

NOZIONI FONDAMENTALI D'ACUSTICA

- 1. Introduzione**
- 2. Il rumore**
- 3. Il suono**
- 4. La frequenza**
- 5. Propagazione del suono**
- 6. Pressione sonora**
- 7. Potenza sonora ed energia acustica**
- 8. Livello di pressione sonora**
- 9. Addizione di livelli sonori**
- 10. Analisi spettrale**
- 11. Curve di ponderazione**
- 12. Segnali acustici**
 - 12.1 Infrasuoni, suoni udibili, ultrasuoni**
 - 12.2 Tono Suono Rumore**
 - 12.3 Rumore stazionario, rumore intermittente, rumore impulsivo.**
- 13. Campo sonoro**
 - 13.1 Campo sonoro libero**
 - 13.2 Campo sonoro diffuso**
 - 13.3 Campo sonoro nei locali chiusi (civili ed industriali)**
- 14. Assorbimento acustico**
 - 14.1 Assorbimento per porosità**
 - 14.2 Assorbimento per risonanza di cavità**
 - 14.3 Assorbimento per risonanza di pannello**
- 15. Tempo di riverberazione t**

1. Introduzione

Il rumore è causa di stress, se non addirittura di danni alla salute. Per questo motivo una casa tranquilla e confortevole è un fattore essenziale per un'alta qualità della vita.

L'emanazione di leggi nazionali e regionali e le nuove norme europee in materia di acustica edilizia, hanno portato all'attenzione di un più vasto target - progettisti, costruttori, applicatori e non ultimi i cittadini – il problema dell'isolamento acustico. A tali quesiti e rinnovato interesse il mercato dell'edilizia ha risposto e sta rispondendo nelle maniere e con le soluzioni più varie.

Termolan, si propone di presentare una analisi organica e più diffusa degli aspetti fondamentali e dei problemi legati al tema dell'isolamento acustico anche per coloro che non hanno una conoscenza specifica della materia.

2. Il rumore

Si definisce rumore ogni tipo di suono capace di disturbare, infastidire o addirittura intaccare l'integrità fisica dell'individuo.

3. Il suono

Si definisce "suono" l'insieme delle onde acustiche che si propagano nei mezzi elastici (gas, liquidi, solidi). In assenza di materia, "nel vuoto", non si ha nessuna emissione sonora.

Si ha la formazione del suono aereo:

- quando un gas cambia improvvisamente di volume (esplosione, detonazione, scoppio di un palloncino);
- quando il flusso di gas o i movimenti veloci impressi a corpi solidi generano dei vortici (fuoriuscita di aria compressa, rumori del vento);
- quando colonne d'aria vengono sottoposte a oscillazioni (canne d'organo, flauto);
- quando le oscillazioni di corpi solidi quali gli elementi di macchine, le campane, i diapason, le membrane degli altoparlanti si trasmettono all'aria circostante (fig. 1).

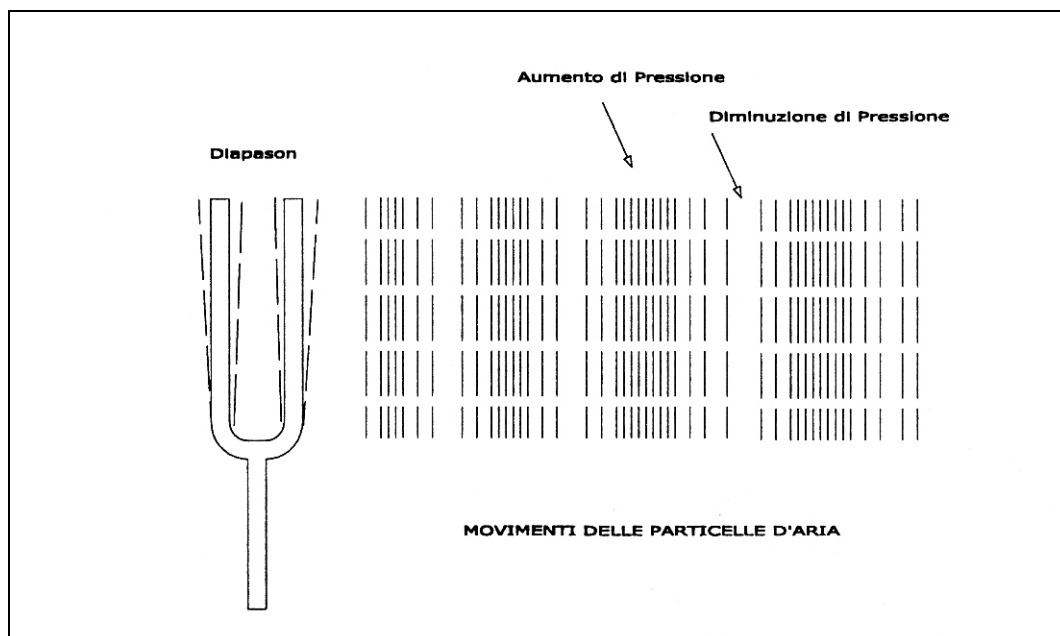


Figura 1 - Generazione e propagazione del suono

4. La frequenza

Corrisponde al numero delle vibrazioni sonore al minuto secondo. L'unità di misura della frequenza è l'Hertz (abbreviato HZ).

Raddoppiando o dimezzando la frequenza, si ha rispettivamente un aumento o una diminuzione pari a un'ottava.

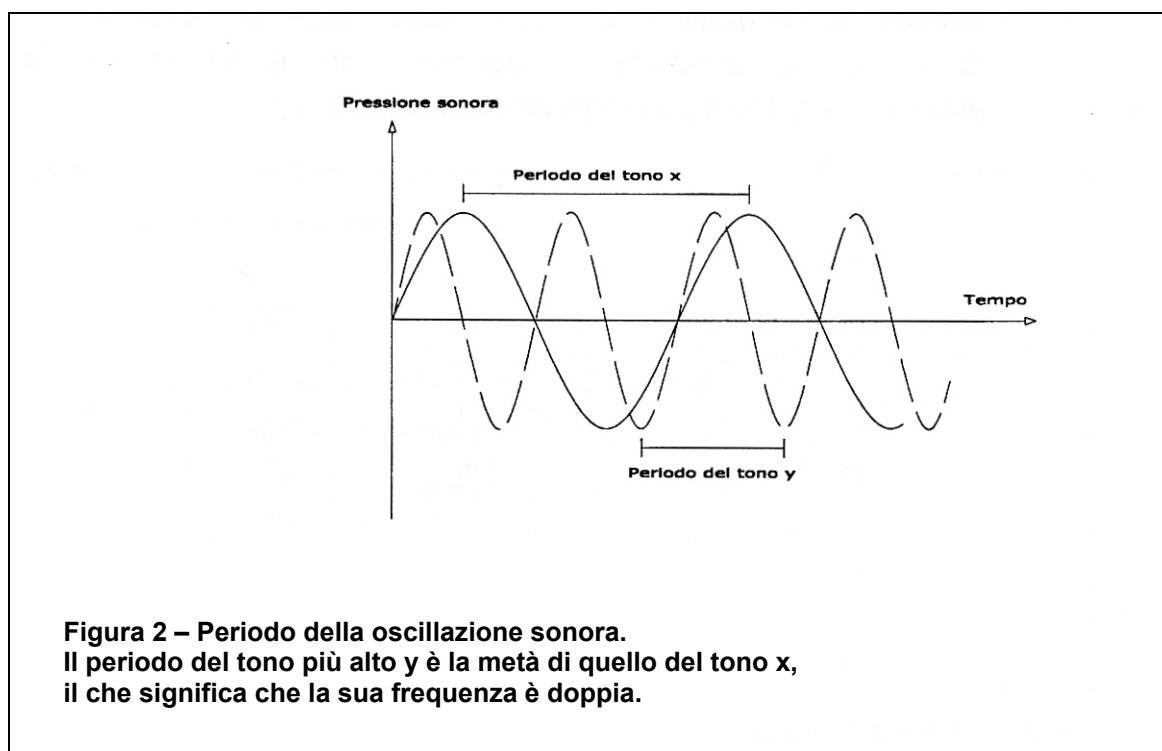
In acustica si comincia da un tono di 1.000 Hz, a partire dal quale si ottengono per ottava le seguenti frequenze centrali:

31.5	63	125	250	500	1.000	2.000	4.000	8.000	16.000	Hz
------	----	-----	-----	-----	-------	-------	-------	-------	--------	----

Le frequenze al di sotto di 20 Hz si trovano nel campo degli infrasuoni e quelle al di sopra dei 20.000 Hz nel campo degli ultrasuoni.

Per **periodo T** si intende l'intervallo di tempo che trascorre fino al ripetersi dello stesso stato di oscillazione (fig.2).

Il numero di volte con cui si ripetono tali fenomeni periodici nell'unità di tempo è chiamato **frequenza f** e determina l'altezza tonale (del suono).



$f = \frac{1}{T}$ in hertz (Hz), ossia numero di oscillazioni al secondo

f = frequenza (Hz)

T = periodo (sec)

1 KHz = 1.000 Hz = 1.000 oscillazioni al secondo
(tono fisico normale)

Esempi di frequenze:

Il tono più basso del pianoforte

= 27 Hz

Il diapason internazionale

= 440 Hz

Il primo suono del segnale orario delle radio

= 1.000 Hz

Il sibilo, del televisore a volume completamente azzerato

= 15.000 Hz

5. Propagazione del suono

Le oscillazioni o vibrazioni di pressione nell'aria - generate per esempio dallo scoppio di un palloncino - si propagano in tutte le direzioni così come fanno le onde che si producono sullo specchio d'acqua infranto da un sasso.

La velocità di propagazione **delle onde sonore**¹ varia in funzione della temperatura e delle caratteristiche del mezzo, ma è però, indipendente dalla frequenza.

