

# Rumore

- *Il fenomeno sonoro*
- *L'apparato uditivo*
- *La misura del rumore*
- *Effetti del rumore sulla salute (accenni)*

# Suoni e rumori

*I fenomeni sonori possono dividersi in due gruppi:*

- *suoni propriamente detti* ⇨ *fenomeni acustici gradevoli*
- *rumori* ⇨ *fenomeni acustici fastidiosi o pericolosi*

*Suoni e rumori sono prodotti dalle vibrazioni dei corpi (**sorgenti**) che si trasmettono ad un mezzo elastico e che possono essere rilevate da un ricevitore. Nel caso dell'orecchio la superficie ricevente è il timpano costituito essenzialmente da una membrana le cui vibrazioni vengono trasmesse al cervello che le traduce in "sensazione uditiva".*

*Tutti i corpi, solidi, liquidi o gassosi, possono trasmettere le vibrazioni sonore di una sorgente.*

*La velocità di trasmissione varia al variare della natura del mezzo.*

# Propagazione

Quando un suono si propaga, l'aria non subisce uno spostamento di insieme ma ogni sua molecola vibra intorno ad una sua posizione di equilibrio: da tali spostamenti derivano piccole variazioni di pressione rispetto alla pressione media (pressione atmosferica).

Esistono zone di sovrappressione e di depressione, cioè un moto ondulatorio con oscillazioni longitudinali che si trasmette convogliando energia dalla sorgente acustica alle superfici riceventi.

Velocità di propagazione del suono nell'aria a  $p=1 \text{ atm.}$  e  $t=20^\circ \text{C}$   $\Rightarrow 344 \text{ m/s}$

Acqua  $\Rightarrow 1500 \text{ m/s}$

Calcestruzzo  $\Rightarrow 3700 \text{ m/s}$

Acciaio  $\Rightarrow 5000 \text{ m/s}$

Sughero  $\Rightarrow 450 \text{ m/s}$

Mezzo liquido o solido  $\Rightarrow$  velocità costante

Mezzo gassoso  $\Rightarrow$  dipende dalle condizioni termodinamiche

# L'orecchio

## Esterno:

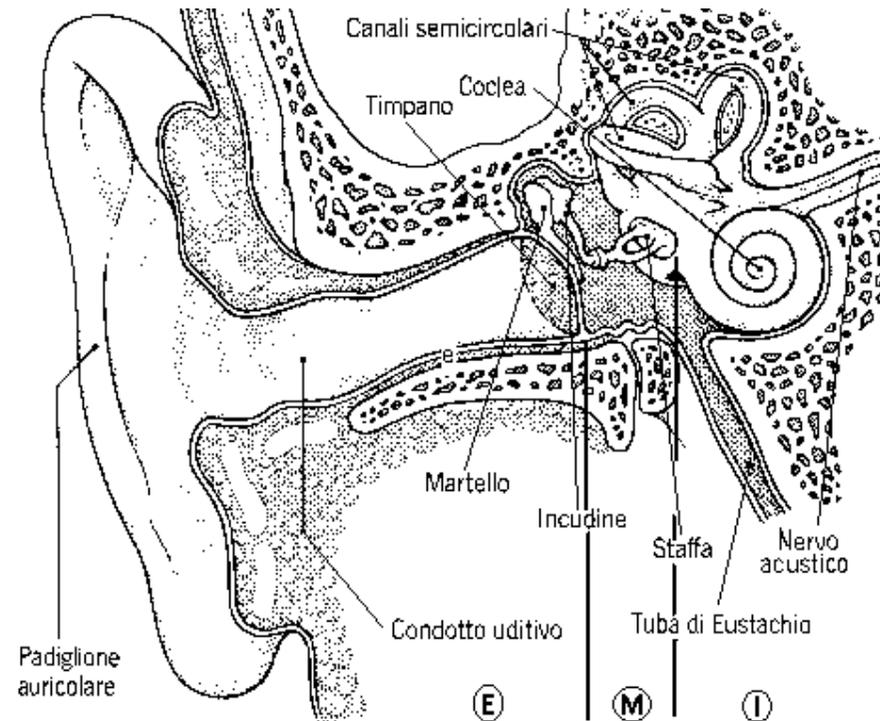
*Padiglione Auricolare e Condotto Uditivo*  
Convoglia le onde sonore sul timpano che le trasmette all'orecchio medio

## Medio:

*Martello, Incudine e Staffa*  
Trasmette le onde all'orecchio interno

## Interno:

*Coclea (o Chiocciola) che contiene un liquido che muove le Cellule Ciliate*  
Produce gli impulsi nervosi che vengono trasmessi al cervello

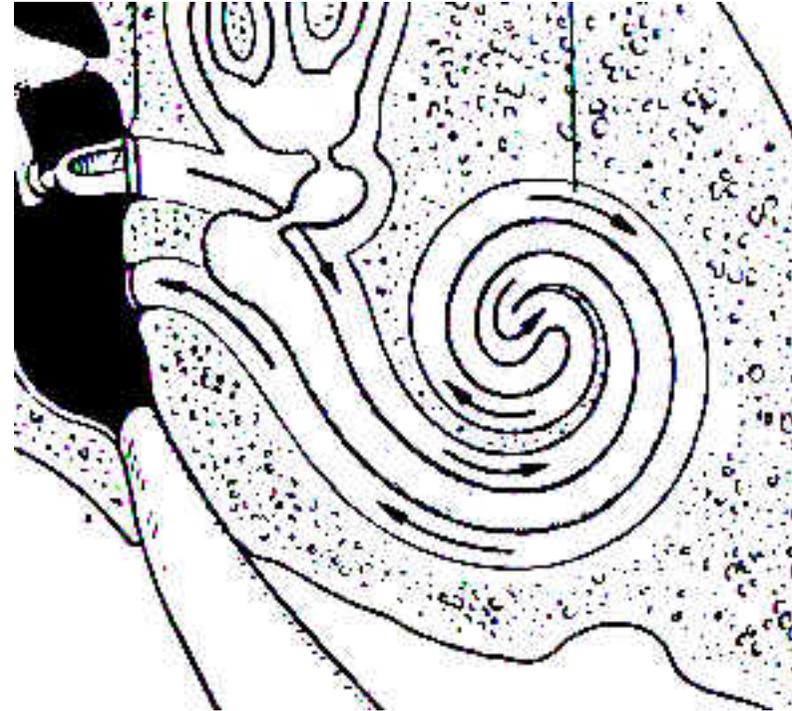


# Coclea (o chiocciola)

**Amplificazione x30:** il timpano ha un'estensione di superficie 30 volte maggiore di quella della finestra ovale

**Amplificazione x2:** meccanica delle leve (ossicini)

Il gradiente pressorio che così si forma induce la vibrazione della membrana basale che fa oscillare le ciglia delle cellule dell'organo del Corti.



