

STRUTTURA FISICA DELLE ONDE SONORE

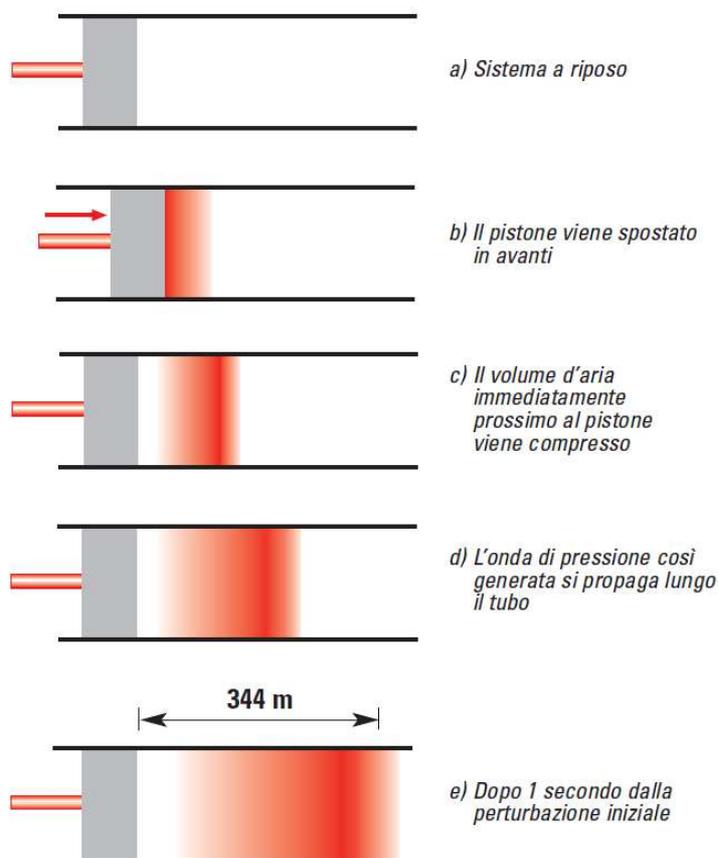
Il suono è un fenomeno fisico prodotto da una vibrazione meccanica in un mezzo di propagazione.

La vibrazione può essere prodotta da vari tipi di sorgente:

congegni in movimento (macchine o parti di macchine), da percussioni, impatti, esplosioni, da membrane, dalle nostre corde vocali.

Un modello semplificato di sorgente sonora può essere costituito da un pistone che, posto all'estremità di un tubo contenente aria, compie un movimento alternativo in senso longitudinale

Fig. 1 - Modello semplificato di generazione del suono



Durante la fase di spostamento in avanti si verifica una compressione dell'aria in prossimità della superficie del pistone; nella fase successiva di spostamento indietro si avrà una decompressione, ma nel frattempo le particelle dell'aria compressa nella prima fase avranno trasmesso il loro movimento agli strati successivi.

Continuando il movimento alternativo del pistone si genera quindi all'interno del tubo una successione continua di pressioni e di depressioni dell'aria, regolarmente intervallate, che vengono definite onde sonore.

Le onde sonore sono caratterizzate in base alla **frequenza**, ossia al numero di compressioni e decompressioni che si verificano nell'unità di tempo, alla **lunghezza d'onda** intesa come distanza fra due successive compressioni, alla **velocità di propagazione** che è strettamente correlata alle due precedenti quantità. Si deve infine considerare l'**ampiezza delle onde sonore**, intesa come variazione della pressione dell'aria rispetto alla condizione di riposo, ossia alla normale pressione atmosferica. **Tale ampiezza viene definita pressione sonora.**

VELOCITA' DEL SUONO

Il tempo che le particelle impiegano per trasmettere il loro movimento agli strati successivi dipende dalla velocità di propagazione, che a sua volta dipende dalla massa e dalla elasticità del mezzo.

Per l'aria, nell'ipotesi che questa agisca come gas ideale, si può dimostrare che la velocità (c) di propagazione dipende soltanto dalla sua temperatura assoluta:

$$c = 332 \sqrt{1 + \frac{T}{273}} \quad [\text{m/s}]$$

Con $T =$ temperatura dell'aria in °C

Alla temperatura ambiente di 20 °C si ha pertanto una velocità di propagazione pari a **344 m/s**.

La propagazione del suono, intesa come successione di pressioni e di decompressioni, può avvenire anche in altri mezzi elastici.

Si riporta in tabella 1 la velocità di propagazione di alcuni materiali utilizzati nelle costruzioni, che può essere utile nello studio delle proprietà acustiche dei materiali stessi.

Tab. 1 - Velocità di propagazione del suono per alcuni materiali

MATERIALE	VELOCITÀ DI PROPAGAZIONE [m/s]
Muratura di mattoni pieni	3000
Muratura di cemento	3400
Vetro	4900
Alluminio	5100
Acciaio	5200
Piombo	1220
Gesso	2200
Acqua	1400

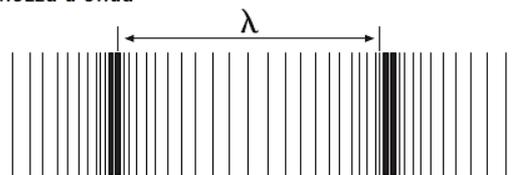
LUNGHEZZA D'ONDA E FREQUENZA

Sempre facendo riferimento all'esempio di figura 1, con un movimento regolarmente ciclico del pistone si ha una successione di onde equi distanziate.