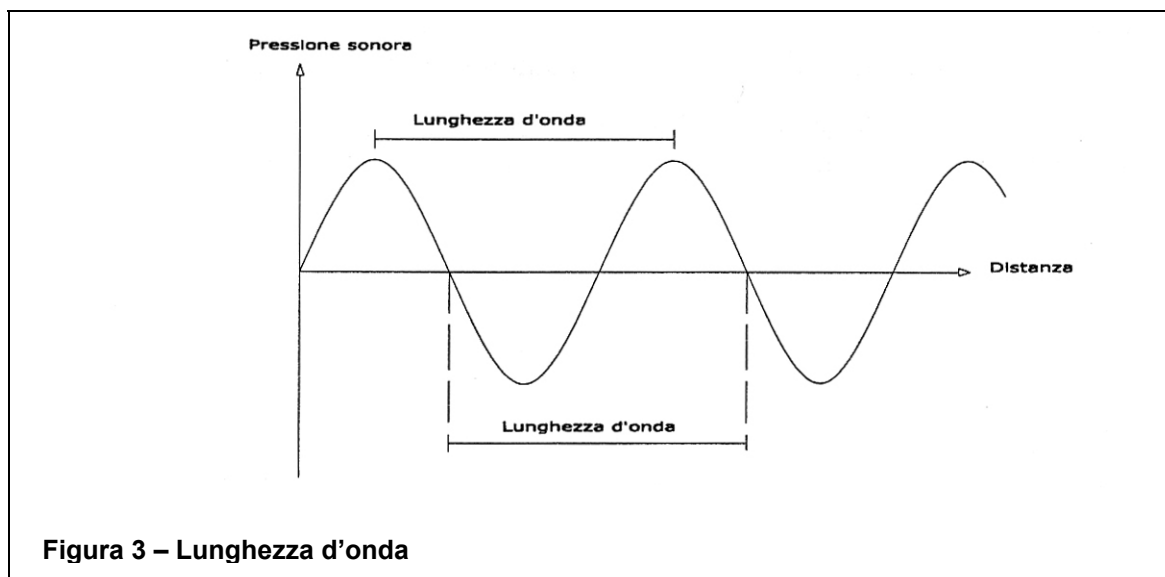
Velocità di Propagazione del suono in alcuni materiali

Materiale	Velocità del suono (m/sec)
Gomma	50 – 150
Aria (condizioni normali)	341
Sughero	430 – 530
Piombo	1.300
Acqua	1.400
Legno (con propagazione perpendicolare alle fibre)	1.000 – 1.500
Legno (con propagazione parallela alle fibre)	3.500 – 5.000
Calcestruzzo	3.700
Acciaio	5.000
Alluminio	5.000
Vetro	5.00 – 6.000
Granito	6.000

Tabella 1

La **velocità del suono C** nell'aria a 20°C, è pari a circa 341 m/sec equivalente anche a circa 1.225 Km/h.

La **lunghezza d'onda λ** è la distanza tra due stati uguali di un'onda sonora (fig. 3).



¹ - Mentre l'oscillazione sonora rappresenta le condizioni di un punto in funzione del tempo, l'onda sonora è il termine che sta ad indicare il comportamento nello spazio e nel tempo della pressione sonora.

L'intero treno d'onda si muove alla velocità del suono, per cui si ammette la relazione:

$$\lambda = \frac{c}{f} \quad \text{oppure} \quad f = \frac{c}{\lambda} \quad \text{oppure} \quad c = f * \lambda$$

λ = lunghezza d'onda (m)

c = velocità del suono (m/sec)

Dai dati riportati in tabella 1 risulta che nell'aria a temperatura e pressione normali una sorgente in vibrazione permanente con una frequenza, per esempio, di 500 Hz dà luogo ad onde elastiche di pari frequenza, avente lunghezza d'onda:

$$\lambda = \frac{c}{f} = \frac{341}{500} = 0.682 \text{ m}$$

Il campo di frequenze alle quali è sensibile l'orecchio umano è compreso tra 16 Hz e 20.000 Hz, pertanto nell'aria le lunghezze delle onde sonore vanno da alcuni metri a pochi centimetri (vedi tabella sotto riportata).

Frequenza f Hz	Lunghezza d'onda λ metri
20.000	0.017
16.000	0.021
10.000	0.034
8.000	0.042
4.000	0.085
2.000	0.17
1.000	0.34
500	0.68
250	1.36
125	2.72
63	5.41
31.5	10.82
16	21.31

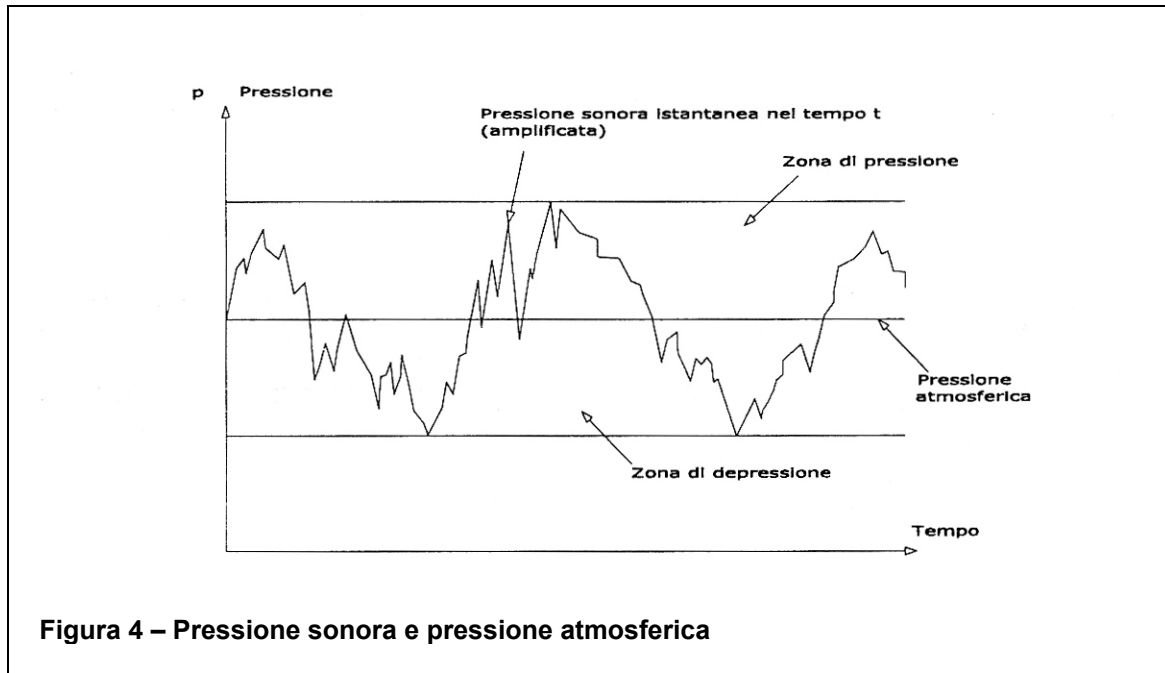
6. Pressione sonora

I movimenti rapidi delle singole particelle d'aria generano oscillazioni di pressione che si sovrappongono alla pressione atmosferica ambiente, anche se messe a confronto con essa sono infinitamente più deboli (fig. 4).

Pressione atmosferica: circa 100.000 Pa

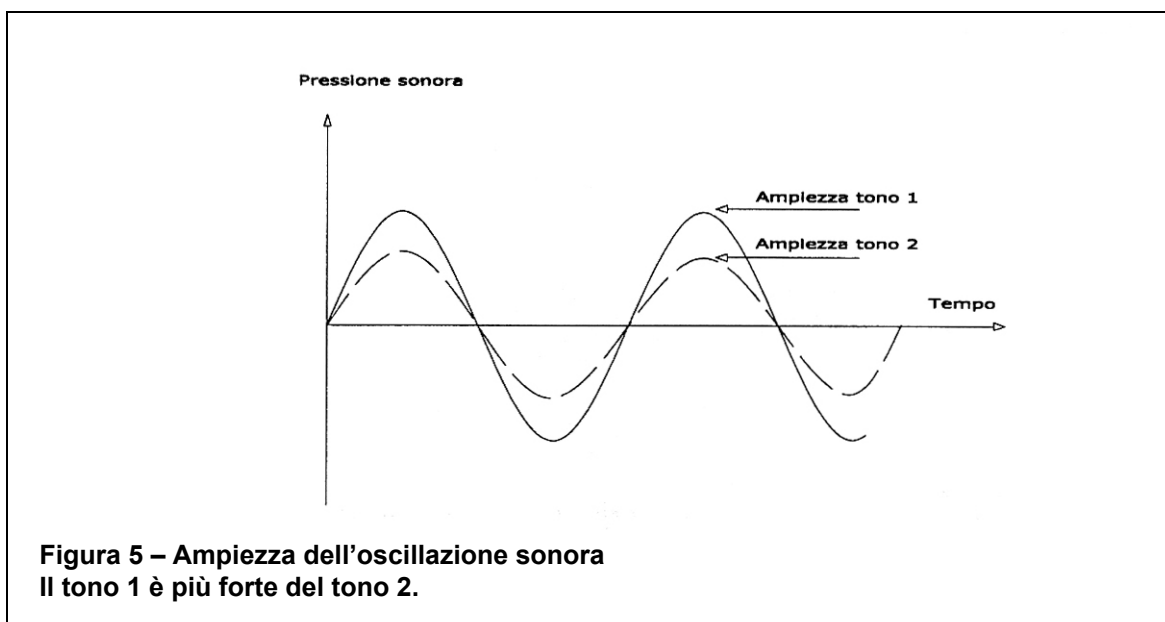
Massima pressione sonora della voce a 1 m: circa 1Pa

(1 Pa = 1 Pascal = 1 Nm² = 1N/m² = 10 μbar)

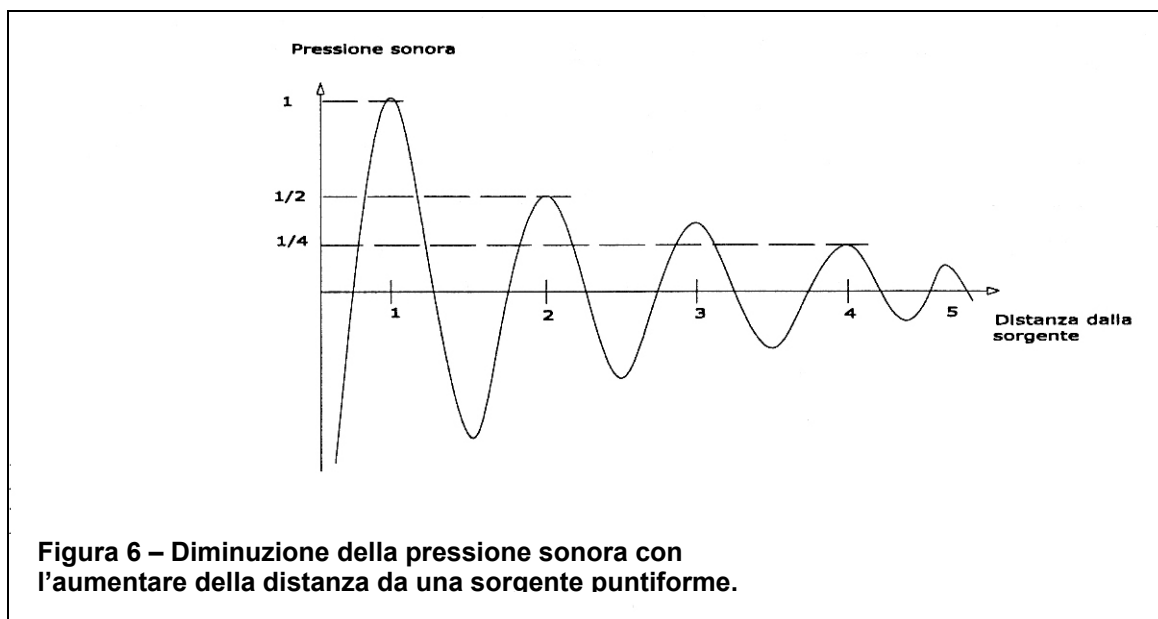


Ad una semplice eccitazione - ad esempio con un diapason - la pressione sonora oscilla attorno al suo valore di quiete, dando così origine ad una **oscillazione sonora** ad andamento sinusoidale.