Stimolo meccanico  $\Rightarrow$  apertura dei canali per il  $K^+$  che entra nelle cellule  $\Rightarrow$  depolarizzazione che induce un cambio di carica intracellulare  $\Rightarrow$  apertura canali per il  $Ca^{++}$   $\Rightarrow$  apertura delle vescicole contenenti neurotrasmettitori che vengono riversate per esocitosi all'esterno  $\Rightarrow$  stimolazione dell'VIII paio di nervi cranici

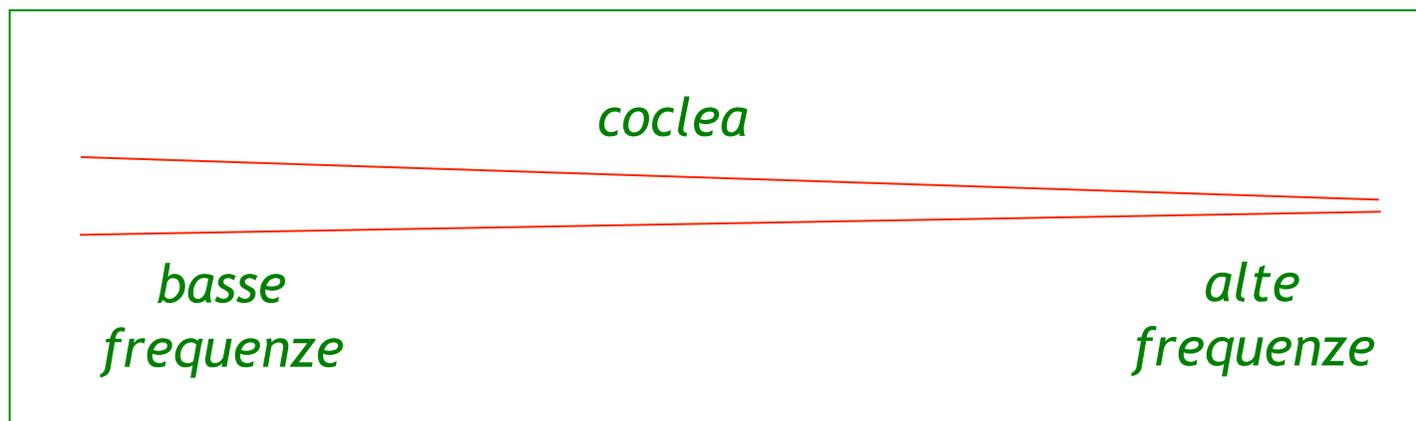
# Frequenza e lunghezza d'onda

**Infrasuoni:**  $\nu < 20$  Hz non udibili dall'orecchio umano

**Suoni:**  $20$  Hz  $< \nu < 20$  kHz

**Ultrasuoni:**  $\nu > 20$  kHz non udibili dall'orecchio umano

La sensibilità dell'orecchio umano dipende dalla frequenza del suono: più sensibile alle frequenze tra 2000 e 5000 Hz, molto meno nell'intervallo esterno.



# Intensità sonora (richiamo)

Ampiezza dell'onda sonora:  $P$ =pressione ( $N/m^2$ )

Intensità dell'onda sonora:  $I = P^2 / (\rho v)$  ( $W/m^2$ )

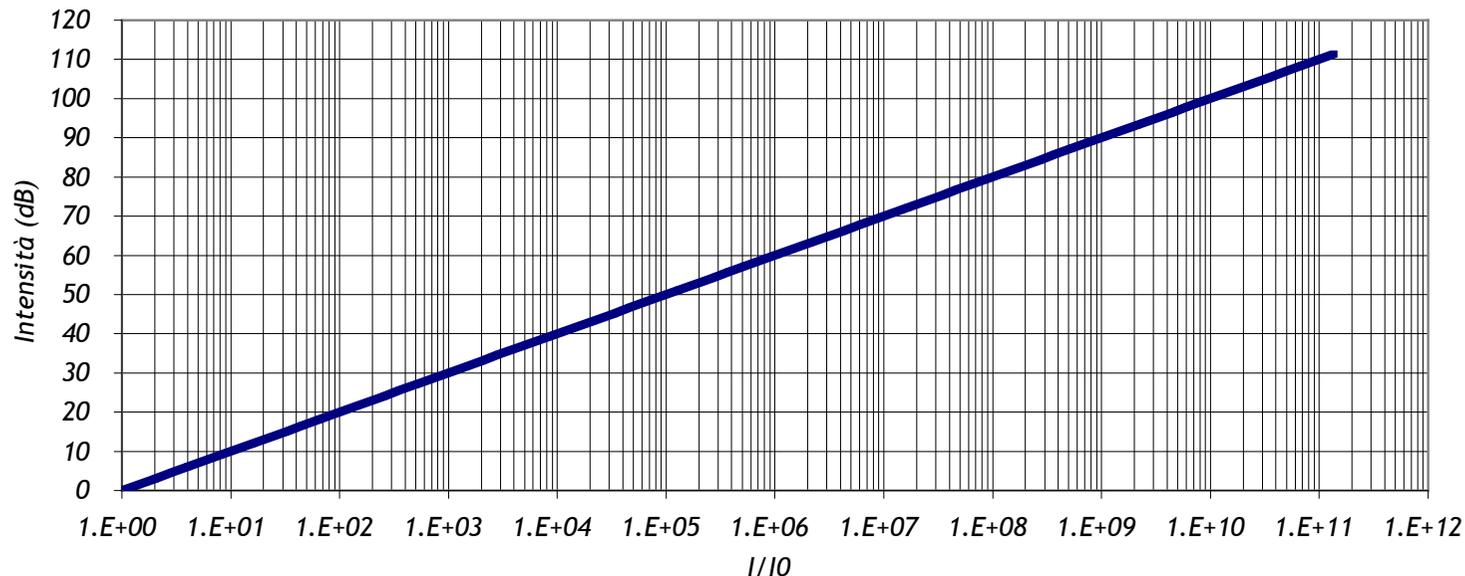
Densità del mezzo

Velocità dell'onda

Unità di intensità sonora: *bel*  $\Rightarrow IL = \log_{10}(I/I_0)$  [ $I_0 = 10^{-12} W/m^2$ ]

