizzata prevalentemente in campo aeronautico. Attualmente si utilizza quasi esclusivamente la curva A a qualunque  $L_p$ .

# Curve di ponderazione 2

| Frequenza (Hz) | Curva A (dB) | Curva B (dB) | Curva C (dB) |
|----------------|--------------|--------------|--------------|
| 31,5           | -39,4        | -17,1        | -3,0         |
| 40             | -34,6        | -14,2        | -2,0         |
| 50             | -30,2        | -11,6        | -1,3         |
| 63             | -26,2        | -9,3         | -0,8         |
| 80             | -22,5        | -7,4         | -0,5         |
| 100            | -19,1        | -5,6         | -0,3         |
| 125            | -16,1        | -4,2         | -0,2         |
| 160            | -13,4        | -3,0         | -0,1         |
| 200            | -10,9        | -2,0         | 0            |
| 250            | -8,6         | -1,3         | 0            |
| 315            | -6,6         | -0,8         | 0            |
| 400            | -4,8         | -0,5         | 0            |
| 500            | -3,2         | -0,3         | 0            |
| 630            | -1,9         | -0,1         | 0            |
| 800            | -0,8         | 0            | 0            |
| 1000           | 0            | 0            | 0            |
| 1250           | 0,6          | 0            | 0            |
| 1600           | 1,0          | 0            | -0,1         |
| 2000           | 1,2          | -0,1         | -0,2         |
| 2500           | 1,3          | -0,2         | -0,3         |
| 3150           | 1,2          | -0,4         | -0,5         |
| 4000           | 1,0          | -0,7         | -0,8         |
| 5000           | 0,5          | -1,2         | -1,3         |
| 6300           | -0,1         | -1,9         | -2,0         |
| 8000           | -1,1         | -2,9         | -3,0         |
| 10000          | -2,5         | -4,3         | -4,4         |
| 12500          | -4,3         | -6,1         | -6,1         |
| 16000          | -6,6         | -8,4         | -8,4         |
| 20000          | -9,3         | -11,1        | -11,2        |

# Risposta uditiva a suoni di breve durata

Se la durata di un suono è inferiore a qualche centinaio di ms la Sensazione sonora dipende dalla durata stessa. Studi sperimentali hanno dimostrato che, in questi casi,  $S$  dipende dal prodotto  $L_p \cdot \text{durata}$  cioè dall'energia convogliata sull'orecchio dall'impulso acustico. Questo è sempre vero ma per durate superiori la  $S$  satura ad un valore che dipende solo da  $L_p$ . L'apparato uditivo ha quindi una sua costante tempo con cui integra i segnali. Molti strumenti hanno una costante tempo *Impulse* di 35 ms ritenuta un ragionevole valore medio. Alcune parti dell'orecchio però hanno costanti tempo molto più brevi.



# Danni uditivi da rumore 1

Consistono in riduzione dell'efficienza dell'apparato uditivo e compaioni, soprattutto a carico delle strutture nervose dell'organo di Corti a seguito di stimolazione acustica intensa e prolungata. L'entità della lesione risulta correlata all'energia sonora (cioè a  $L_p * T$ ) ma rumori di tipo impulsivo sono più dannosi. Le strutture più fragili sono le cellule ciliate esterne che perdono, appunto le ciglia. Il danno si concentra sulle cellule dell'organo di Corti deputate all'analisi dei suoni tra 4 e 6 kHz indipendentemente dalla composizione spettrale del rumore.

L'esposizione di un soggetto ad un rumore provoca l'innalzamento della sogli uditiva: si definisce il **Temporary Threshold Shift (TTS)**= differenza in decibel tra la soglia uditiva dopo e prima l'esposizione al rumore. Si distinguono due tipi di TTS:

**STS<sub>2</sub>** (Fatica uditiva fisiologica): TTS misurato 2 minuti dopo la fine dell'esposizione e dura meno di 16 ore

**STS<sub>16</sub>** (Fatica uditiva patologica): permane oltre le 16 ore e il suo recupero avviene linearmente col tempo

