



# Sicurezza degli impianti Industriali

## FISICA DEL RUMORE

## CARATTERISTICHE DEL SUONO

- è originato da un corpo solido, liquido o gassoso che vibra  $\Rightarrow$  **sorgente sonora**
- le vibrazioni si trasmettono al mezzo circostante sotto forma di piccole variazioni di pressione statica intorno alle condizioni di riposo  $\Rightarrow$  **onde sonore**
- l'orecchio è un **trasduttore di pressione sonora**: le variazioni di pressione mettono in vibrazione la membrana del timpano che tramite un sistema meccanico e di fibre nervose invia segnali al cervello dando origine alla sensazione uditiva

**rumore:** sono possibili varie definizioni:

- suono non desiderato e disturbante (def. fisiopatologica)
- somma di oscillazioni irregolari, intermittenti o statisticamente casuali (ANSI S 1.1)
- segnale con connotazioni di allarme
- segnale semanticamente indifferenziato e non utile a trasmettere informazioni accettabili

**rumore ambientale:** è un insieme di suoni che appaiono provenire da più direzioni a seguito di riflessioni e rifrazioni

## MODALITÀ DI EMISSIONE DEL RUMORE

### **ISO S 2204:**

- continuo o discontinuo (intervallato da pause apprezzabili)
- stazionario o fluttuante (con oscillazioni rapide del livello di pressione sonora superiori a  $\pm 1$  dB)
- aleatorio (se presenta completa irregolarità dei tempi e dei livelli di emissione)

**IEC 179:** impulsivo (con massimi di pressione sonora di durata compresa fra 1 ms e 1 s)

**ISO R 1999:** impulsivo quasi stazionario (una serie di rumori impulsivi che si succedono ad intervalli minori di 0,2 s)

# PROPRIETÀ FISICHE

**frequenza f:** [Hz] numero di vibrazioni complete nell'unità di tempo ( $\omega = 2\pi f$ )

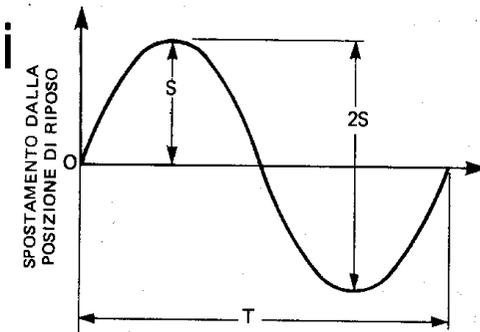
**periodo T:** [s]  $T = 1/f$

**velocità di propagazione c:** [m/s]  
dipende dalla natura del mezzo e dalla temperatura

$$c = \sqrt{\frac{c_p}{c_v} \frac{p_a}{\gamma}} \quad \text{con} \quad p_a = \text{pressione atmosferica}$$

$$\gamma = \text{peso dell'unità di volume d'aria}$$

$$c = 20\sqrt{T} \approx 331 + 0,6t \quad [\text{m/s}] \quad \text{considerando l'aria un gas perfetto}$$



S = spostamento massimo o ampiezza;  
T = durata di un ciclo in secondi;  
f = 1/T = frequenza = numero di cicli al secondo.

Materiale	Velocità (m/s)
Alluminio	5.820
Calcestruzzo	3.700
Acciaio	4.900
Rame	4.500
Vetro	5.000
Piombo	1.260
Stagno	4.900
Acqua pura	1.440
Acqua di mare	1.500
Benzina	1.150
Zinco	3.750
Ammoniaca	415
Anidride carbonica	260
Idrogeno	1.270
Vapore (100°C)	405
Aria a 0°C	331
Aria a 20°	343

**lunghezza d'onda  $\lambda$** : è la distanza percorsa nell'atmosfera da un'onda in un periodo  $T$

$$\lambda = cT = \frac{c}{f}$$

**potenza sonora di una sorgente  $W$** : [W] è l'energia sonora totale irradiata dalla sorgente nell'unità di tempo

Sorgente	Potenza sonora	Livello di potenza sonora
Jet	10 kW	160 dB
Martello pneumatico	1W	120 dB
Automobile a 80 km/h	0,1 W	110 dB
Pianoforte	20 mW	103 dB
Conversazione normale	20 $\mu$ W	73 dB
Bisbiglio	0,001 $\mu$ W	30 dB

## PROPRIETÀ FISICHE cnt.

**intensità sonora I:** è l'energia sonora che attraversa l'unità di superficie nell'unità di tempo

$$I = \frac{dW}{dS}$$

per una sorgente che irradia uniformemente su una sfera

$$I = \frac{W}{S} = \frac{W}{4\pi r^2} \quad \left[ \frac{W}{m^2} \right]$$

per una sorgente sul suolo (semisfera)