Intensity Level

Unità pratica: *decibel*  $\Rightarrow IL = 10 \log_{10}(I/I_0)$  [ $I_0 = 10^{-12} W/m^2$ ]



$I/I_0$	IL
1	0
2	3
4	6
8	9
16	12
32	15
64	18
128	21
256	24
512	27
1024	30
2048	33
4096	36
8192	39
16384	42
32768	45
65536	48
131072	51
262144	54
524288	57
1048576	60
2097152	63
4194304	66
8388608	69
16777216	72
33554432	75
67108864	78
134217728	81
268435456	84
536870912	87
1073741824	90
2147483648	93
4294967296	96
8589934592	99
17179869184	102
34359738368	105
68719476736	108
137438953472	X14 7

# Esempio

*Motori d'aereo, ciascuno da 80 dB.*

*1 motore: 80 dB*

$$[10\log_{10}(I/I_0)]$$

*2 motori: 83 dB*

$$[10\log_{10}(2I/I_0) = 10\log_{10}(I/I_0) + 10\log_{10}2]$$

*3 motori: 84.8 dB*

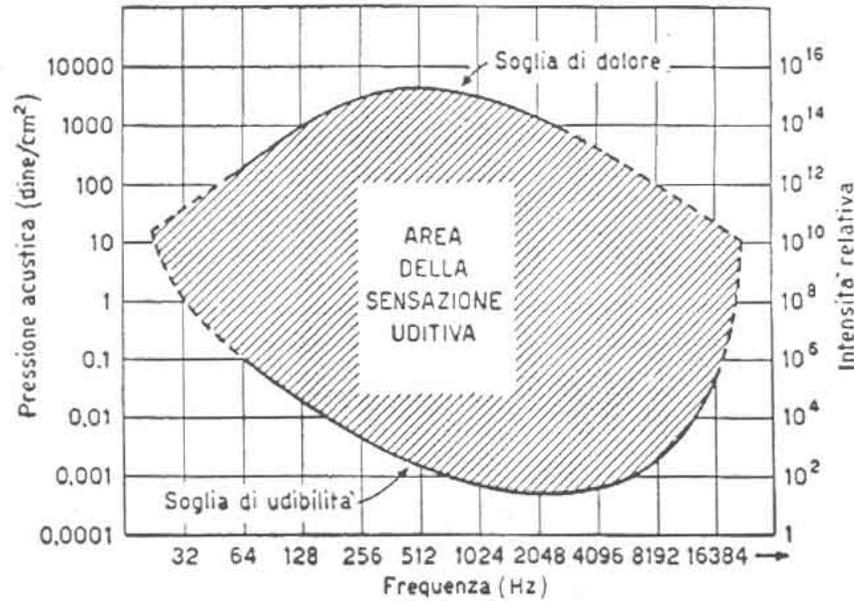
$$[10\log_{10}(3I/I_0)]$$

*4 motori: 86 dB*

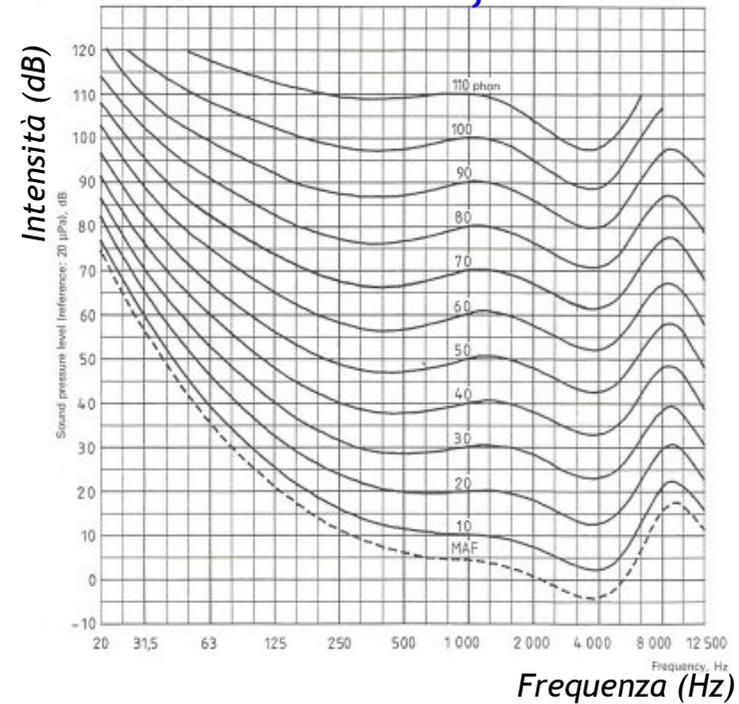
$$[10\log_{10}(4I/I_0)]$$


$$=0.30103$$

# Soglie



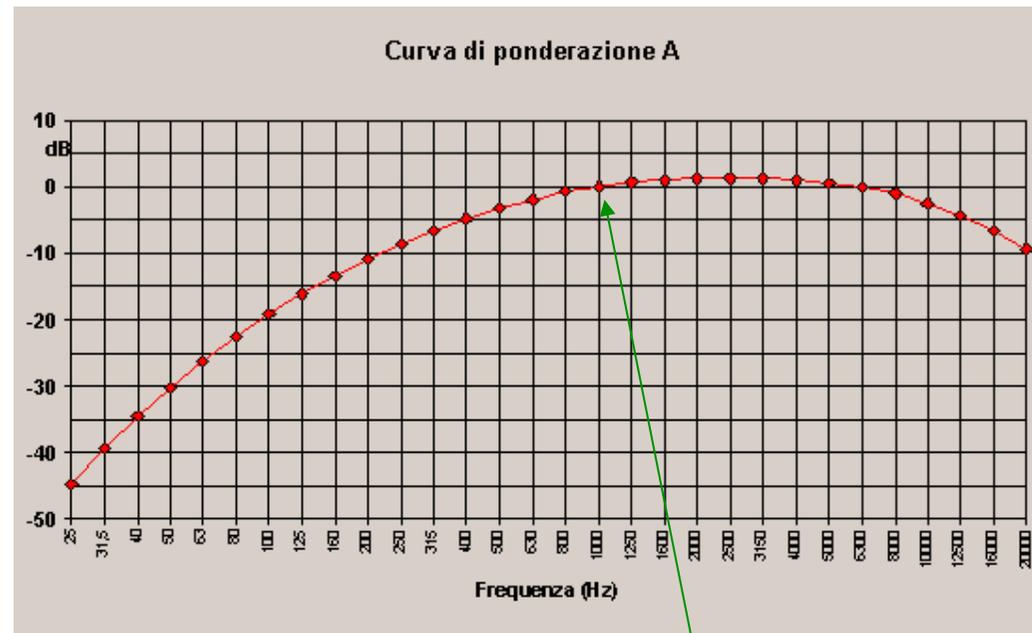
Curve medie isofoniche



Nota: *phon* = livello di intensit  sonora in decibel del tono di riferimento a 1000 Hz