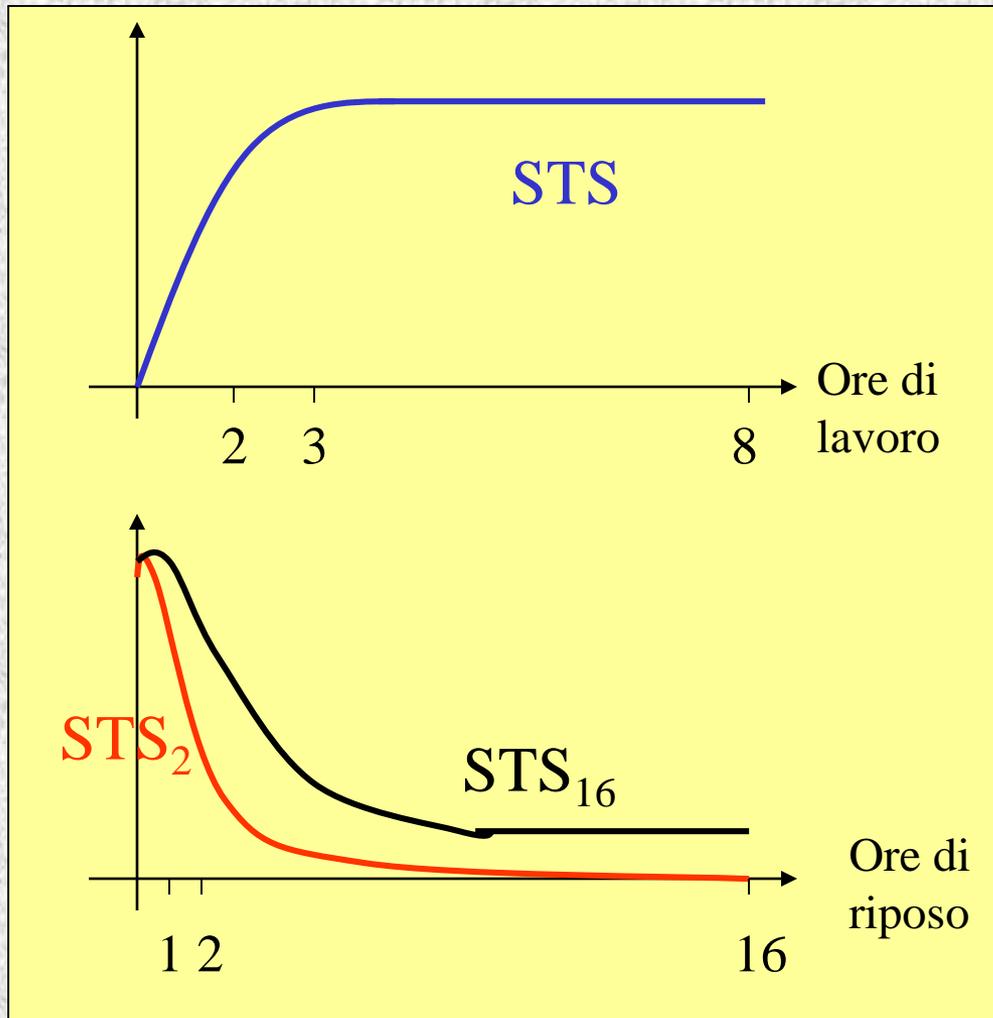
# Danni uditivi da rumore 2

L'insorgenza di un TTS è presumibilmente dovuta ad uno stato di esaurimento funzionale a livello dei recettori acustici periferici a causa di un apporto energetico insufficiente rispetto all'entità della stimolazione. Di solito:

- Un tono puro inferiore con  $L_p < 70$  dB non provoca TTS
- Un tono puro con  $80 < L_p < 90$  dB produce un  $STS_2$  ad una frequenza vicina a quella stimolante
- Un tono puro con  $L_p > 90$  dB provoca un  $STS_2$  su un intervallo di frequenze
- I rumori industriali (di solito a banda larga) provocano  $STS_2$  che è max. a 3-4 kHz
- L'entità dello  $STS_2 \propto L_p \cdot \log(T_{esp})$
- A parità di  $L_p$ , l' $STS_2$  aumenta con la frequenza
- L' $STS_2$  è max. 2 ore dopo il termine dell'esposizione e si recupera con il log del tempo

Se l'esaurimento funzionale è eccessivo il tempo necessario per il recupero è lungo ( $STS_{16}$ ) e, se l'esposizione si ripete non vi è la possibilità di un recupero completo e il TTS diventa un PTS (Permanent threshold shift). **Se dopo le 16 ore di riposo il STS non è recuperato si creano le condizioni per un PTS.**

# Danni uditivi da rumore 3



Un  $STS_2$  di 20 dB è recuperato da tutti i soggetti mentre salendo a 30 dB già alcuni non sono in grado di recuperare.