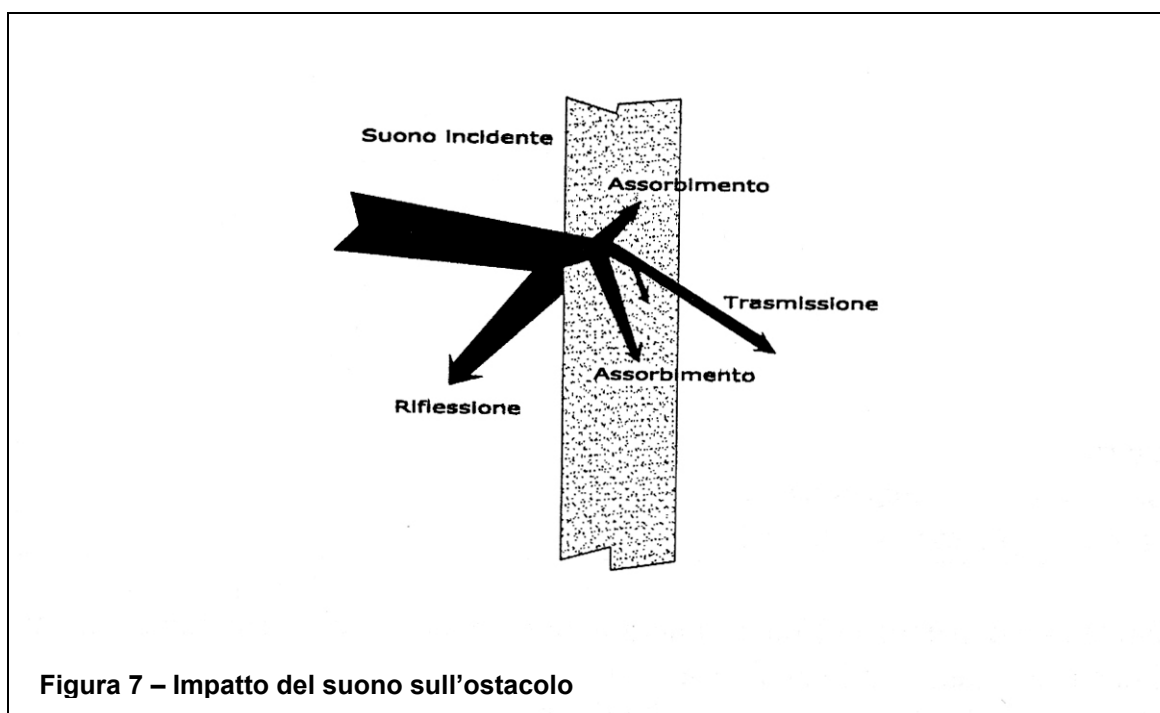
La grandezza dell'oscillazione di pressione (ampiezza) influisce sul livello sonoro soggettivo (intensità del suono) (fig. 5).



Con la propagazione dell'onda sonora in tutte le direzioni, la pressione sonora diminuisce, mantenendo invece invariata la sua frequenza. Quando la sorgente sonora è puntiforme, l'ampiezza della pressione decresce della metà ad ogni raddoppio della distanza (fig. 6).



Il suono che incontra un ostacolo, come illustrato nella figura 7, viene in parte riflesso (riflessione) e - a seconda delle caratteristiche superficiali dell'ostacolo - in parte assorbito (assorbimento), mentre il resto penetra attraverso l'ostacolo (trasmissione).



La riflessione, l'assorbimento e la trasmissione dipendono prevalentemente dalla lunghezza d'onda del segnale acustico.

Le onde corte (frequenze alte) possono essere assorbite già con materiali di spessore ridotto. Le onde lunghe (frequenze basse) tendono invece ad attraversare o aggirare un ostacolo, oppure ne vengono riflesse. Un'ombra acustica può prodursi solo dietro un oggetto le cui dimensioni sono di molto superiori alla lunghezza d'onda del segnale acustico.

7. Potenza sonora ed energia acustica

Il microfono dei fonometri e l'orecchio reagiscono alla pressione sonora, la quale è misurabile direttamente ed è nel tempo stesso determinante ai fini della sensibilità (percezione).

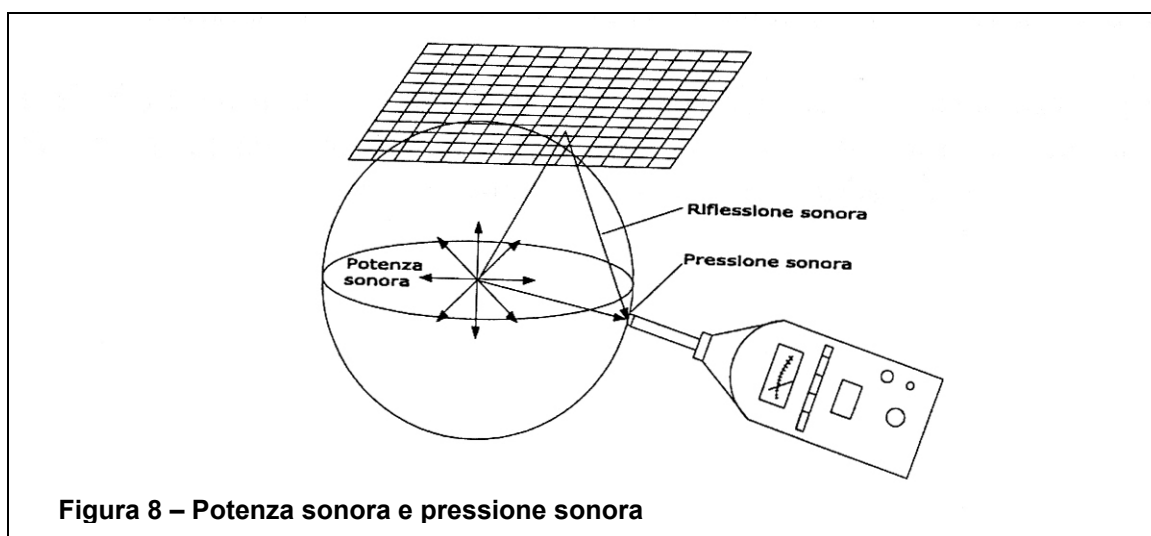
La pressione sonora che si misura in un luogo, dipende:

- dalla potenza sonora emanata dalla sorgente acustica;
- dalla caratteristica di irradiazione del suono, ossia uniforme in tutte le direzioni;
- dalla lontananza della sorgente acustica;
- dalla presenza di ostacoli fra le sorgenti ed i punti di misurazione acustica;
- dall'influsso delle riflessioni che possono essere generate da pavimenti e pareti;
- dalla presenza di altre sorgenti acustiche interferenti.

La potenza sonora generata da una sorgente acustica è la grandezza che meglio si adatta per confrontare le caratteristiche acustiche di differenti sorgenti sonore (fig.8).

La potenza sonora si esprime in watt (W) come si fa anche per le potenze meccaniche, elettriche e termiche.

Esempi: un motore produce 74 KW = 74.000 W = ca. 100 CV; una stufa elettrica trasforma 500 W in calore.



La potenza sonora di alcune sorgenti tipiche

Valori assoluti watt	Livelli di potenza sonora dB	Sorgente
10.000	160	Grande aereo quadrireattore
1.000	150	
100	140	Aereo leggero
10	130	Organo fortissimo
1	120	Martello pneumatico
0.01	100	Altoparlante Hi-Fi
0.001	90	Violino fortissimo
0.0001	80	Officina meccanica
0.00001	70	
0.000001	60	Voce media
0.0000001	50	
0.00000001	40	aria pulsante
0.000000001	30	Sussurro leggero
0.0000000001	20	Movimento dell'aria, di notte, in aperta campagna.

Tabella 2. Potenze sonore

L'energia acustica emessa da una fonte sonora è il prodotto ottenuto dalla sua potenza media moltiplicata per la durata dell'irradiazione acustica

La potenza sonora e l'energia acustica sono proporzionali al quadrato della pressione acustica. Ad un raddoppio della pressione sonora si ha di conseguenza una quadruplicazione della potenza sonora.

8. Livello di pressione sonora

L'orecchio umano sano è in grado di apprezzare un campo di pressione sonora estremamente vasto:

pressione sonora alla **soglia di udibilità** $20 \mu\text{Pa} = 2 \cdot 10^{-5} \text{ Pa}$

pressione sonora alla **soglia del dolore** $20 \text{ Pa} = 2 \cdot 10^1 \text{ Pa}$

Queste pressioni sonore, intese nel rapporto da 1 a 1 milione, si rivelano d'uso poco pratico e non corrispondono in nessun modo all'effettiva percezione umana della forza prodotta dal rumore. L'introduzione del livello sonoro in decibel (dB) ha permesso di ridurre questo campo di valori.

L'unità decibel (=1/10 Bel) è legata al nome A.G. Bell, l'inventore del telefono e deriva quindi dalla tecnica delle telecomunicazioni, nella quale un livello è definito come il logaritmo del rapporto di una grandezza rispetto ad una grandezza di riferimento dello stesso genere. Adattando questo principio alla pressione sonora e prendendo come grandezza di riferimento la pressione sonora relativa alla soglia di udibilità (valore di riferimento) si ha la definizione del livello di pressione sonora o **livello sonoro** (ISO 131-1979) **L**.

$$L_p = 10 \log P/P_0 \text{ [dB]} \quad \text{oppure} \quad L_p = 20 \log P/P_0 \text{ [dB]}$$

L_p = Livello di Pressione sonora in decibel (dB)

p = pressione sonora misurata

P_0 = pressione sonora di riferimento = $20 \mu\text{Pa}$ (soglia di udibilità)

La tabella 3, riporta i livelli sonori tipici e le corrispondenti pressioni sonore.

Valori assoluti micropascal	Livelli di pressione sonora dB	Sorgente
6.000.000	110	Discoteca
3.500.000	105	Industria tessile
2.000.000	100	Industria tipografica
600.000	90	
350.000	85	TIR in corsa a 15 metri
100.000	75	Interno auto a 65 Km/h
35.000	65	auto in corsa 100 Km/h a 30 m.
90 000	60	Conversazione normale
6.000	50	Rumore di fondo zona residenziale
1.000	35	Sussurro a 2 metri
200	20	Fruscio di foglie
20	0	

Tabella 3

Come si vede dalla tabella 4, ad una certa **differenza di livello** corrisponde un determinato **rapporto** di pressione sonora e un **rapporto** quadratico delle potenze o delle energie sonore.

Esempio: Aumentando di 20 dB il livello acustico, si decuplica la pressione sonora e si centuplica l'energia sonora.