## Curva di ponderazione A

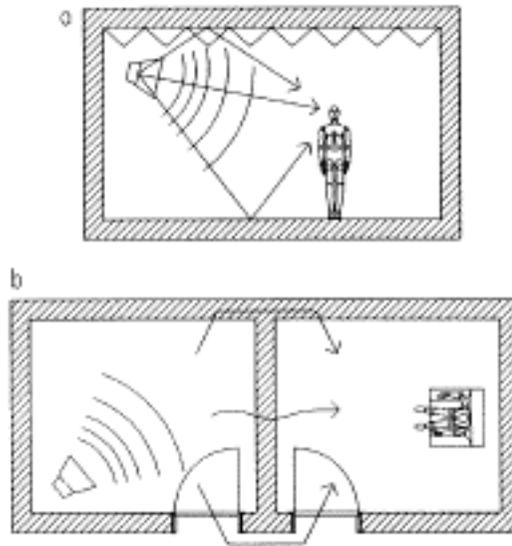
Un suono di 20 dB risulterà al di sotto della soglia di udibilità se emesso a 100 Hz, mentre risulterà udibile se emesso a 2500 Hz. La misura dell'intensità viene quindi ponderata secondo una scala che tiene conto della diversa risposta del nostro orecchio (curva di ponderazione A) e i rilievi così effettuati vengono indicati con il simbolo dB(A).



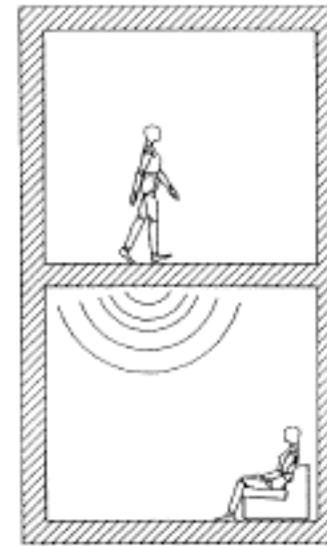
=0 a 1000 Hz  
per convenzione

La curva di ponderazione A corrisponde alla curva media isofonica a 40 phon (v. pagina precedente).  
Altre curve di ponderazione (B e C) vengono usate (raramente) nel caso di rumori molto più intensi.