In presenza di un deficit acustico preesistente l'STS è ridotto e, a parità di soglia, non dipende dall'età del soggetto.

Per esposizioni costanti e prolungate la soglia uditiva peggiora rapidamente nei primi 10 anni, rallenta tra i 10 e i 30 anni e ri-peggiora in seguito sommandosi alla presbiacusia

# Danni uditivi da rumore 4

L'insorgere di un danno uditivo dipende quindi da vari fattori anche se il parametro fisico fondamentale è la quantità di energia sonora che raggiunge la coclea:

- Livello di rumore ( $L_p$ )
- Tempo di esposizione
- Suscettibilità individuale al trauma acustico
- Tipo di rumore (a livello costante, continuo, impulsivo, etc)

Osservazioni epidemiologiche (cioè statistiche) sono riportate nella norma ISO 1999 e sono sintetizzate nella relazione:

$$H' = H + N - \frac{HN}{120} \text{ dB}$$

Doev:  $H'$  = soglia uditiva del soggetto esposto,  $H$  = soglia uditiva corrispondente all'età,  $N$  = deficit uditivo dovuto al rumore

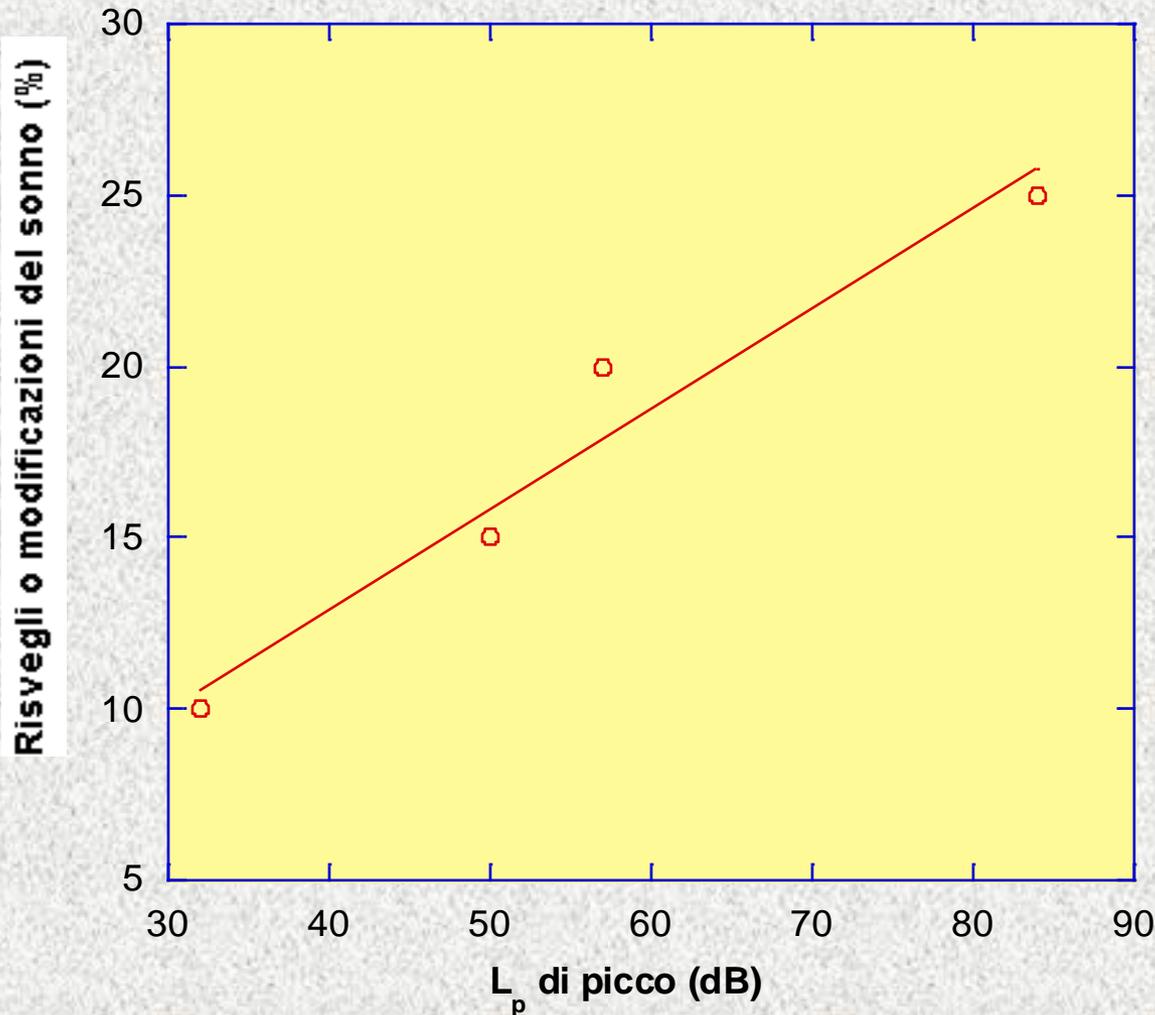
# Danni extrauditivi

L'apparato acustico, a differenza di altri apparati sensoriali, è sempre attivo e le improvvise variazioni di stimolazione acustica possono determinare danni anche gravi. La “*risposta di allarme*” (cioè ad un rumore improvviso ed inatteso) provoca: aumento della frequenza cardiaca e di respirazione, della pressione arteriosa, sudorazione, contrazione della muscolatura scheletrica, etc. La risposta di allarme dipende da molti fattori tra cui l'intensità del suono non è il più importante.

Il rumore provoca anche variazioni dell'attività neurovegetativa almeno per  $L_p > 70$  dB e sembra non ci sia meccanismo di adattamento quindi, anche in questo caso, l'esposizione prolungata aumenta la probabilità del danno.

L'OMS definisce la salute come “uno stato di completo benessere fisico, psichico e sociale”: il rumore altera lo stato di benessere e “disturba” psicologicamente prima ancora che fisicamente. Il rumore è uno Stressor ambientale non specifico. L'esposizione al rumore provoca aumento della vigilanza (*arousal*) con conseguente affaticamento, irritabilità ed alterazione della qualità del sonno.