Differenze di livelli L2 - L1	Rapporto di pressione sonora p2 : p1	Rapporto di Potenza o energia sonora (p2 : p1) 2
0 dB	1,0 : 1	1,0 : 1
3 dB	1,4 : 1	2,0 : 1
5 dB	1,8 : 1	3,2 : 1
6 dB	2,0 : 1	4,0 : 1
10 dB	3,2 : 1	10,0 : 1
20 dB	10,0 : 1	100,0 : 1

Tabella 4

9. Addizione di livelli sonori

Due sorgenti, con differenti frequenze, producono nella posizione dell'osservatore due differenti livelli sonori:

$$L1 = 88 \text{ dB}$$

$$L2 = 85 \text{ dB}$$

Si vuole conoscere quale sarà il livello sonoro totale. La differenza fra i due livelli sonori é:

$$L1 - L2 = 3 \text{ dB}$$

per cui utilizzando la Tabella 5 si osserva che il ΔL da introdurre nell'espressione é:

$$\Delta L = 1.76 \text{ dB}$$

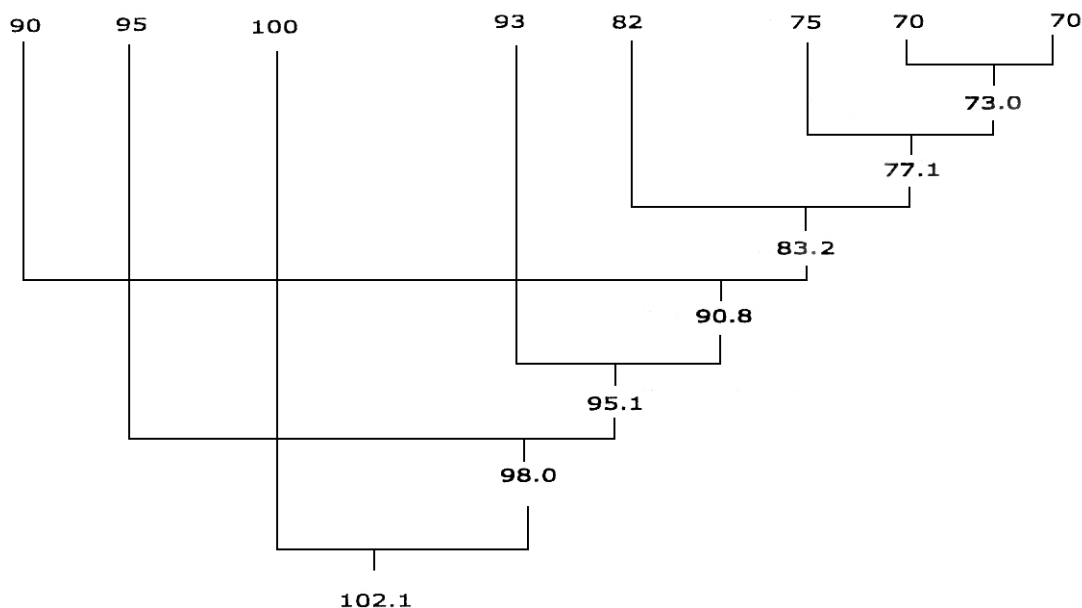
Il livello totale sarà quindi: $L_t = 88 + 1,76 = 89,76 = 90 \text{ dB}$

Occorre precisare che in pratica non si forniscono mai valori di livello sonoro espressi con decimali; i valori, infatti, vengono sempre arrotondati o per eccesso o per difetto in quanto l'orecchio umano non é in grado di percepire una variazione di livello sonoro inferiore ad 1 dB.

Valori da addizionare al livello più grande (dB)	Differenza dei livelli (dB)	Valori da addizionare al livello più grande (dB)	Differenza dei livelli (dB)	Valori da addizionare al livello più grande (dB)	Differenza dei livelli (dB)
3.01	0	2.16	1.9	0.41	10
2.96	0.1	2.12	2	0.37	10.5
2.91	0.2	2.04	2.2	0.33	11
2.86	0.3	1.93	2.5	0.29	11.5
2.81	0.4	1.86	2.7	0.26	12
2.76	0.5	1.76	3	0.23	12.5
2.72	0.6	1.60	3.5	0.21	13
2.67	0.7	1.45	4	0.18	13.5
2.62	0.8	1.31	4.5	0.16	14
2.58	0.9	1.19	5	0.15	14.5
2.53	1	1.07	5.5	0.13	15
2.49	1.1	0.97	6	0.12	15.5
2.45	1.2	0.87	6.5	0.10	16
2.40	1.3	0.79	7	0.08	17
2.36	1.4	0.71	7.5	0.06	18
2.32	1.5	0.63	8	0.05	19
2.28	1.6	0.57	8.5	0.04	20
2.24	1.7	0.51	9	0.02	22
2.20	1.8	0.46	9.5	0.01	25

Tabella 5

Nel caso in cui si debbano sommare più livelli sonori differenti, si può eseguire la combinazione dei livelli a due a due, giungendo così alla determinazione del livello globale.



10. Analisi spettrale

Spesso il campo delle frequenze udibili viene suddiviso in numerose bande di frequenze determinando per ciascuna di esse il livello sonoro. Questa analisi è necessaria ad esempio:

- per tener conto dei parametri che variano in funzione delle frequenze (per es. assorbimento acustico);
- per stimare la percezione di un rumore da parte dell'orecchio umano, che esegue esso stesso, un'analisi spettrale.

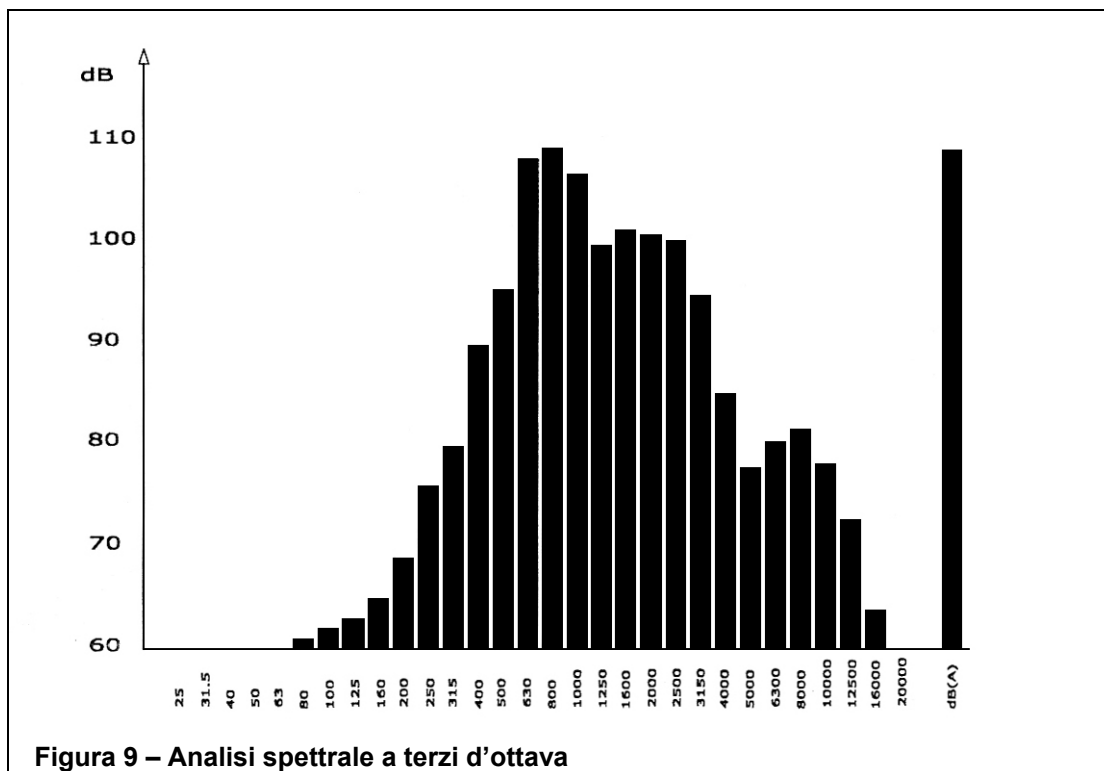
L'analisi spettrale d'uso in acustica si effettua mediante le bande di frequenza, la cui larghezza aumenta proporzionalmente alla frequenza centrale.

Le bande di frequenza normalizzate a livello internazionale sono le bande d'ottava, le cui frequenze centrali (mediane) sono definite a partire dalla frequenza di riferimento di 1.000 Hz moltiplicandola o dividendola per due.

.. 31.5 63 125 250 500 1000 2000 4000 8000 16000

per analisi più precise, ogni banda a ottave viene suddivisa in 3 bande a terzi d'ottava le cui frequenze mediane sono parimenti fissate:

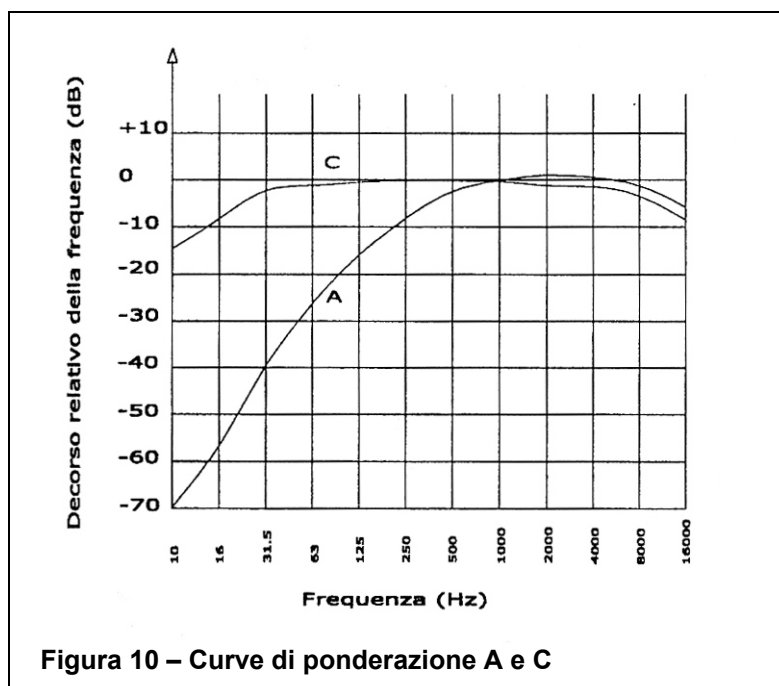
25	50	100	200	400	800	1600	3150	6300	12500
31.5	63	125	250	500	1000	2000	4000	8000	16000
40	80	160	315	630	1250	2500	5000	10000	20000



Le analisi spettrali sono rappresentate frequentemente sotto forma di diagramma a colonne (fig. 9). L'asse orizzontale esprime le frequenze centrali delle bande di frequenza e l'asse verticale il livello sonoro nella corrispondente banda di frequenza.