# Propagazione del rumore

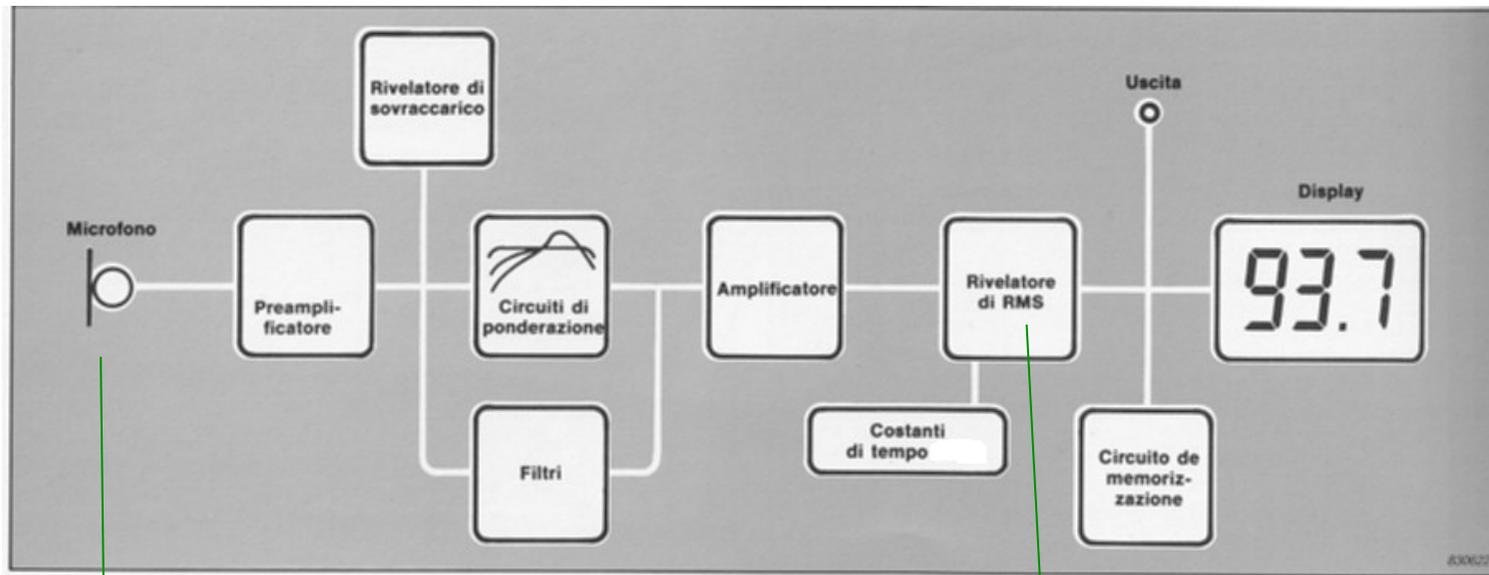


*via aerea*



*via strutturale*

## Misuratori di rumore (fonometri) - principi di funzionamento

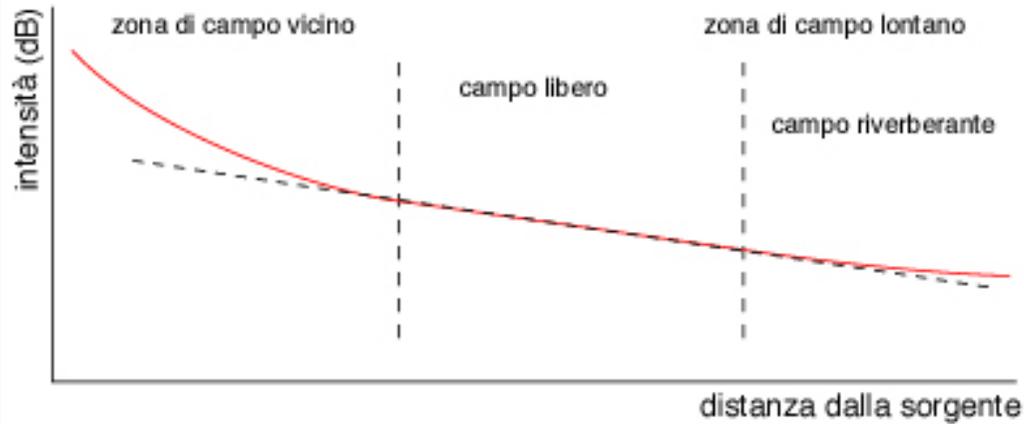
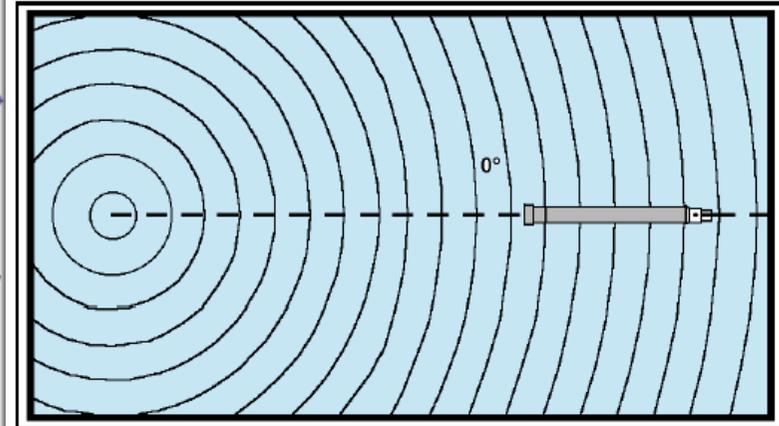
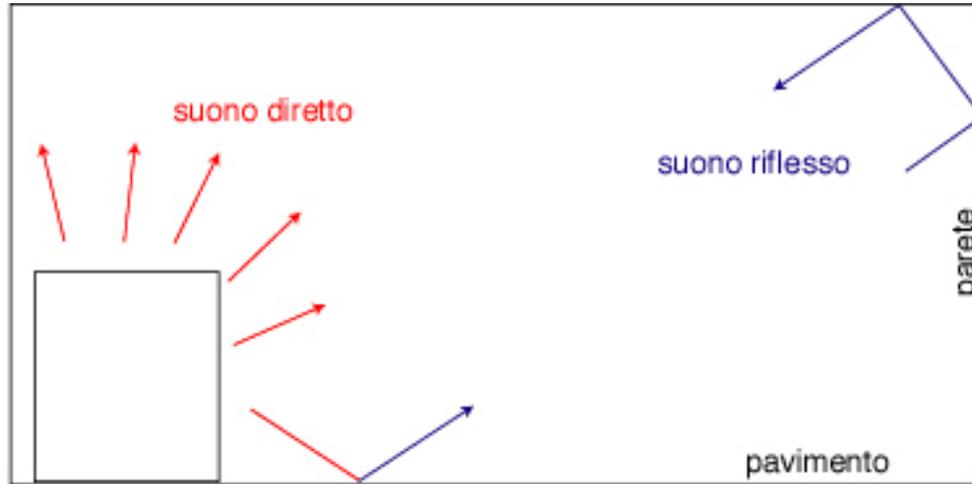


Microfono (convertitore elettromeccanico): trasforma la vibrazione di una membrana in un segnale elettrico oscillante.

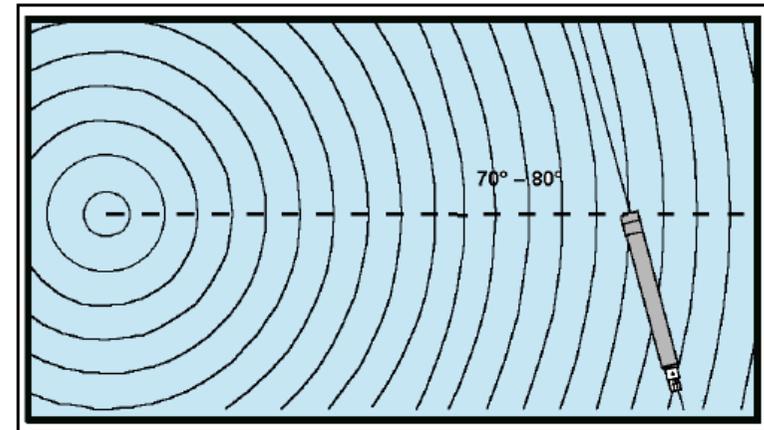
RMS: scarto quadratico medio

# Misura del rumore

Microfono per campo libero - posizione



Microfono ad incidenza casuale - posizione



## Fonometri



*Fonometro integratore in classe 1. Lo strumento è in grado di misurare il livello equivalente in dB(A) (Larson&davis)*



*Fonometro analizzatore integratore in classe 1. Lo strumento è in grado di eseguire l'analisi in frequenza parallela in banda di ottava (16 Hz - 16 KHz) (Larson&davis)*

# Serie di Fourier

Ogni funzione  $f(\theta(\tau))=f(\omega t)$ , definita e periodica in intervalli  $\Delta\theta=2\pi$  e avente al più un numero finito di discontinuità in ognuno di questi intervalli, può essere rappresentata per mezzo di una serie infinita di funzioni trigonometriche:

$$f(\vartheta) = a_0 + \sum_{n=1}^{\infty} (a_n \cos n\vartheta + b_n \sin n\vartheta)$$

con:

$$a_0 = \frac{1}{2\pi} \int_0^{2\pi} f(\vartheta) d\vartheta$$

$$a_n = \frac{1}{\pi} \int_0^{2\pi} f(\vartheta) \sin m\vartheta d\vartheta \quad (n \neq 0)$$

$$b_n = \frac{1}{\pi} \int_0^{2\pi} f(\vartheta) \cos m\vartheta d\vartheta \quad (n \neq 0)$$

# Esempio: onda quadra

$$f(\vartheta) = +a \quad 0 \leq \vartheta < \pi$$

$$f(\vartheta) = -a \quad \pi \leq \vartheta < 2\pi$$

$$a_0 = \frac{1}{2\pi} \int_0^{2\pi} f(\vartheta) d\vartheta = \frac{1}{2\pi} \int_0^{\pi} a d\vartheta + \frac{1}{2\pi} \int_{\pi}^{2\pi} -a d\vartheta = 0$$

$$a_1 = \frac{1}{\pi} \int_0^{2\pi} f(\vartheta) \sin \vartheta d\vartheta = \frac{1}{\pi} \int_0^{\pi} a \sin \vartheta d\vartheta + \frac{1}{\pi} \int_{\pi}^{2\pi} -a \sin \vartheta d\vartheta = \frac{a}{\pi} ([-\cos \vartheta]_0^{\pi} - [-\cos \vartheta]_{\pi}^{2\pi}) = \frac{4a}{\pi}$$

$$a_2 = \frac{1}{\pi} \int_0^{2\pi} f(\vartheta) \sin(2\vartheta) d\vartheta = \frac{1}{\pi} \int_0^{\pi} a \sin(2\vartheta) d\vartheta + \frac{1}{\pi} \int_{\pi}^{2\pi} -a \sin(2\vartheta) d\vartheta = \frac{a}{\pi} ([-\cos(2\vartheta)]_0^{\pi} - [-\cos(2\vartheta)]_{\pi}^{2\pi}) = 0$$

...