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

per una sorgente lineare

$$I = \frac{W_u}{2\pi r}$$

per una sorgente lineare sul suolo (semicilindro)

$$I = \frac{W_u}{\pi r}$$

**pressione sonora  $p$  in un punto:** è la variazione di pressione indotta dalla sorgente sonora in un punto e rappresenta la differenza fra la pressione totale istantanea e la pressione statica [N/m<sup>2</sup>]

in un campo di onde sferiche  $I = \frac{p^2}{\gamma c}$   $p_{RMS} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n p_i^2}{n}}$  valore efficace

dove  $\gamma c \gg 410$  kg/m<sup>2</sup>s a 20°C è detta impedenza acustica del mezzo

se la propagazione è uniforme in tutte le direzioni  $W = \frac{4\pi r^2 p^2}{\gamma c}$

e analogamente per semisfere, cilindri, emicilindri

$$W = \frac{2\pi r^2 p^2}{\gamma c} \quad W = \frac{2\pi r p^2}{\gamma c} \quad W = \frac{\pi p^2}{\gamma c}$$

**fattore di direttività  $Q_\theta$  :**

$$Q_\theta = \frac{p_\theta^2}{p_m^2}$$

essendo:

- $p_\theta$  la pressione sonora in direzione  $\theta$
- $p_m$  la pressione sonora di una sorgente puntiforme di pari potenza sonora

per cui per una emissione sferica uniforme

$$p_\theta = \sqrt{\frac{\gamma c Q_\theta W}{4\pi r^2}}$$

## PROPRIETÀ FISICHE cnt.

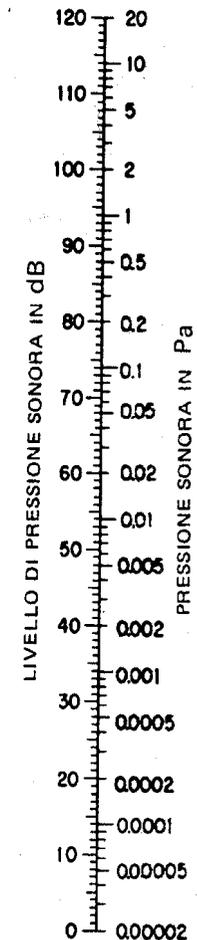
**livello di pressione sonora  $L_p$ :** unità di misura è il decibel [dB]

$$L_p = 10 \log \frac{p^2}{p_0^2} = 20 \log \frac{p}{p_0} \quad \text{con } p_0 = 2 \cdot 10^{-5} \text{ Pascal}$$

$p_0$  è la soglia media di udibilità di una persona giovane audiologicamente sana a 1000 Hz

ad un raddoppio di pressione sonora corrisponde un aumento di 6 dB

Sorgente	$L_p$ [dB]
Pressa idraulica, a 1 m	140
Clacson di automobile, a 1 m	120
Tornio automatico, a 1 m	100
Conversazione, a 1 m	70
Uffici con macchine contabili	80
Officina meccanica	90



**livello di potenza sonora  $L_W$ : [dB]**

$$L_W = 10 \log \frac{W}{W_0} \quad \text{con } W_0 = 10^{-12} \text{ W}$$

**livello di intensità sonora  $L_I$ : [dB]**

$$L_I = 10 \log \frac{I}{I_0} \quad \text{con } I_0 = 10^{-12} \text{ W/m}^2$$

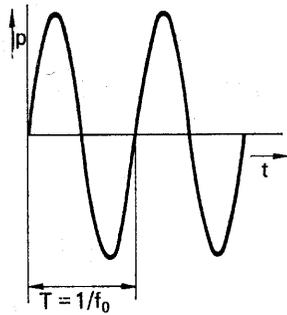
combinando le relazioni viste

$$L_I = 10 \log \frac{I}{I_0} = 10 \log \frac{p^2}{\gamma c I_0} = 10 \log \frac{p^2}{p_0^2} + 10 \log \frac{p_0^2}{\gamma c I_0}$$

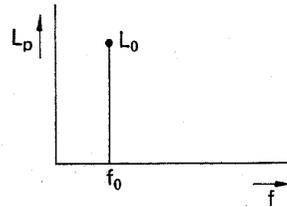
$$L_I = L_p + 10 \log K \quad \text{ovvero} \quad L_p = L_I - 10 \log K \quad \text{con} \quad K = \frac{\gamma c}{400}$$

# SPETTRI SONORI

SINUSOIDALE



spettri di frequenza



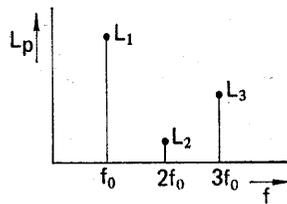
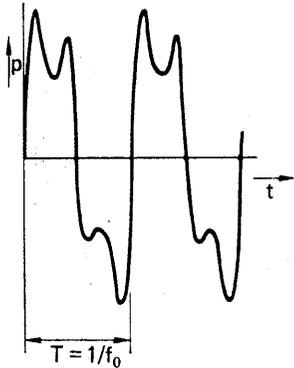
suono puro

bande di frequenza:

- **ottava**

$$f_m = \sqrt{f_1 \cdot f_2} \quad \text{con } f_2 = 2 \cdot f_1 \Rightarrow f_2 = \sqrt{2} \cdot f_m \quad \text{e } f_1 = \frac{f_m}{\sqrt{2}}$$

PERIODICA (NON SINUSOIDALE)