# Rumore e sonno



Il rumore durante il sonno determina arousal con aumento dell'andrenalina. Ci sono però fortissime variazioni soggettive. Il giorno successivo si manifestano: perdite di vigilanza, brevi intervalli di sonno leggero. A lungo termine si hanno alterazioni dell'attenzione, della concentrazione e della memoria, apatia, irritabilità.

# La legislazione italiana

Definizioni (DPR n. 447, 26/10/95)

**Inquinamento acustico:** l'introduzione di rumore nell'ambiente abitativo o nell'ambiente esterno tale da provocare fastidio o disturbo al riposo e alle attività umane, pericolo per la salute umana, deterioramento degli ecosistemi, dei beni materiali, dei monumenti, dell'ambiente abitativo o dell'ambiente esterno o tale da interferire con le legittime fruizioni degli ambienti stessi (ESCLUSI I LUOGHI DI LAVORO)

**Valori limite di emissione:** valore max. di rumore emesso da una sorgente e misurato in prossimità della sorgente stessa.

**Valori limite di immissione:** valore max. di rumore emesso da una sorgente e misurato in prossimità dei ricettori. Si distingue tra **valori limite assoluti**, determinati con riferimento al livello equivalente di rumore ambientale e **valori limite differenziali**, con riferimento alla differenza tra il livello equivalente ambientale e il rumore residuo.

**Valori di attenzione:** limite che segnala la presenza di un rischio potenziale per la salute umana

**Valori di qualità:** valori di rumore da conseguire nel breve, nel medio e nel lungo periodo con le tecniche di risanamento disponibili.

# La "zonizzazione"

E' una competenza comunale

ALLEGATO

## Tabella A: classificazione del territorio comunale (art.1)

**CLASSE I - aree particolarmente protette:** rientrano in questa classe le aree nelle quali la quiete rappresenta un elemento di base per la loro utilizzazione: aree ospedaliere, scolastiche, aree destinate al riposo ed allo svago, aree residenziali rurali, aree di particolare interesse urbanistico, parchi pubblici, ecc.