...

...

$$n \text{ dispari : } a_n = \frac{4a}{n\pi}; \quad n \text{ pari : } a_n = 0$$

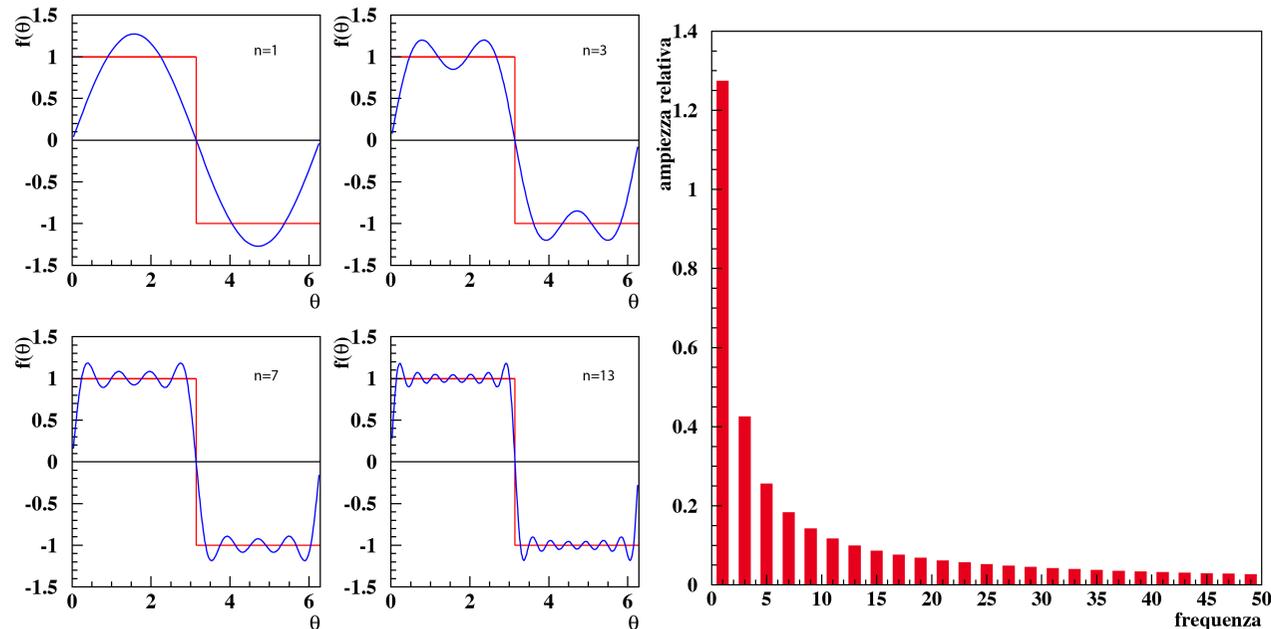
$$b_1 = \frac{1}{\pi} \int_0^{2\pi} f(\vartheta) \cos \vartheta d\vartheta = \frac{1}{\pi} \int_0^{\pi} a \cos \vartheta d\vartheta + \frac{1}{\pi} \int_{\pi}^{2\pi} -a \cos \vartheta d\vartheta = \frac{a}{\pi} ([\sin \vartheta]_0^{\pi} - [\sin \vartheta]_{\pi}^{2\pi}) = 0$$

...

...

...

$$b_n = 0$$



# Analisi di Fourier per funzioni non periodiche

Per  $f(t)$  non periodica:

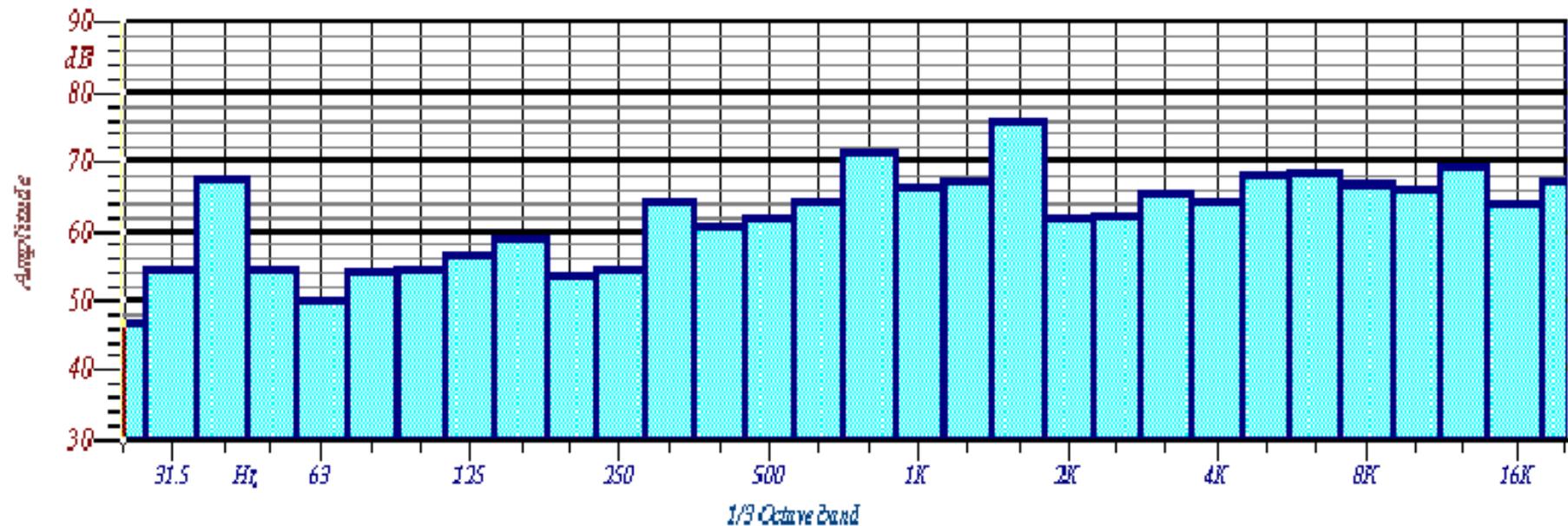
$$f(t) = \int_0^{\infty} [a(\omega) \sin(\omega t) + b(\omega) \cos(\omega t)] d\omega$$