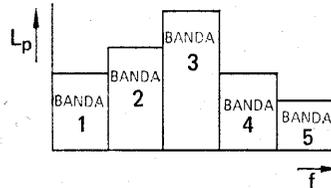
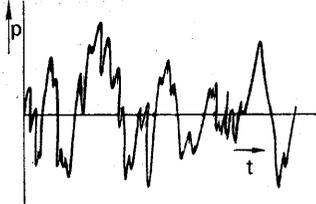


suono composto

- **terzi d'ottava**

$$f_m = \sqrt{f_1 \cdot f_2} \quad \text{con } f_2 = \sqrt[3]{2} \cdot f_1 \Rightarrow f_2 = \sqrt[6]{2} \cdot f_m \quad \text{e } f_1 = \frac{f_m}{\sqrt[6]{2}}$$

NON PERIODICA



suono continuo

- **banda stretta**  
con larghezza di banda costante 3, 10 o 50 Hz

**campo libero o diretto:** è un mezzo omogeneo, isotropico, privo di ostacoli o barriere (oppure con effetto trascurabile di ostacoli perché di dimensione molto inferiori alla lunghezza d'onda del suono)

- lo spazio o l'ambiente esterno
- locale molto grande in prossimità della sorgente sonora
- camera anecoica (con pareti, soffitto e pavimento completamente assorbenti)

**campo vicino:** le immediate vicinanze di una sorgente sonora distribuita (distanza minore di 2-3 volte la dimensione della sorgente)

**campo diffuso o riverberante:** ambiente chiuso con pareti non totalmente assorbenti

dalle relazioni note:

$$I = \frac{W}{4\pi r^2} \text{ e } I = \frac{p^2}{\gamma c} \Rightarrow p^2 \cdot r^2 = \frac{W\gamma c}{4\pi}$$

$$p_2 = p_1 \cdot \frac{r_1}{r_2} \text{ e generalizzando } p = p_0 \cdot \frac{r_0}{r} = \frac{k}{r}$$

$$L_2 = 20 \log \frac{p_2}{2 \cdot 10^{-5}} = \frac{p_1 r_1}{2 \cdot 10^{-5} r_2} \Rightarrow L_1 - L_2 = 20 \log \frac{r_2}{r_1}$$

**divergenza (6dB in meno ad ogni raddoppio della distanza)**

$$L_p = L_0 - 20 \log \frac{r}{r_0}$$

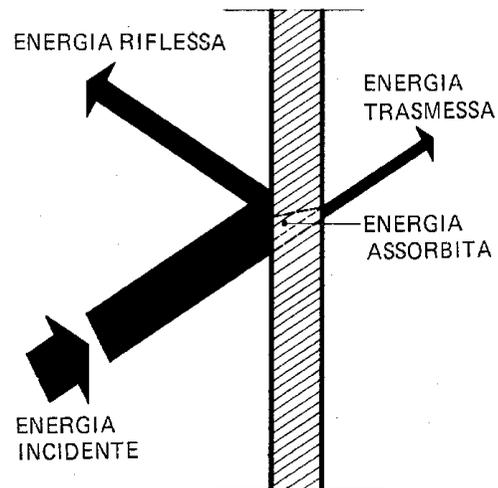
$$\begin{aligned} W &= \frac{4\pi r^2 p^2}{\gamma c}; L_p = 10 \log \frac{p^2}{p_0^2}; L_W = 10 \log \frac{W}{W_0} \\ L_p &= 10 \log \frac{W\gamma c}{4\pi r^2 p_0^2} = 10 \log \frac{W}{W_0} + 10 \log \frac{W_0 \gamma c}{4\pi r^2 p_0^2} = \\ &= L_W - 10 \log 4\pi - 10 \log \frac{r^2}{r_0^2} - 10 \log \frac{p_0^2 r_0^2}{W_0 \gamma c} \\ &\text{posto } r_0 = 1\text{m} \end{aligned}$$

$$\Rightarrow L_p = L_W - 20 \log \frac{r}{r_0} - 10 \log 4\pi - 10 \log \frac{\gamma c}{400}$$

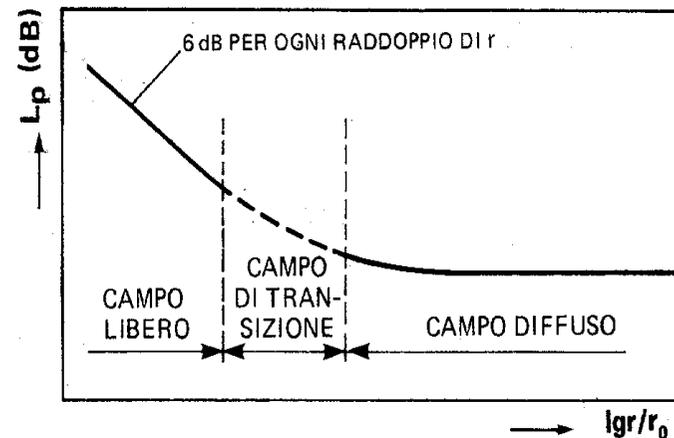
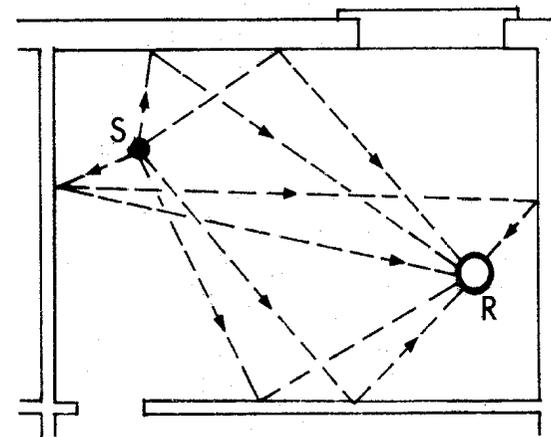
$$L_p \approx L_W - 20 \log \frac{r}{r_0} - 11 \quad \text{sorgente sferica}$$