**CLASSE II - aree destinate ad uso prevalentemente residenziale:** rientrano in questa classe le aree urbane interessate prevalentemente da traffico veicolare locale, con bassa densità di popolazione, con limitata presenza di attività commerciali ed assenza di attività industriali e artigianali

**CLASSE III - aree di tipo misto:** rientrano in questa classe le aree urbane interessate da traffico veicolare locale o di attraversamento, con media densità di popolazione, con presenza di attività commerciali, uffici, con limitata presenza di attività artigianali e con assenza di attività industriali; aree rurali interessate da attività che impiegano macchine operatrici

**CLASSE IV - aree di intensa attività umana:** rientrano in questa classe le aree urbane interessate da intenso traffico veicolare, con alta densità di popolazione, con elevata presenza di attività commerciali e uffici, con presenza di attività artigianali; le aree in prossimità di strade di grande comunicazione e di linee ferroviarie; le aree portuali, le aree con limitata presenza di piccole industrie.

**CLASSE V - aree prevalentemente industriali:** rientrano in questa classe le aree interessate da insediamenti industriali e con scarsità di abitazioni.

**CLASSE VI - aree esclusivamente industriali:** rientrano in questa classe le aree esclusivamente interessate da attività industriali e prive di insediamenti abitativi

# I limiti

**Tabella B: valori limite di emissione - Leq in dB(A) (art. 2)**

| classi di destinazione d'uso del territorio | tempi di riferimento |                        |
|---|----------------------|------------------------|
|   | diurno (06.00-22.00) | notturno (22.00-06.00) |
| I aree particolarmente protette             | 45                   | 35                     |
| II aree prevalentemente residenziali        | 50                   | 40                     |
| III aree di tipo misto                      | 55                   | 45                     |
| IV aree di intensa attività umana           | 60                   | 50                     |
| V aree prevalentemente industriali          | 65                   | 55                     |
| VI aree esclusivamente industriali          | 65                   | 65                     |

**Tabella C: valori limite assoluti di immissione - Leq in dB (A) (art.3)**

| classi di destinazione d'uso del territorio | tempi di riferimento |                        |
|---|----------------------|------------------------|
|   | diurno (06.00-22.00) | notturno (22.00-06.00) |
| I aree particolarmente protette             | 50                   | 40                     |
| II aree prevalentemente residenziali        | 55                   | 45                     |
| III aree di tipo misto                      | 60                   | 50                     |
| IV aree di intensa attività umana           | 65                   | 55                     |
| V aree prevalentemente industriali          | 70                   | 60                     |
| VI aree esclusivamente industriali          | 70                   | 70                     |

**Tabella D: valori di qualità - Leq in dB (A) (art.7)**

| classi di destinazione d'uso del territorio | tempi di riferimento |                        |
|---|----------------------|------------------------|
|   | diurno (06.00-22.00) | notturno (22.00-06.00) |
| I aree particolarmente protette             | 47                   | 37                     |
| II aree prevalentemente residenziali        | 52                   | 42                     |
| III aree di tipo misto                      | 57                   | 47                     |
| IV aree di intensa attività umana           | 62                   | 52                     |
| V aree prevalentemente industriali          | 67                   | 57                     |
| VI aree esclusivamente industriali          | 70                   | 70                     |

Sono espressi  
in  $L_p$  mediata  
sul tempo  
utilizzando la  
curva di  
ponderazione A

**Inoltre:** i valori limite di immissione sono 5 dB e 3 dB, rispettivamente per il periodo diurno e notturno e all'interno degli ambienti abitativi. Non si applicano se  $L_p < 50$  e 40 dB a finestre aperte o se  $L_p < 35$  e 25 dB a finestre chiuse, rispettivamente di giorno e di notte.

# Definizioni operative (DM 16/3/98)

## DEFINIZIONI

1. *Sorgente specifica*: sorgente sonora selettivamente identificabile che costituisce la causa del potenziale inquinamento acustico.

2. *Tempo a lungo termine ( $T_L$ )*: rappresenta un insieme sufficientemente ampio di  $T_R$  all'interno del quale si valutano i valori di attenzione. La durata di  $T_L$  è correlata alle variazioni dei fattori che influenzano la rumorosità di lungo periodo.