con:

$$a(\omega) = \frac{1}{\pi} \int_{-\infty}^{+\infty} f(t) \sin(\omega t) dt$$

$$b(\omega) = \frac{1}{\pi} \int_{-\infty}^{+\infty} f(t) \cos(\omega t) dt$$

# Analisi in frequenza



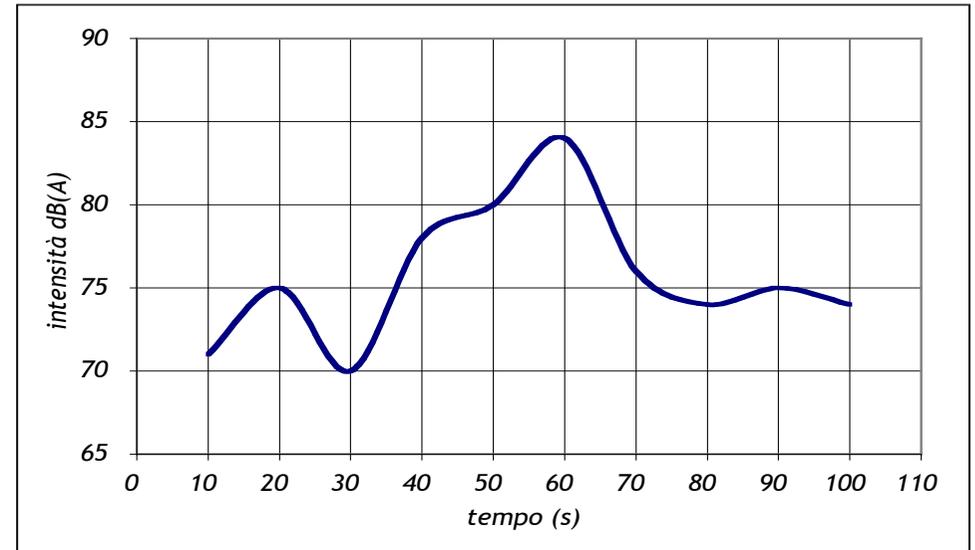
*Analisi in frequenza in banda di 1/3 di ottava eseguita per mezzo di un analizzatore in tempo reale e rappresentata per mezzo di un programma dedicato.*

## Rumori variabili nel tempo

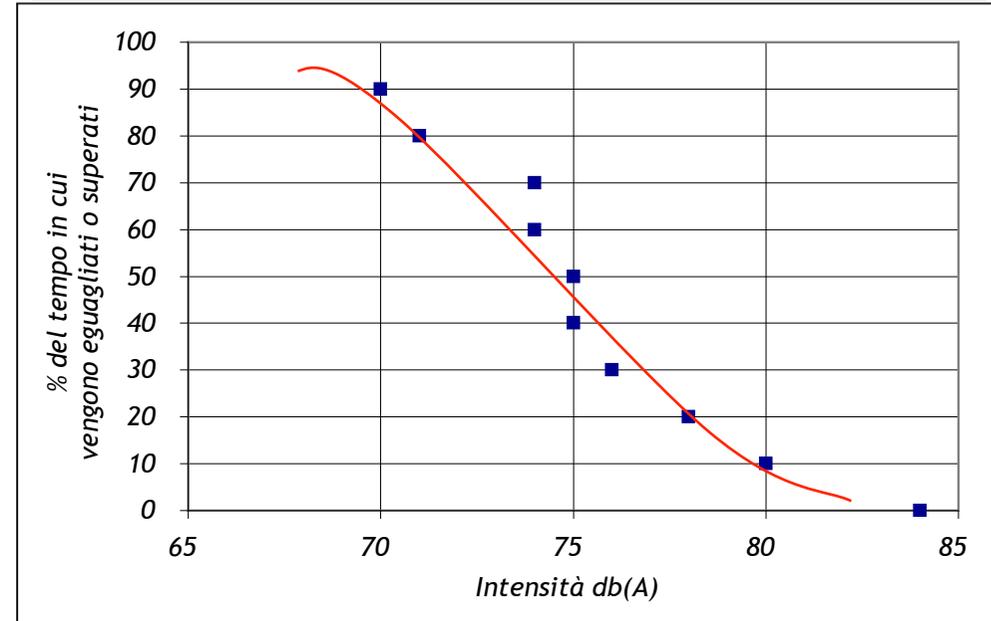
$$L_{10} = 80 \text{ dB(A)}$$



per il 10% del tempo il rumore è maggiore di 80 db, usando la curva di ponderazione A.



istante di misura (s)	dB(A)	dB(A) (ordinati)	% del tempo in cui vengono eguagliati o superati
10	71	70	90
20	75	71	80
30	70	74	70
40	78	74	60
50	80	75	50
60	84	75	40
70	76	76	30
80	74	78	20
90	75	80	10
100	74	84	0



## *Rumori variabili nel tempo: livello equivalente*

*$L_{eq,T}$  = livello di pressione sonora di un rumore continuo e costante avente la stessa energia sonora del rumore in esame nello stesso intervallo di tempo  $T$*

$$L_{eq,T} = 10 \log \left[ \frac{1}{T} \int_0^T \left( \frac{P(t)}{P_0} \right)^2 dt \right]$$

*Si indica con  $LA_{eq,T}$  se è pesato con la curva di ponderazione A.*

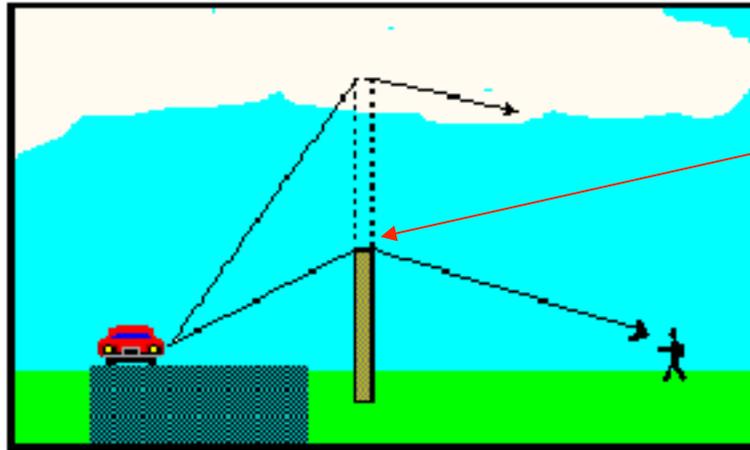
## *Noise Pollution Level (Livello di inquinamento acustico)*

$$\text{NPL in dB(A)} = L_{50} + (L_{10} - L_{90}) + \frac{(L_{10} - L_{90})^2}{60}$$