$$L_p \approx L_W - 20 \log \frac{r}{r_0} - 8 \quad \text{sorgente sul suolo}$$

# CAMPO DIFFUSO O RIVERBERANTE



riflessione,  
assorbimento  
e trasmissione del  
suono



campo sonoro in un  
ambiente chiuso

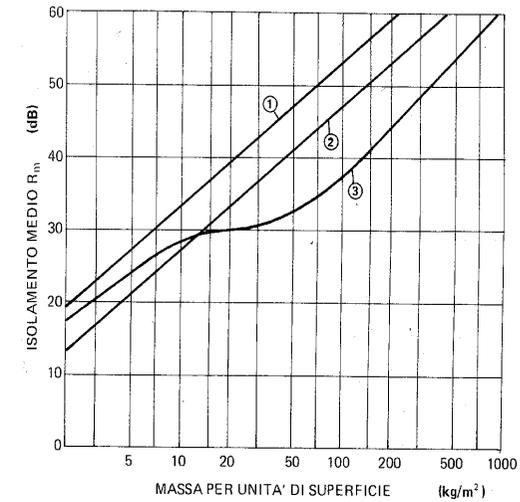
# FONOI SOLAMENTO DI PARETI

- l'isolamento  $R_m$  di una parete omogenea segue generalmente la legge di massa:

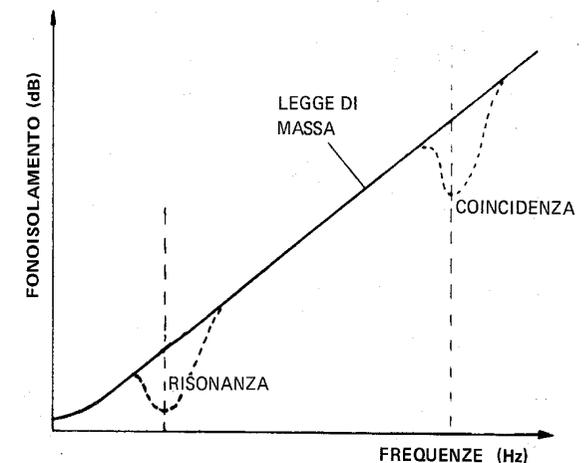
$$R_m = 20 \log \frac{2\pi f m}{2\gamma} \quad [\text{dB}]$$

raddoppiando la frequenza  $f$  o la massa specifica della parete  $m$  [ $\text{kg}/\text{m}^2$ ] l'isolamento aumenta di 6 dB

- in realtà esistono riduzioni del fonoisolamento a certe frequenze:
  - frequenze di risonanza (più basse)
  - frequenze di coincidenza (più alte)
- tali deficienze si smorzano con vernici o feltri antirombo



- ① - Isolamento teorico per incidenza normale
- ② - Isolamento teorico per incidenza diffusa
- ③ - Isolamento medio sperimentale



# DIFFUSIONE DEL RUMORE NEGLI AMBIENTI

- il campo sonoro può essere descritto con l'intensità sonora o con la densità di energia sonora
- coefficiente di assorbimento  $\alpha$  è definito come rapporto fra l'energia sonora assorbita da una superficie di estensione infinita e l'energia incidente sulla stessa
- in un ambiente con varie superfici

$$\bar{\alpha} = \frac{\sum_{i=1}^n S_i \alpha_i}{\sum_{i=1}^n S_i}$$

Materiale	frequenza in Hz		
	125	500	200
Parete in mattoni	0,02	0,03	0,05
Parete in calcestruzzo	0,02	0,03	0,05
Parete in marmo lucidato	0,01	0,01	0,02
Pavimento in legno levigato o linoleum	0,02	0,03	0,03
Pavimento in battuto di cemento o in marmette	0,01	0,02	0,03
Pavimento in gomma	0,04	0,06	0,08
Lamierino acciaio forato al 10% con retrostante fibra di vetro spessore 25 mm (30 kg/m <sup>3</sup> )	0,10	0,50	0,92
Lamierino acciaio forato al 3% con retrostante fibra di vetro spessore 25 mm	0,10	0,65	0,50
Pannelli in gesso forati al 12% con retrostante:			
fibra di vetro spessore 20 mm (30 kg/m <sup>3</sup> )	0,40	0,80	0,60
fibra di vetro spessore 30 mm (30 kg/m <sup>3</sup> )	0,14	0,79	0,88
lana di roccia spessore 30 mm (50 kg/m <sup>3</sup> )	0,12	0,60	0,76
Lamierino di alluminio in strisce sagomate (doghe) forato			
al 15% con retrostante:			
fibra di vetro spessore 25 mm	0,10	0,50	0,90
fibra di vetro spessore 50 mm	0,25	0,50	0,88
fibra di vetro spessore 100 mm	0,55	0,90	0,90
Pannello poroso in fibra di legno pressata, a parete	0,10	0,20	0,30
Gruppo di persone (")	0,60	0,80	0,90

( ) Si tiene conto della superficie (in pianta) occupata dalle stesse attribuendo a tale superficie il coefficiente medio di assorbimento riportato in tabella.