3. *Tempo di riferimento ( $T_R$ )*: rappresenta il periodo della giornata all'interno del quale si eseguono le misure. La durata della giornata è articolata in due tempi di riferimento: quello diurno compreso tra le h 6,00 e le h 22,00 e quello notturno compreso tra le h 22,00 e le h 6,00.

4. *Tempo di osservazione ( $T_O$ )*: è un periodo di tempo compreso in  $T_R$  nel quale si verificano le condizioni di rumorosità che si intendono valutare.

5. *Tempo di misura ( $T_M$ )*: all'interno di ciascun tempo di osservazione, si individuano uno o più tempi di misura ( $T_M$ ) di durata pari o minore del tempo di osservazione in funzione delle caratteristiche di variabilità del rumore ed in modo tale che la misura sia rappresentativa del fenomeno.

6. *Livelli dei valori efficaci di pressione sonora ponderata «A»*:  $L_{AS}$ ,  $L_{AF}$ ,  $L_{AI}$ . Esprimono i valori efficaci in media logaritmica mobile della pressione sonora ponderata «A»  $L_{PA}$  secondo le costanti di tempo «slow», «fast», «impulse».

7. *Livelli dei valori massimi di pressione sonora*  $L_{ASmax}$ ,  $L_{AFmax}$ ,  $L_{AImax}$ . Esprimono i valori massimi della pressione sonora ponderata in curva «A» e costanti di tempo «slow», «fast», «impulse».

Livello continuo equivalente di pressione sonora ponderata A:

$$L_{Aeq,T} = 10 \log \left[ \frac{1}{T} \int_T \frac{p_A^2}{p_0^2} dt \right] \text{ dB}$$

Livello continuo equivalente di pressione sonora ponderata A relativo al tempo a lungo termine  $T_L$ :

$$L_{Aeq,TL} = 10 \log \left[ \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N 10^{0.1(L_{Aeq,TR})} \right] \text{ dB}$$

Livello di rumore corretto:

$$L_c = L_a + K_i + K_t + K_b$$

Livello di rumore ambientale

Ciascuno 3 dB per la presenza di componenti Impulsive o Tonalì o a Bassa frequenza

# Esposizione al rumore dei lavoratori

Negli ambienti di lavoro sono accettati livelli di rumore più elevati: si definisce **Esposizione quotidiana personale di un lavoratore al rumore ( $L_{EP,d}$ )**:

$$L_{EP,d} = L_{Aeq,T_0} + 10 \log \frac{T_e}{T_0}$$

$$L_{Aeq,T_0} = 10 \log \left\{ \frac{1}{T_0} \int_1^{T_0} \left[ \frac{p_A(t)}{p_0} \right]^2 dt \right\}$$

$T_e$  = tempo quotidiano di lavoro

$T_0 = 8$  h

**Se la sorgente di rumore é sempre la stessa**

**Più in generale:** Esposizione giornaliera e settimanale professionale di un lavoratore al rumore ( $L_{EP,d}, L_{EP,w}$ ):

$$L_{EP,d} = 10 \log \left( \frac{1}{T_e} \sum_{i=1}^n 10^{0.1 L_i} \Delta t_i \right)$$

$$L_{EP,w} = 10 \log \left[ \frac{1}{5} \sum_{k=1}^m 10^{0.1 (L_{ep,d})_k} \right]$$

Se  $L_{EP,d}$  o  $L_{EP,w} > 80$  dB → informazione sui rischi

Se  $L_{EP,d}$  o  $L_{EP,w} > 85$  dB → mezzi di protezione individuale, controllo sanitario

# Misure acustiche

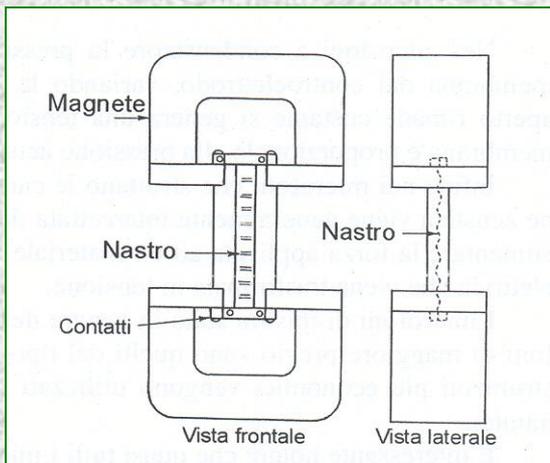
La grandezza fondamentale da misurare è la pressione sonora anche se in taluni casi interessano anche altre grandezze quali frequenza, l'intensità, la potenza o la densità di energia sonora.