11. Curve di ponderazione

Nel predisporre le curve di ponderazione si è tenuto conto della sensibilità dell'udito umano in funzione delle frequenze (figura 10). Attualmente tutti ricorrono alla curva A per la valutazione dei fenomeni sonori civili ed industriali, rumori stazionari ed impulsivi (i fenomeni sonori impulsivi venivano prima valutati mediante la curva C). Ecco perché i valori di misurazione e valutazione vengono ora indicati in dB (A).



Valori delle curve di ponderazione per fonometri

Frequenza Hz	Curva A dB	Curva C dB
12.5	-63.4	-11.2
31.5	-39.4	-3.0
63	-26.2	-0.8
125	-16.1	-0.2
250	-8.6	0
500	-3.2	0
1000	0	0
2000	+1.2	-0.2
4000	+1.0	-0.8
8000	-1.1	-3.0
16000	-6.6	-8.5

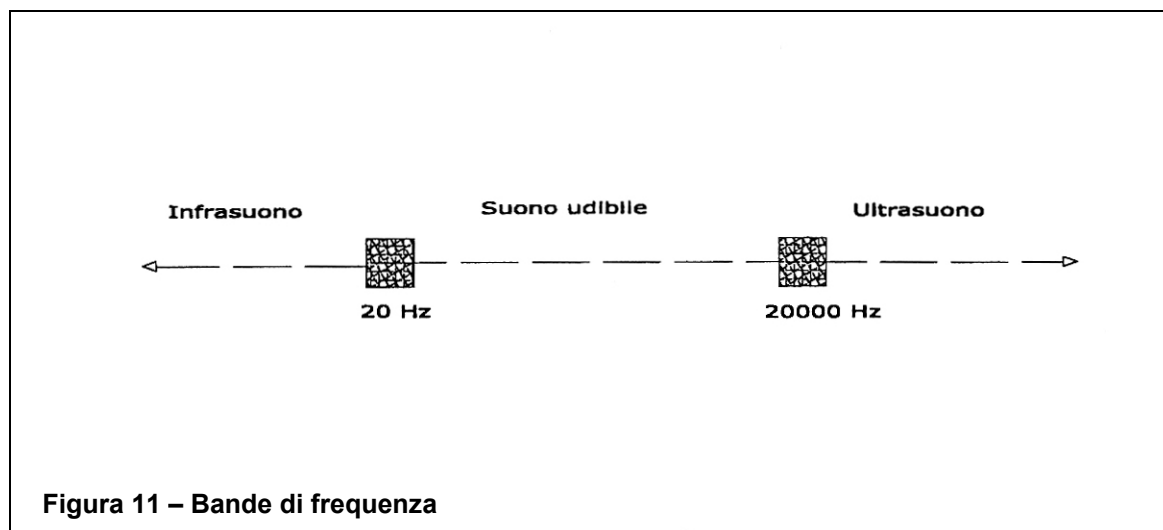
12. Segnali acustici

12.1 Infrasuoni, suoni udibili, ultrasuoni

Il campo del suono udibile non è delimitato in modo assoluto, in quanto la percettibilità delle frequenze più basse e più alte dipende in larga misura dal livello sonoro del segnale audiometrico.

Gli individui giovani con udito intatto sono generalmente in grado di udire un suono di 20.000 Hz (= 20 kHz), limite questo che va decrescendo con l'avanzare dell'età. Al di sotto di 20 Hz, un suono di livello elevato (ad esempio di 100 dB a 10 Hz) verrà percepito senza però produrre nessuna sensibilità uditiva.

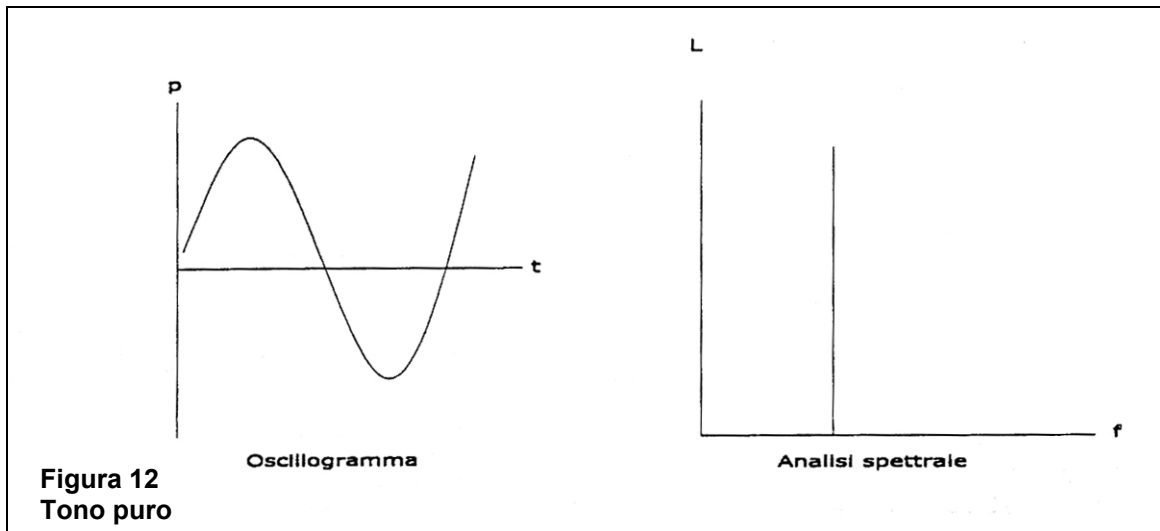
Per convenzione, la gamma o banda di frequenza entro 20 Hz e 20 kHz è considerata come il campo udibile del rumore. Le frequenze inferiori a 20 Hz fanno parte del campo dell'infrasuono, mentre le frequenze superiori a 20 kHz sono quelle degli ultrasuoni (fig. 11).



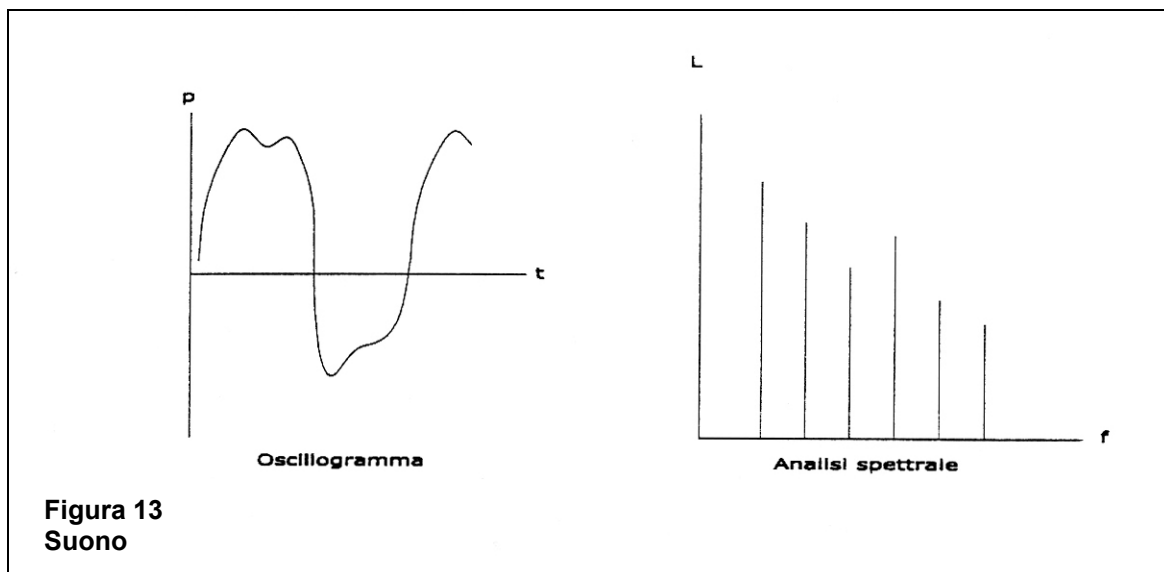
Gli ultrasuoni sono utili sia in natura sia nella tecnica. I pipistrelli, per esempio, sono in grado di orientarsi emettendo impulsi ultrasonori. Nell'industria si ricorre all'ultrasuono per la pulizia di pezzi in bagni appropriati e per la prova non distruttiva dei materiali, mentre nella medicina lo si usa per la diagnosi e la terapia.

12.2 Tono Suono Rumore

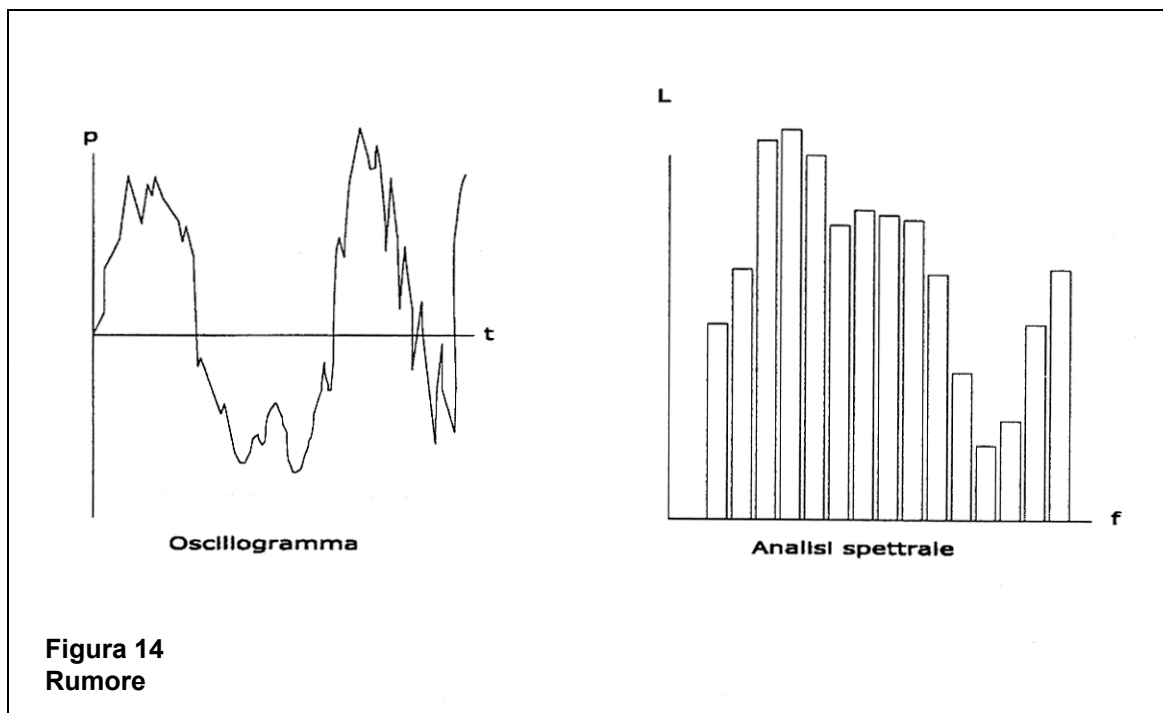
La differenza fra tono, suono e rumore si basa sullo spettro acustico. Un **tono puro** è un'oscillazione acustica ad andamento sinusoidale vale a dire composta di una sola frequenza (fig. 12). Il tono del diapason, dell'audiometro, del flauto, è prossimo al tono puro.