## COSTANTE DEL LOCALE

da: 
$$p_g = \sqrt{\frac{\gamma c Q_g W}{4\pi r^2}} \quad D = \frac{P_m^2}{\gamma c^2}$$

segue per un campo diretto:

$$D_0 = W \frac{Q_g}{c} \frac{1}{4\pi r^2}$$

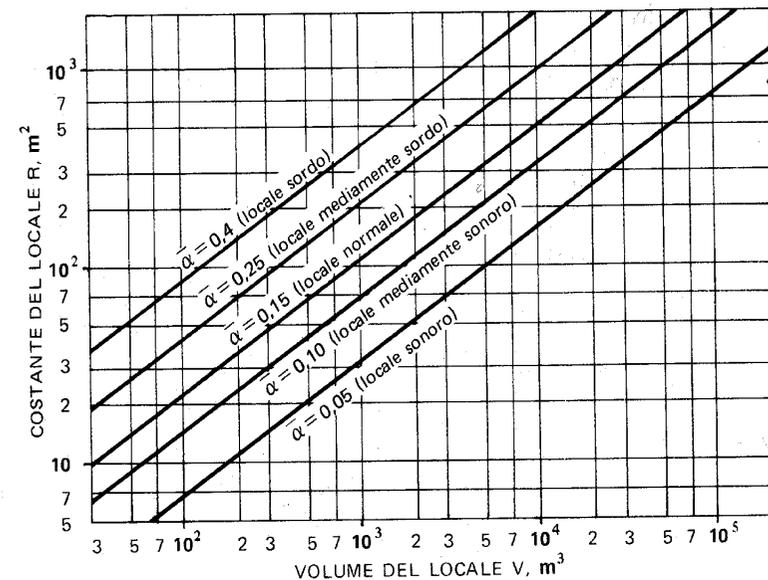
per un campo diffuso invece:

$$D_R = \frac{4W(1-\bar{\alpha})}{cS\bar{\alpha}} = \frac{4W}{cR} \quad \text{con} \quad R = \frac{S\bar{\alpha}}{1-\bar{\alpha}}$$

se  $\alpha < 0,3$  si può approssimare con:

$$D_R \approx \frac{4W}{cS\bar{\alpha}}$$

dimensioni in rapporto circa 1:1,5:2



costante del locale [m<sup>2</sup>]

# CAMPO SONORO IN UN LOCALE

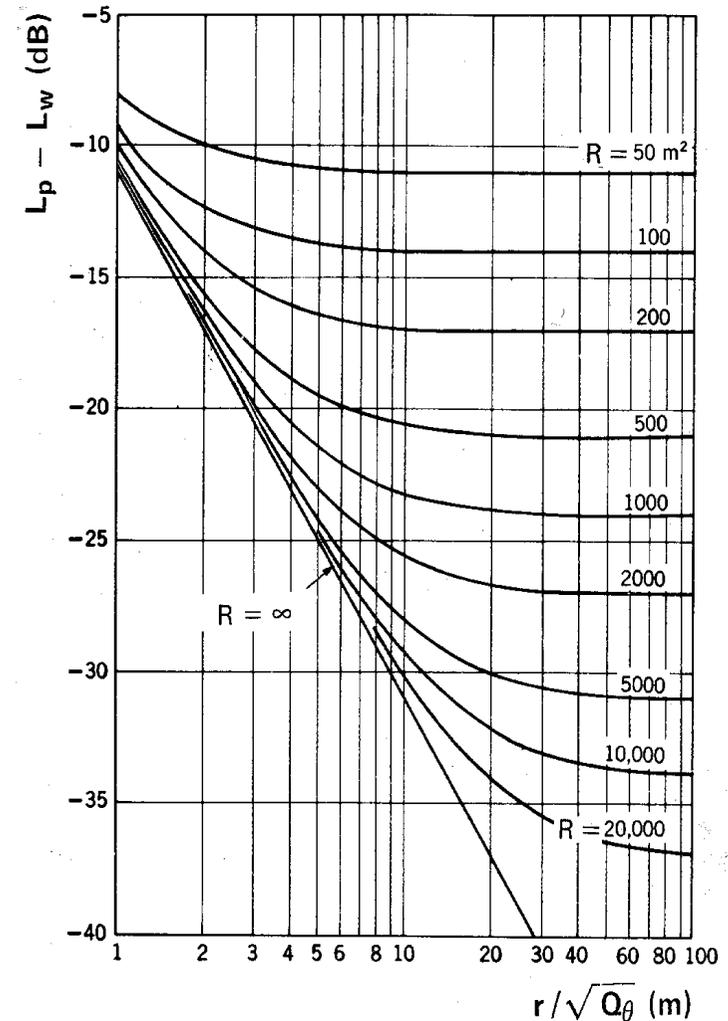
$$D = D_0 + D_R = \frac{W}{c} \left( \frac{Q_g}{4\pi r^2} + \frac{4}{R} \right)$$