Il trasduttore che misura la pressione acustica convertendola generalmente in una d.d.p. viene chiamato microfono. Si distinguono 3 diverse tecnologie:

**Microfoni magnetodinamici** → moto di un conduttore in un campo magnetico

**Microfoni a condensatore** → variazione di capacità

**Microfoni piezoelettrici** → fenomeni piezoelettrici



M. magnetodinamici: una bobina o un nastro metallico ripiegato è immerso nel campo  $B$  di due magneti permanenti: l'onda acustica causa oscillazioni  $\rightarrow \Delta\Phi_B \rightarrow f.e.m.$

Nei M. piezoelettrici l'onda sonora incide su una membrana che esercita una forza su un materiale piezoelettrico producendo una d.d.p.



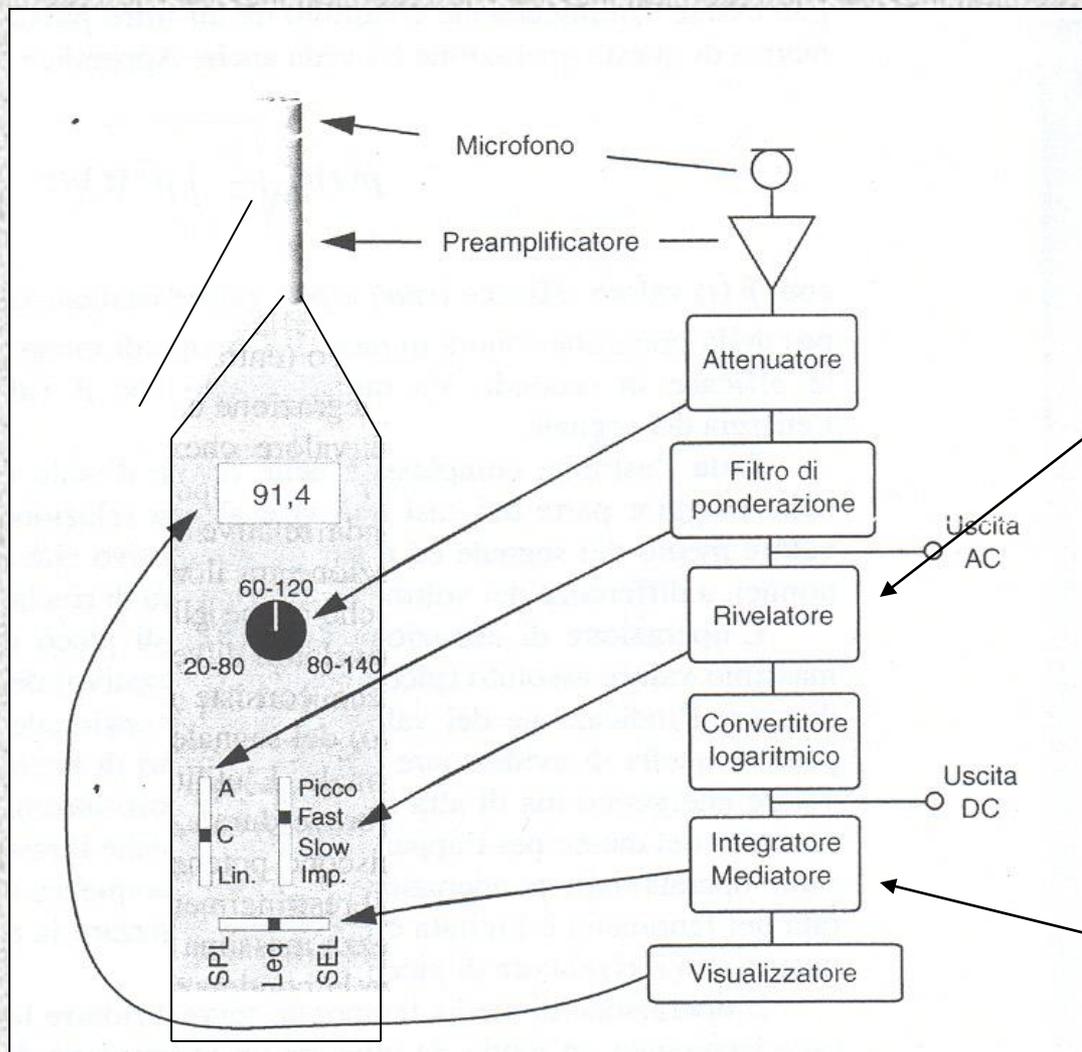
# Caratteristiche dei microfoni

- Sono trasduttori reciproci
- Sensibilità: mV/Pa ad una  $v$  di riferimento
- Rumore di fondo: mV o Pa equivalenti o dB del  $L_p$  equivalente
- Variazione della sensibilità con  $v$  (*risposta in  $v$* )
- Variazione della sensibilità con l'angolo di incidenza (*direttività*)
- $L_p$  massima misurabile ( $L_p \text{max}$ ) e/o sopportabile
- Campo dinamico:  $L_p \text{max}$  -  $L_p$  equivalente del rumore di fondi

Si distinguono anche due diverse situazione di misura:

- **In campo libero** : spazio aperto dove il fronte d'onda di una sorgente si propaga senza ostacoli e diventa piano quando  $d \gg \lambda$
- **In campo diffuso**: spazio chiuso in cui la riflessione dell'onda su diverse superfici crea in ogni punto un campo acustico omogeneo

# Struttura dei fonometri



Calcola il valore istantaneo integrando su un tempo breve per ridurre le fluttuazioni. La risposta, nel caso di  $p$  costante  $= p_i$  è:

$$p_m = p_i(1 - e^{-t/\tau})$$

Sono solitamente previste le costanti tempo Fast (125 ms) Slow (1 s) e Impulse (35 ms).

Calcola il valore efficace su un periodo di durata selezionabile dall'operatore

# Esercizi

Una persona lascia cadere un sasso in un pozzo profondo 8 m. Dopo quanto tempo si sente il tonfo?