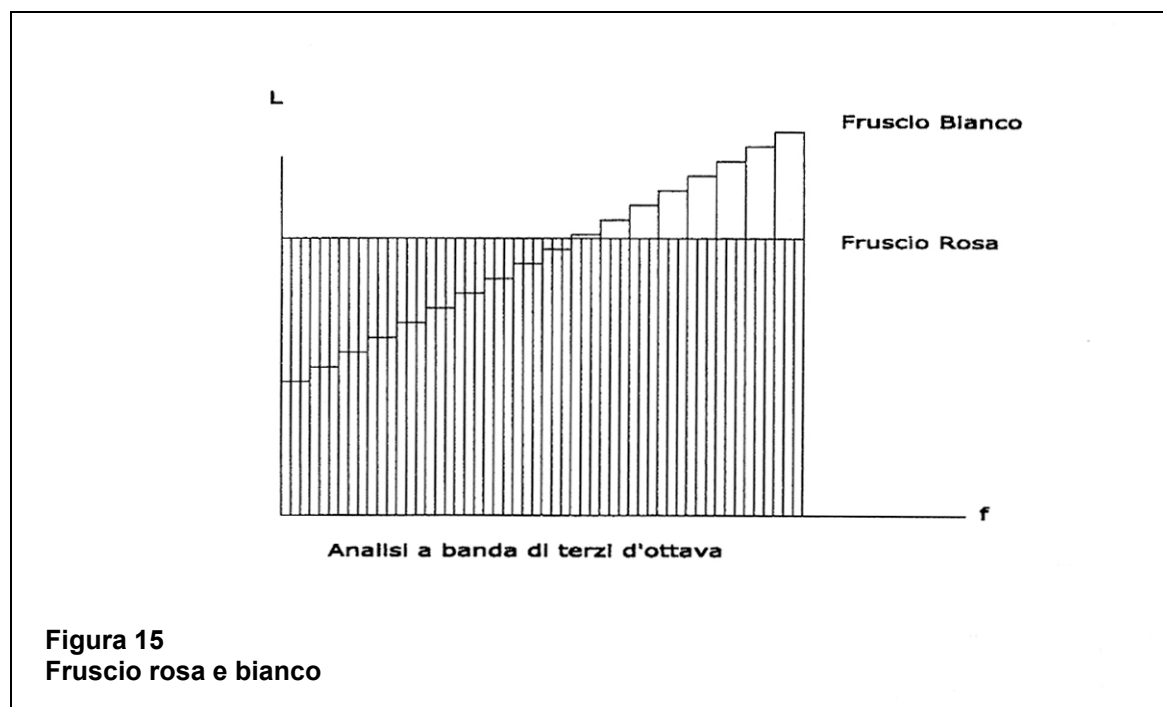
Un suono si compone di un tono base e di toni armonici (superiori) ossia di multipli interi della frequenza base. Questi toni armonici determinano il timbro (fig. 13). Ne sono esempi i suoni di un violino o degli strumenti a fiato.



I **rumori** (fig. 14) sono fenomeni sonori non periodici nel tempo e composti di numerose frequenze disarmoniche, il che vuol dire che queste frequenze non si trovano fra di loro in relazione. Non è possibile indicare una tonalità alta del suono. Ne sono esempi il rumore di una cascata o di un martello pneumatico.



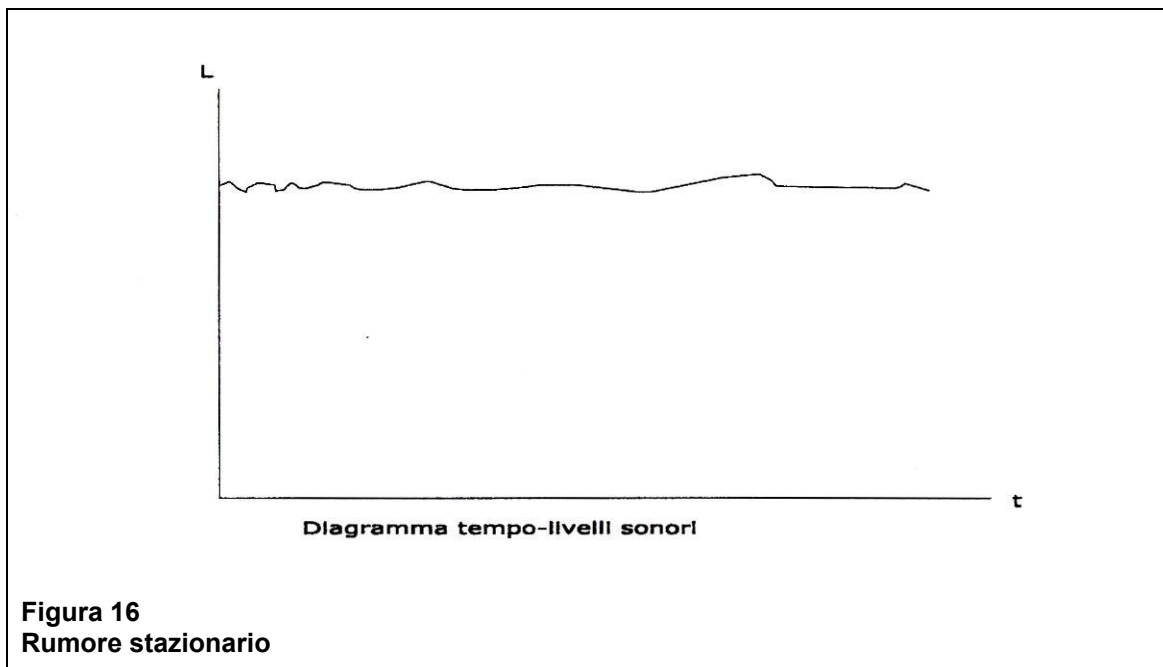
Per le misure acustiche, il segnale di prova a cui si ricorre spesso è il cosiddetto "fruscio rosa" atto a fornire un livello sonoro costante su tutte le bande di terzi d'ottava, ossia uno spettro livellare a banda di terzi d'ottava. Per contro, lo spettro del "fruscio bianco" cresce di 3 dB/ottava in funzione della frequenza sia per l'analisi a banda di ottava, sia per quella a banda di terzi d'ottava (fig. 15).



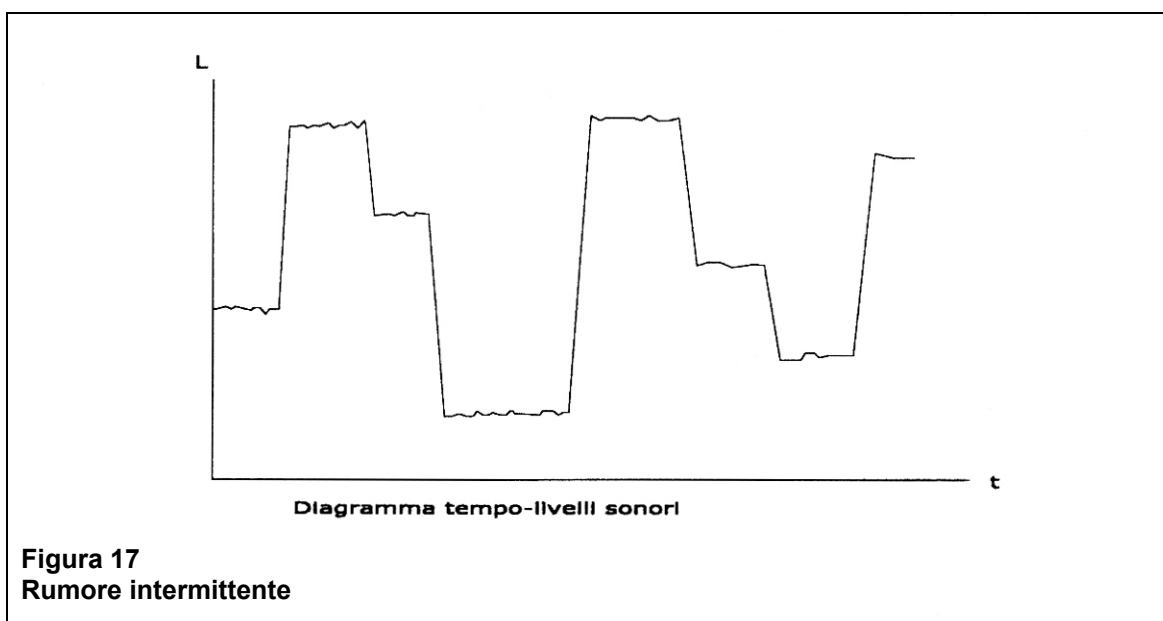
12.3 Rumore stazionario, rumore intermittente, rumore impulsivo.

La differenza fra rumore stazionario, rumore intermittente (non stazionario) e rumore impulsivo, è data dal decorso temporale del segnale sonoro.

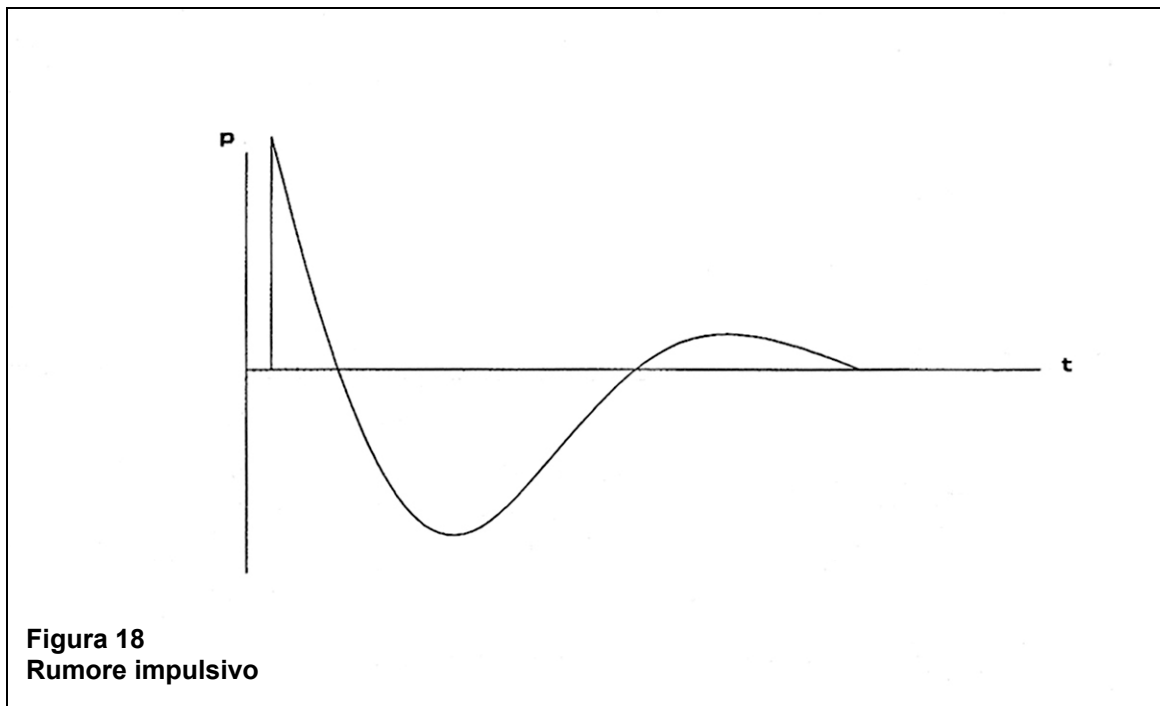
Il rumore stazionario (continuo) ha il livello sonoro e lo spettro acustico costanti (fig. 16), eccetto trascurabili fluttuazioni di livello. Ne è un esempio il rumore in un reparto di filatura.