$$p^2 = \gamma c W \left( \frac{Q_g}{4\pi r^2} + \frac{4}{R} \right)$$

$$\frac{p^2}{p_0^2} = \frac{\gamma c}{\gamma_0 c_0} W \left( \frac{Q_g}{4\pi r^2} + \frac{4}{R} \right) = \frac{W}{W_0} \left( \frac{Q_g}{4\pi r^2} + \frac{4}{R} \right)$$

$$L_p = L_W + 10 \log \left( \frac{Q_g}{4\pi r^2} + \frac{4}{R} \right) \approx$$

$$\approx L_W + 10 \log \left( \frac{Q_g}{4\pi r^2} + \frac{4}{S\bar{\alpha}} \right)$$



# CAMPO SONORO IN UN LOCALE cnt.

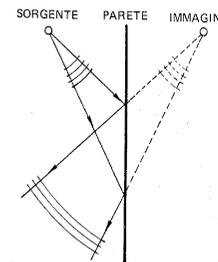
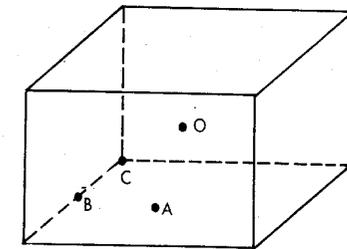
per sorgenti omnidirezionali lontano dalle pareti ( $Q_\theta = 1$ ) si ha campo diffuso prevalente se

$$\frac{4}{S\bar{\alpha}} \gg \frac{1}{4\pi r^2} \Rightarrow r^2 \gg \frac{S\bar{\alpha}}{16\pi} = 0,02S\bar{\alpha}$$

- distanza critica è quella a partire dalla quale il campo diffuso inizia a prevalere sul campo diretto
- nel campo diretto, a causa delle riflessioni si adottano adeguati valori di  $Q_\theta$

$$L_p - L_w \approx 10 \log \left( \frac{Q_\theta}{4\pi r^2} + \frac{4}{S\bar{\alpha}} \right)$$

$\uparrow$                        $\uparrow$   
 campo diretto      campo diffuso



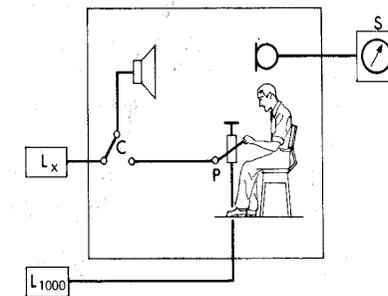
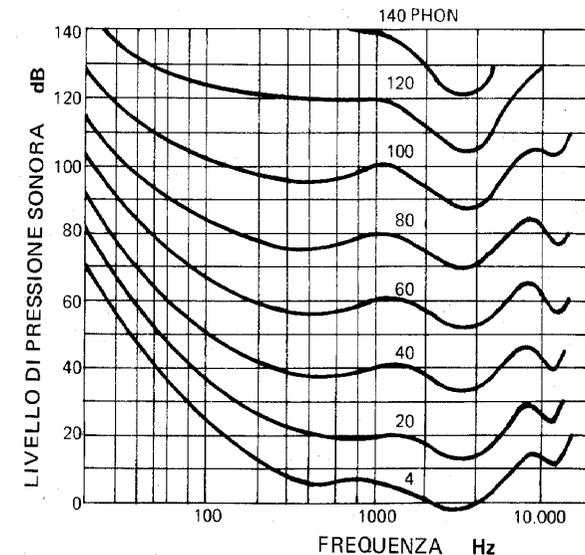
Posizione sorgente	$Q_\theta$
Centro del locale O	1
Centro di una parete A	2
Spigolo fra due pareti B	4
Angolo fra tre pareti C	8

# PERCEZIONE UDITIVA E VALUTAZIONE DEL SUONO

**sensazione uditiva:** l'intensità percepita del suono dipende dalla sua pressione e dalla sua frequenza

**audiogramma normalizzato (ISO):** è l'insieme delle curve di ugual sensazione sonora ricostruito con ripetute osservazioni di soggetti in condizioni psicologiche e fisiologiche normali:

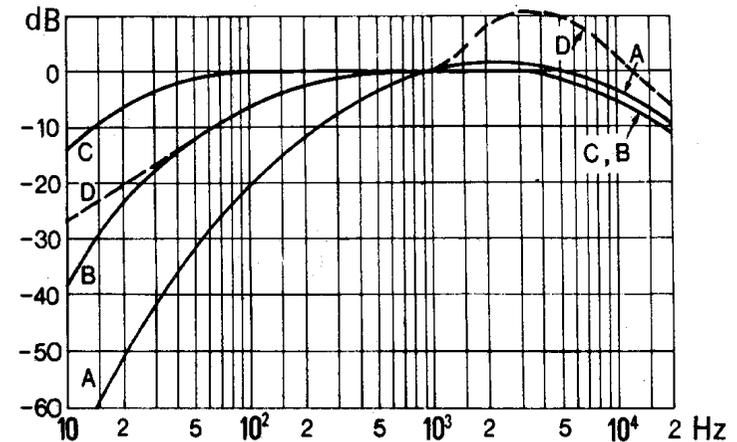
- la curva inferiore che passa a 1000 Hz 0 dB rappresenta la soglia di udibilità
- la curva superiore che passa a 1000 Hz 120 dB rappresenta la soglia del dolore