In un punto di un locale vengono separatamente misurati i livelli di pressione sonora di due sorgenti:  $L_1 = 90$  dB e  $L_2 = 95$  dB. Trascurando eventuali effetti di interferenza, qual è la pressione sonora totale presente nello stesso punto?

Qual è il significato fisico della curva di ponderazione A in un fonometro?

Quale pressione sonora corrisponde, in aria, ad un'intensità sonora di  $10 \text{ W/m}^2$  ( $Z_{\text{aria}} = 400 \text{ Pa s/m}$ )?

In un punto di un locale vengono separatamente misurati i livelli di pressione sonora di tre sorgenti:  $L_1 = 40$  dB,  $L_2 = 22$  dB e  $L_3 = 15$  dB. Qual'è la pressione sonora totale presente nello stesso punto?

Per quale motivo si introducono le curve di ponderazione nei fonometri? Che differenza c'è tra la curva A e la curva C?

# Esercizi

Che relazione c'è tra curve isofoniche e curve di ponderazione nei fonometri? Come si definisce la sensazione sonora?

In un aeroporto il personale di terra in servizio presso le piste svolge turni di 6 ore. Durante il decollo degli aerei il livello di pressione sonora ponderata A è di 100 dB mentre negli altri momenti non supera i 60 dB. Se partono 40 voli per turno e il decollo dura 90 s, qual è il Livello di pressione sonora medio giornaliero a cui sono esposti i lavoratori?

Con un normale fonometro si misura il livello di pressione sonora utilizzando la curva di ponderazione A e senza applicare alcuna ponderazione. In entrambi i casi si ottiene  $L_p = 90$  dB. Cosa si può dedurre dal risultato della misura?

Un treno emette il suo fischio mentre si avvicina all'ingresso di una galleria sotto una montagna. La frequenza del fischio è 630 Hz e il treno viaggia ad una velocità di 24 m/s. Con quale frequenza viene udito il suono da una persona ferma all'ingresso del tunnel? La collina riflette il suono verso il macchinista: con che frequenza lo percepisce?

Un bimbo piange emettendo un suono di intensità pari a  $7 \cdot 10^{-6} \text{ W/m}^2$ : esprimere l'intensità in decibel. E se piangono due gemelli con la stessa intensità?