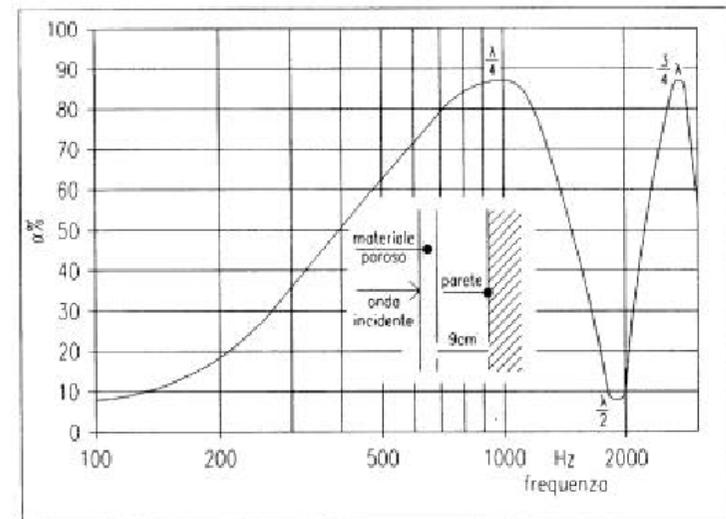
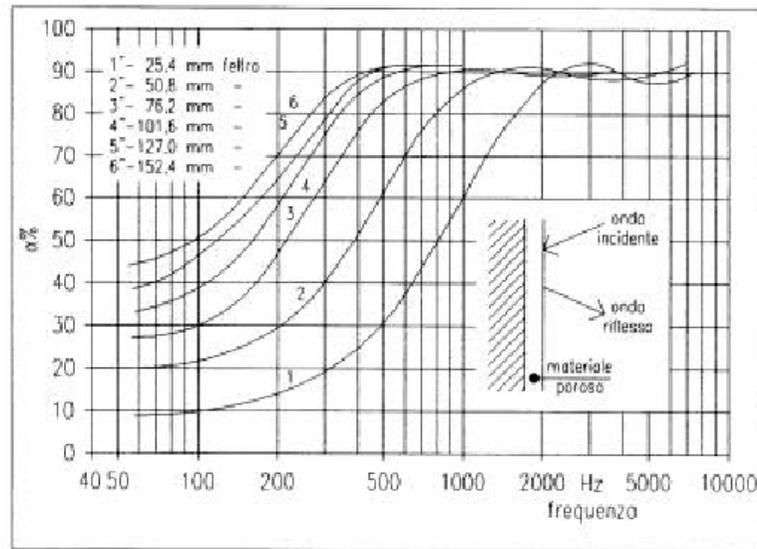
*Nell'esempio precedente:*

$$\text{NPL} = 75 + (80 - 70) + (80 - 70)^2 / 60 = 86.7 \text{ dB(A)}$$

# Schermi e assorbitori

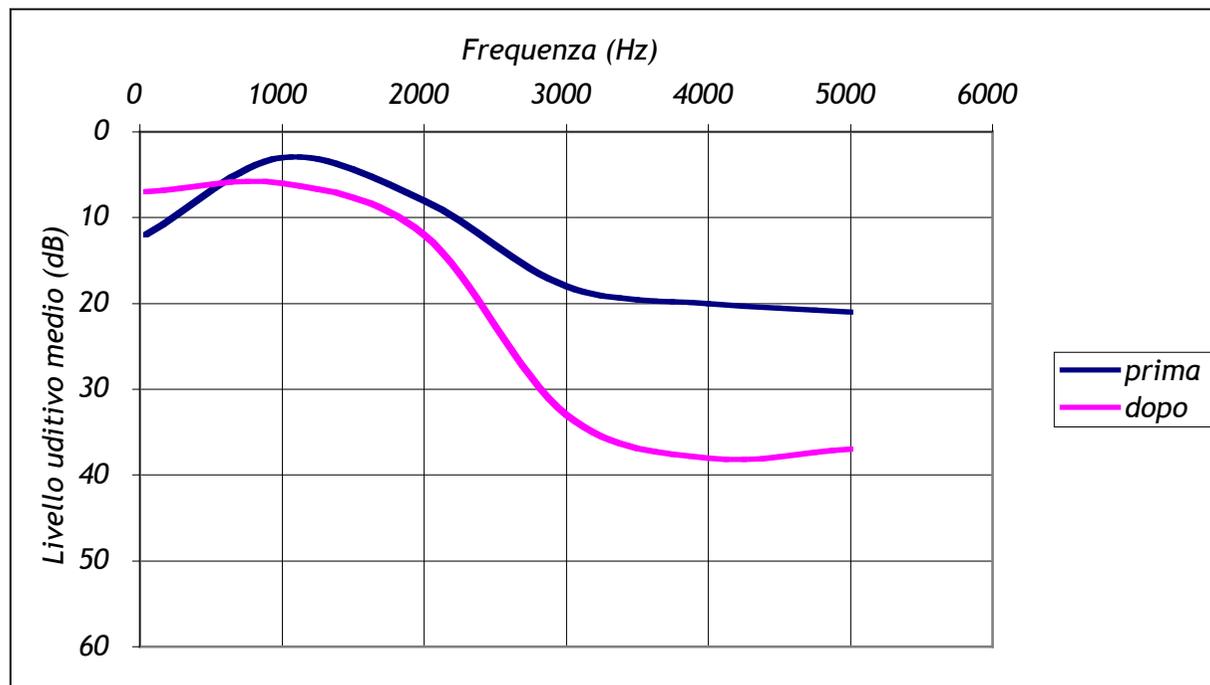


Onde secondarie generate secondo il principio di Huygens



# Danni da rumore

L'esposizione al rumore eccessivo può provocare danni ad uno o più dei componenti dell'orecchio (rottura del timpano, usura delle articolazioni degli ossicini, usura o rottura delle cellule ciliate) ⇒ **spostamento permanente della soglia uditiva**



**Membri di una banda rock: spostamento temporaneo della soglia prima e dopo un concerto.**