## CURVE DI PONDERAZIONE

Sono utilizzate per correggere la risposta dei fonometri tenendo conto della diversa percezione uditiva a diverse frequenze:

- **curva A:** è quella universalmente accettata ed utilizzata, anche se corrisponde ad una correzione per suoni di basso livello
- **curva B:** per suoni di livello medio
- **curva C:** per suoni di livello elevato
- **curva D:** per la valutazione del rumore da sorvolo



per rumori aleatori  
vale la relazione:  
 $\text{dB}_A = \text{dB} - 7$

**livello equivalente continuo di rumore:** è il livello di rumore costante e continuo che nell'intervallo di tempo considerato possiede lo stesso livello energetico (potenza media) di un rumore o una sequenza di rumori

$$L_{eq} = 10 \log \left[ \frac{1}{T} \int_0^T \frac{p(t)^2}{p_0^2} dt \right]$$

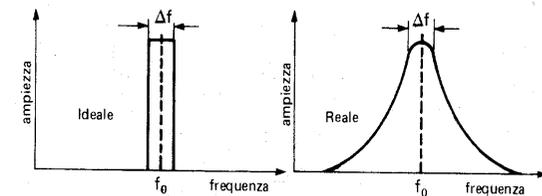
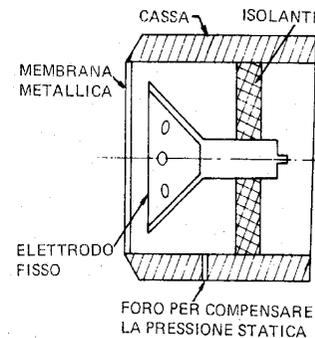
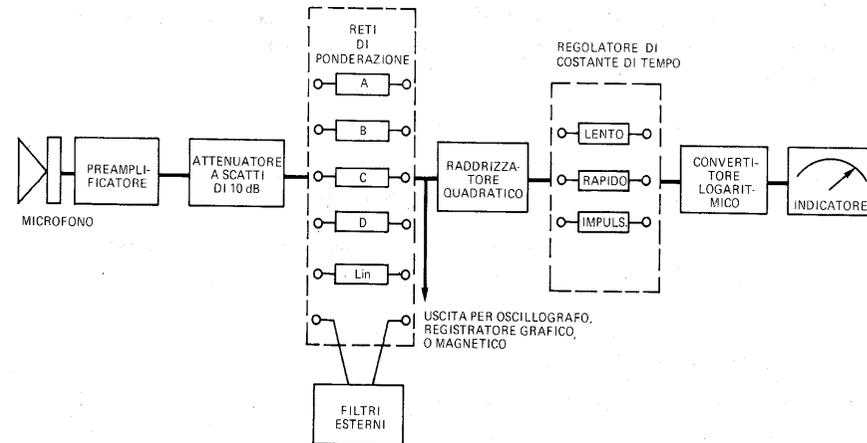
se viene ponderato con la curva A si dice "**livello sonoro equivalente**"