Il rumore intermittente (non stazionario) è caratterizzato da un alternarsi di numerose fasi di rumore, aventi ciascuna un livello ed uno spettro acustico differenti (fig. 17). Un caso del genere può verificarsi dall'esercizio alternato di più macchine o da diverse condizioni di funzionamento di una macchina. Esempio: una motosega a marcia folle, a pieno gas e durante il taglio.



Il rumore impulsivo consiste in impulsi di energia sonora di breve durata e con picchi di pressione sonora elevati, come ad esempio colpi, detonazioni (fig. 18) o esplosioni. Quali esempi estremi, siano citati quelli dei colpi emanati dalle armi da fuoco, in grado di raggiungere un livello di pressione sonora superiore a 150 dB entro un millesimo di secondo e aventi solo una durata di alcune frazioni di secondo.



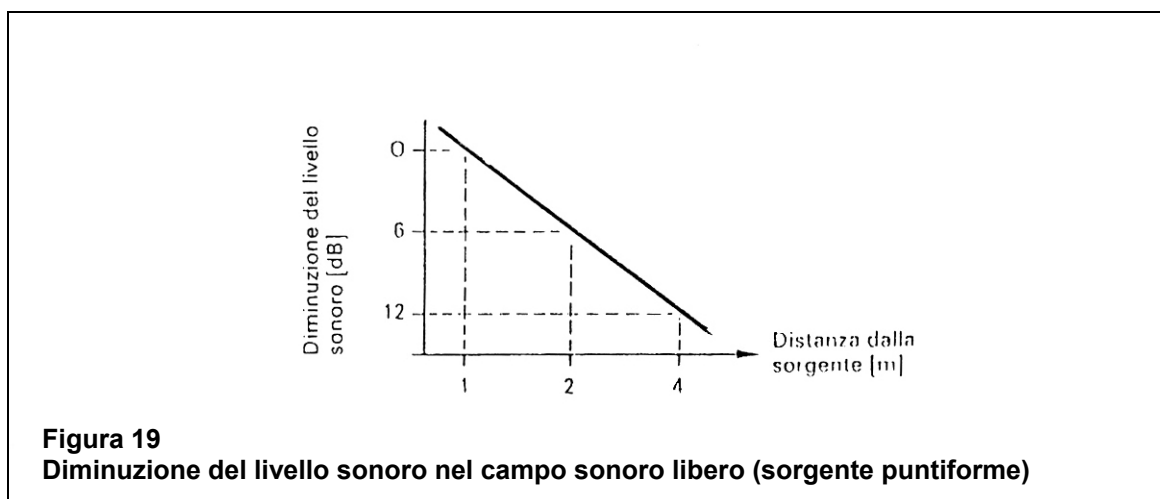
13. Campo sonoro

All'aperto il livello sonoro generato da una sorgente acustica si attenua proporzionalmente all'aumentare della distanza dal centro di propagazione del suono. Al contrario, la musica dell'organo è udibile praticamente con la medesima intensità sotto l'intera navata di una chiesa. Da questi esempi è possibile dedurre che l'ambiente esercita un influsso sulla distribuzione spaziale del livello sonoro

13.1 Campo sonoro libero

Se le superfici limite dovessero mancare o assorbire efficacemente il suono, allora l'ascoltatore verrebbe raggiunto esclusivamente dal suono diretto. E' ciò che accade, per esempio, in montagna - specialmente con terreno ricoperto di neve - oppure in un locale afono o povero di riflessioni.

Alla presenza di un simile campo sonoro libero, la pressione sonora di una sorgente acustica si dimezza ad ogni raddoppio della distanza, di modo che il livello sonoro diminuisce ogni volta di 6 dB (fig. 19).



Tuttavia, il livello sonoro segue un tale andamento unicamente se la dimensione massima della sorgente acustica risulta essere di tre volte più piccola della distanza di misurazione, così che l'ascoltatore la percepisce come una sorgente puntiforme.

Il livello sonoro rimane costante finché la distanza di misurazione è di tre volte inferiore alle due dimensioni della superficie riflettente il rumore (sorgente piana: per esempio facciate di fabbriche). Se la sorgente acustica risulta essere in una delle sue dimensioni di tre volte più grande della distanza di misurazione, allora il livello sonoro diminuisce di 3 dB ad ogni raddoppio della distanza di misurazione (sorgente lineare: per esempio autostrada a traffico intenso).

Indipendentemente da queste diminuzioni di livello, legate all'ottica geometrica, gli smorzamenti proporzionali alla distanza dalla sorgente sonora hanno un influsso sul livello acustico, specialmente nelle alte frequenze (dell'ordine di grandezza di ca. 20 - 30 dB/km a 4 kHz). Ciò spiega perché durante un temporale si sente da lontano soltanto un rimbombo cupo, mentre un fulmine che cade nelle vicinanze è accompagnato da un tuono forte e secco.

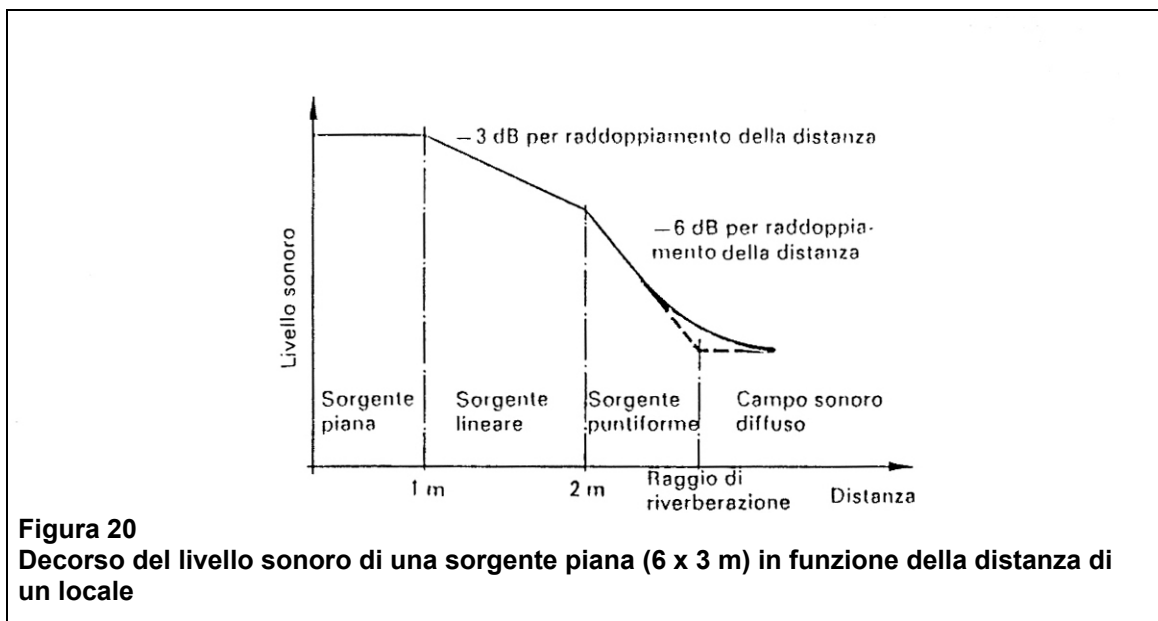
13.2 Campo sonoro diffuso

La condizione per ottenere un campo sonoro diffuso è la presenza di superfici limite in grado di riflettere nell'ambiente la maggior parte del suono incidente. Le riflessioni consistono in un gran numero di onde provenienti da direzioni diverse, e si succedono così rapidamente nel tempo da non poter essere udite come echi distinti l'uno dall'altro. Il fenomeno delle riflessioni multiple è noto col nome di **riverberazione**, fenomeno che si estingue in modo graduale e più o meno rapido al cessare dell'emissione dovuta ad una data sorgente sonora. Il **tempo di riverberazione** è il tempo che intercorre tra l'istante in cui viene esclusa la sorgente sonora e l'istante in cui il livello sonoro è diminuito di 60 dB, ed è una delle caratteristiche fondamentali dell'acustica architettonica. Come menzionato al paragrafo "Onde sonore e propagazione sonora", in generale l'assorbimento acustico è funzione della frequenza. Il tempo di riverberazione viene perciò indicato, il più delle volte, per ogni banda d'ottava (ordine di grandezza dei tempi di riverberazione alle medie frequenze: stanza di soggiorno circa 0,5 sec; sala concerti 1- 2 sec; cattedrale 4 - 8 sec).

Nella cosiddetta **camera riverberante** si ottiene un ideale campo sonoro diffuso. Grazie a pareti oblique e convesse, vengono evitate concentrazioni acustiche spaziali, così che la pressione sonora rimane prevalentemente costante nell'intero locale.

13.3 Campo sonoro nei locali chiusi (civili ed industriali)

I locali hanno l'effetto di provocare il sovrapporsi dei due campi sonori, quello libero e quello diffuso. Vicino alla sorgente acustica prevale il suono diretto. Il decorso del livello sonoro in funzione della distanza, si basa quindi sulle dimensioni della sorgente ed è influenzato solo in minima parte dalle proprietà acustiche dell'ambiente. Al contrario, a maggiore distanza dalla sorgente acustica, prevale il suono indiretto (riflesso). Il livello sonoro è praticamente indipendente dal punto di misurazione, ma può però essere attenuato da un aumento dell'assorbimento acustico delle pareti. La distanza alla quale i suoni diretti e i suoni diffusi hanno lo stesso livello, si chiama **raggio di riverberazione** (fig. 20).



14. Assorbimento acustico

In qualunque spazio si propaghi, un'onda acustica è soggetta ad assorbimento. Questo si distingue in:

- **assorbimento del mezzo di propagazione**, che è trascurabile in ambienti chiusi;
- **assorbimento superficiale** che si produce quando un'onda colpisce una superficie, venendone in parte riflessa, ed in parte assorbita. Nel locale chiuso l'assorbimento si verifica su tutte le superfici che lo delimitano.

L'assorbimento è espresso attraverso il rapporto fra la parte di energia sonora che viene assorbita e l'energia totale incidente. Tale parametro, viene chiamato coefficiente d'assorbimento α , ha sempre valore inferiore ad 1 ed è tanto più piccolo quanto più riflettente è la superficie.

I principi attraverso cui un sistema assorbe energia sonora sono diversi e vengono generalmente suddivisi in tre classi:

- Assorbimento per porosità (lana di roccia TERVOL)
- Assorbimento per risonanza di cavità (pannello forato)
- Assorbimento per risonanza di pannello (membrana)

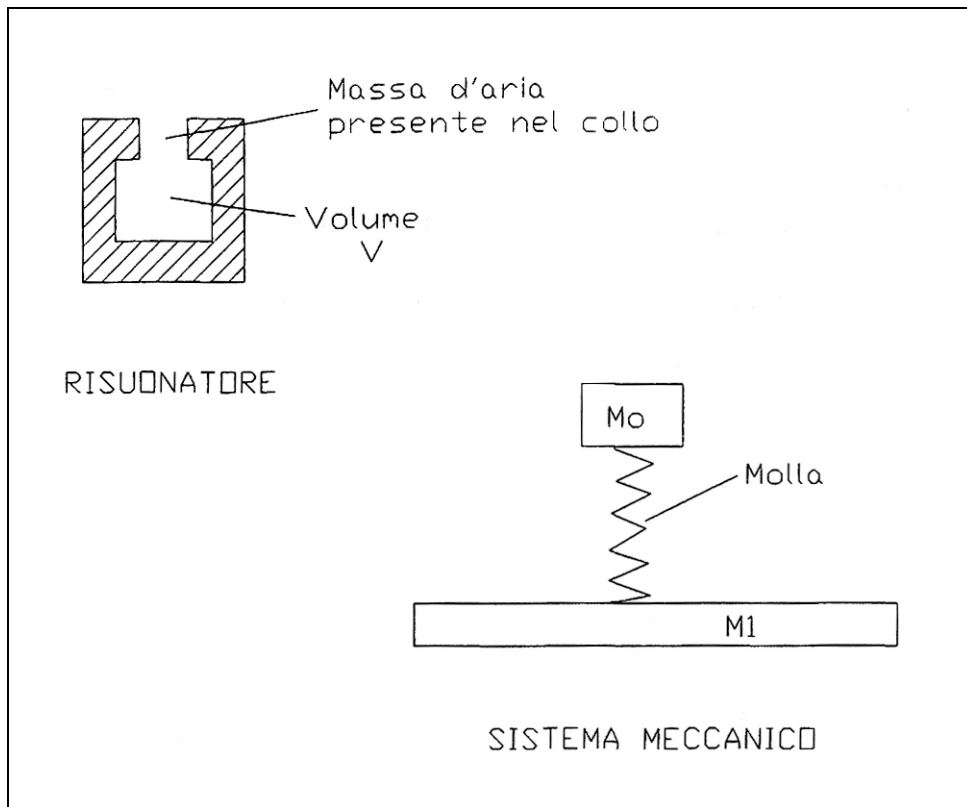
14.1 Assorbimento per porosità

Questo è il caso dei pannelli in lana di roccia TERVOL, perché hanno la capacità di trasformare l'energia sonora incidente in calore per attrito, all'interno delle microcavità tra fibra e fibra.

Con pannelli in lana di roccia TERVOL, si ottengono valori α di assorbimento acustico più alti alle alte frequenze. Nei pannelli TERVOL, all'aumentare dello spessore, α è crescente alle basse frequenze ed in misura poco significativa alle alte frequenze.

14.2 Assorbimento per risonanza di cavità

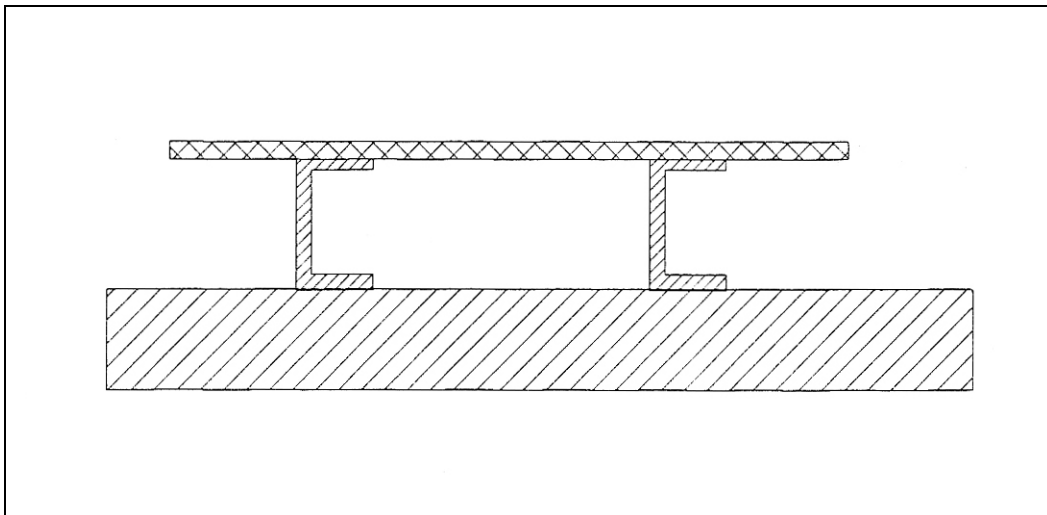
L'effetto del fonoassorbimento è in questo caso fondato sul principio di Helmholtz (la massa d'aria contenuta nei vari fori del pannello costituisce con il volume d'aria dell'intercapedine retrostante un sistema meccanico del tipo massa - molla - massa, dotato quindi di una propria frequenza di risonanza).



Con questo sistema si può selezionare l'assorbimento acustico su una particolare frequenza: lo si può rendere meno selettivo, inserendo appositi pannelli fonoassorbenti in lana di roccia TERVOL.

14.3 Assorbimento per risonanza di pannello

E' il caso tipico dell'utilizzo di un pannello semirigido posto ad una determinata distanza da una parete, il quale entra in risonanza quando è sollecitato da onde acustiche ed assorbe energia acustica in corrispondenza alla frequenza propria del sistema.



Anche questo sistema è molto selettivo, ideale per assorbire basse frequenze, dove i pannelli fonoassorbenti sono poco efficaci.

Come scegliere i materiali fonoassorbenti.

La scelta dei materiali da adottare per risolvere un problema di assorbimento acustico è legata principalmente alle buone caratteristiche di fonoassorbimento del materiale stesso, ma devono essere tenute in considerazione anche le seguenti caratteristiche:

- un buon materiale fonoassorbente non deve modificare le sue caratteristiche nel tempo;
- alcuni materiali risentono dell'invecchiamento, dovuto all'umidità, ai fumi e alle polveri;
- altra caratteristica importante al fine di garantire la durata nel tempo del materiale è la sua resistenza meccanica;
- un materiale fonoassorbente, deve essere incombustibile o autoestinguente;
- tutti i materiali fonoassorbenti utilizzati a vista (controsoffitti, tendaggi ecc..) devono essere lavabili, e per un migliore risultato estetico dovrebbero avere la possibilità di essere colorati.

I pannelli fonoassorbenti in lana di roccia TERVOL sono i più utilizzati nelle realizzazioni acustiche.

La struttura fibrosa della lana di roccia, presenta una grande quantità di piccoli interstizi tra loro comunicanti. L'onda sonora incidente si propaga nell'aria contenuta nel materiale, cui consegue una trasformazione dell'energia sonora in energia termica (calore) per attrito.

I pannelli in lana di roccia TERVOL sono senza dubbio i prodotti fonoassorbenti più utilizzati sia nell'industria che nell'edilizia, perché presentano molti vantaggi, tra cui:

- TERVOL è classificato come materiale **Non Combustibile** (A1 secondo le ristrette norme tedesche DIN 4102, e MO secondo le normative francesi).
- TERVOL è un ottimo materiale termoisolante perché ha un basso coefficiente di conducibilità termica) $\lambda = 0.035 - 0.040$ (W/mK) ed è in grado di resistere a temperature di oltre 700 °C.
- TERVOL è uno dei pochi materiali isolanti che nominalmente viene utilizzato nella costruzione delle navi, perché soddisfa le elevate esigenze meccaniche; acustiche, tecniche e della resistenza al fuoco richieste per questa applicazione.

15. Tempo di riverberazione T

Quando si interrompe bruscamente l'emissione di un suono da parte di una sorgente sonora posizionata all'interno di un ambiente chiuso, si rileva che il livello sonoro non scende immediatamente a valori nulli, ma decresce più o meno lentamente.

Questo fenomeno è dovuto alla presenza di onde riflesse che continuano a rimbalzare da una superficie all'altra, determinando la persistenza di un livello sonoro via via decrescente.

Il **tempo di riverberazione T**, espresso in secondi, è il tempo che intercorre fra il disinserimento della sorgente sonora e il momento in cui il livello sonoro è diminuito rispettivamente di un milionesimo del suo valore iniziale o di 60 dB e rappresenta il parametro della risonanza di un locale. L'entità del tempo di riverberazione dipende dall'assorbimento ambientale.

Tempo di riverberazione

I valori indicativi per i tempi di riverberazione vengono indicati come tempi di riverberazione ottimali e dipendono dalle frequenze. Grazie a questi valori è possibile valutare la qualità acustica ambientale di un locale. Nel caso più favorevole, i tempi di riverberazione di un locale si trovano entro la zona ottimale; al riguardo sono ammissibili piccole tolleranze in più o in meno (0.1 - 0.2 sec.). I tempi di riverberazione vengono indicati per le frequenze di 1.000 - 4.000 Hz nelle quali essi rimangono costanti. Per le frequenze più basse, i valori della tabella 8 sono convertiti nel modo seguente:

T a 500 Hz:	T secondo tabella x 1.1
T a 250 Hz:	T secondo tabella x 1.3
T a 125 Hz:	T secondo tabella x 1.55

Nella pratica i valori indicativi possono essere quelli della tabella 8

Tipo di locali	T in secondi
<i>Edifici amministrativi</i>	
ufficio singolo	0.6 - 1.0
ufficio piccolo	0.6 - 0.8
ufficio medio	0.6 - 0.8
ufficio grande	0.4 - 0.6
Locali elaboratori elettronici, centrali telefoniche	0.4 - 0.6
Corridoi	0.8 - 1.0
Trombe delle scale	1.0 - 1.5
Mense e sale ristoro	0.6 - 0.8
Capannoni di fabbricazione, a seconda del particolare scopo d'uso del locale sono possibili deviazioni dei valori indicativi	
V < 1.000 m ³	0.6 - 1.0
V > 1.000 - 5.000 m ³	0.7 - 1.2
V > 5.000 - 20.000 m ³	0.8 - 1.4
V > 20.000 m ³	1.0 - 1.5
Locali riscaldamento	0.5 - 0.7
Centrale aria condizionata	0.5 - 0.7
Locali pompe	0.5 - 0.7

Tabella 8 - Valori indicativi per i tempi di riverberazione