$$L_{Aeq,T} = 10 \log \left[ \frac{1}{T} \int_0^T 10^{0,1L_A(t)} dt \right]$$

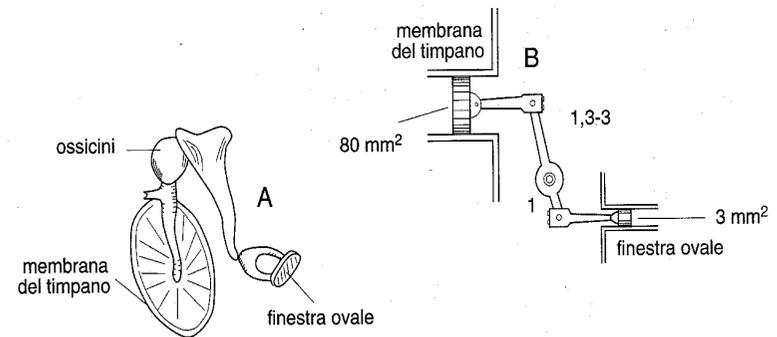
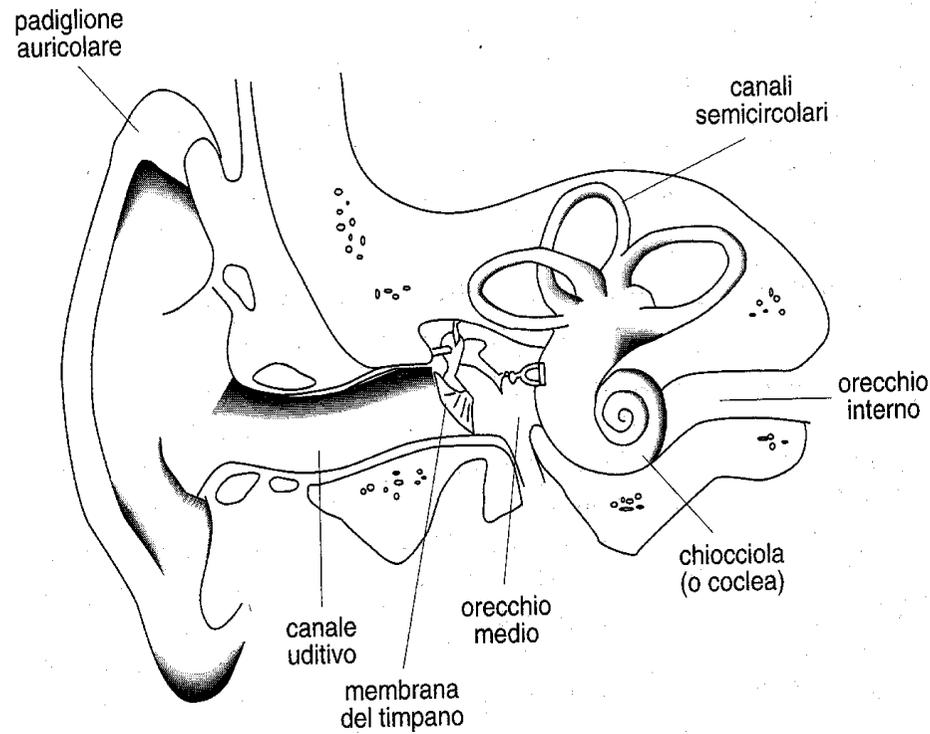
# STRUMENTI PER LA MISURA DEL RUMORE

**fonometro (IEC 651):** ha una gamma dinamica di 60-70dB, e misura da 20dB a 150dB

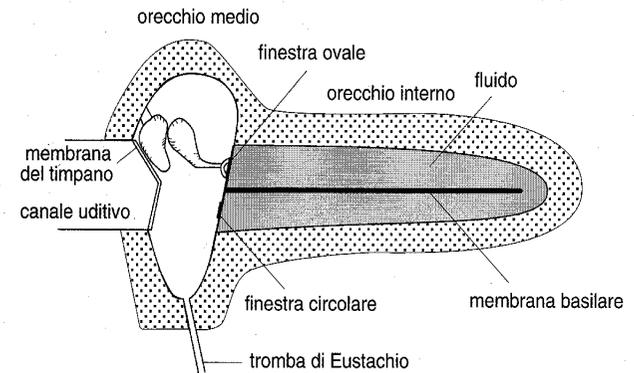
- microfono: da 1/8" a 1" a seconda delle frequenze da misurare
- reti di ponderazione e filtri passa banda (IEC 225)
- integratore RMS (IEC 804)
- costanti di tempo:
  - slow: 1.000 ms
  - fast: 125 ms
  - impulse: 35 ms
  - peak: 0,02 ms



# APPARATO UDITIVO



## ORECCHIO MEDIO



## ORECCHIO INTERNO

## **Danno**

alterazione non completamente reversibile, obiettivabile dal punto di vista clinico e/o anatomico-patologico

## **Disturbo**

alterazione temporanea delle condizioni psicofisiche del soggetto, chiaramente obiettivabile e che determina effetti fisiopatologici ben definiti

## **Fastidio (annoyance)**

“sentimento di scontentezza” riferito al rumore che il soggetto sa o crede che possa agire su di lui in modo negativo; risposta soggettiva alla combinazione dello stimolo uditivo e altri di natura psicologica, sociologica, economica

### **effetti specifici (uditivi e vestibolari):**

è significativa l'energia sonora assorbita

### **effetti neuro-endocrini e psicologici:**

oltre all'energia possono assumere importanza altri parametri fisici (impulsività, componenti tonali, fattore di cresta, modalità di erogazione, etc.) e soggettivi (responsività, effetto sorpresa, motivazione. etc.)

### **effetti psicosomatici:**

(come sopra)

### **effetti psicosociali:**

(come sopra)

## TRIPODE DEL DANNO (E DEL DISTURBO)

### **livello di pressione sonora:**

espresso come  $L_{Aeq}$  per valutare l'energia dissipata; rumori impulsivi o con elevati fattori di cresta danneggiano in misura maggiore dell'energia che hanno a causa della ridotta capacità di adattamento degli organi uditivi alla repentina variazione (riflesso stapediale)

### **tempo di esposizione al rumore:**

la dipendenza del danno dal tempo non è lineare; si ha affaticamento muscolare degli organi che compensano il livello sonoro (l'acido lattico deve essere smaltito col riposo)

### **spettro della sorgente sonora:**

rumori a spettro continuo esteso danno un marcato effetto di mascheramento sulle comunicazioni verbali e favoriscono l'insorgenza di fenomeni di affaticamento e usura; rumori tonali intensi concentrano l'energia in una banda ristretta e quindi su un numero limitato di cellule sensoriali (specializzate) con elevato rischio di danno