Per lunghezza d'onda λ si intende la distanza fra due massimi di pressione (o fra due minimi), in altri termini la distanza percorsa dall'onda sonora durante un'oscillazione completa.

Questa distanza sarà tanto maggiore quanto più sarà lento il movimento del pistone e viceversa.

Fig. 2 - Lunghezza d'onda



Nel campo dell'udibile varia tra circa 17 m (corrispondenti a 20 Hz) e 17 mm (corrispondenti a 20000 Hz).

L'evidente interdipendenza fra queste grandezze è espressa dalle seguenti relazioni:

$$c = \lambda f \quad [\text{m/s}]$$

$$\lambda = c/f \quad [\text{m}]$$

$$f = c/\lambda \quad [\text{Hz}]$$

Con:

c velocità di propagazione del mezzo

λ lunghezza d'onda

f frequenza del fenomeno

Poiché lunghezza d'onda e frequenza sono inversamente proporzionali, ad alte frequenze corrispondono lunghezze d'onda piccole e viceversa.

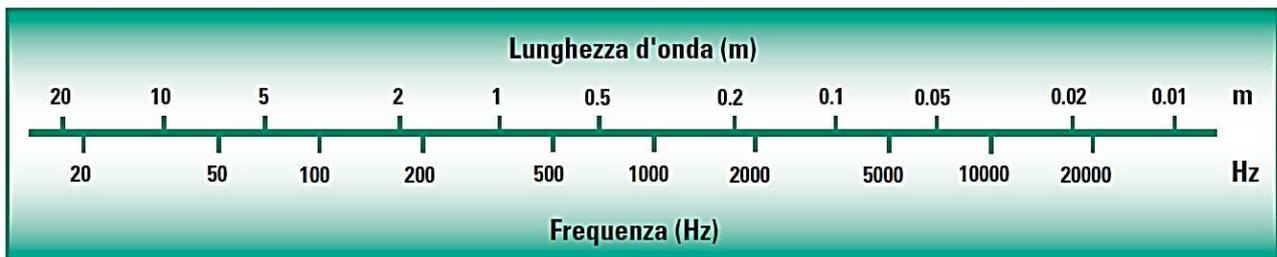
La frequenza f esprime quindi la misura fisica del numero di oscillazioni che si verificano nell'unità di tempo ed ha per unità di misura l'Hertz (simbolo Hz): $1 \text{ Hz} = 1/\text{s}$, ossia l'inverso di 1 s.

Il campo di valori percepibili dall'orecchio umano varia tra circa 20 Hz e 20000 Hz (come esemplificato in tabella 2).

Tab. 2 - Campo delle frequenze per alcuni suoni

SUONO	FREQUENZA [Hz]
La nota più bassa di un pianoforte	27,5
La nota più bassa di un cantante basso	100
La nota più bassa di un clarinetto	104,8
Il DO centrale del pianoforte	261,6
Il LA oltre il DO centrale	440
L'estensione superiore di un soprano	1000
La nota più alta di un pianoforte	4180
L'armonica superiore degli strumenti musicali	10000
Il limite dell'udito nelle persone anziane	12000
Il limite dell'udito	16000-20000

Fig. 3 - Corrispondenza tra frequenza e lunghezza d'onda



Per il suono che si propaga nell'aria alla temperatura di 20 °C il nomogramma di figura 3 riporta la corrispondenza fra frequenza e lunghezza d'onda.

Le relazioni sopra riportate sono molto importanti nello studio del comportamento acustico dei materiali, fondamentalmente legato alla frequenza del suono e alla sua lunghezza d'onda.

PRESSIONE SONORA

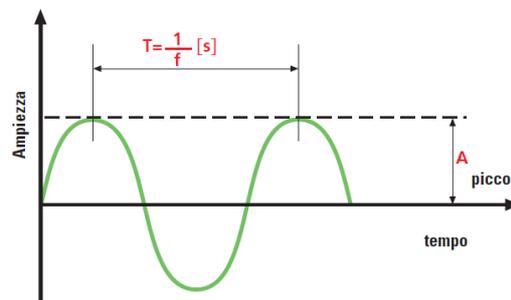
Come già si è detto, per pressione sonora si intende la variazione della pressione dell'aria attorno al suo valore di riposo. Comparata al valore assoluto di quest'ultimo tale variazione può anche essere estremamente piccola:

a fronte di un valor medio della pressione atmosferica di 100 kPa si possono avere pressioni sonore udibili dell'ordine di qualche decina di μPa .

La gamma delle pressioni attribuibili ai fenomeni sonori che si possono verificare per cause naturali o artificiali, si estende verso l'alto fino a valori dell'ordine di qualche centinaio di Pa.

Essendo il fenomeno sonoro di tipo oscillatorio, la pressione sonora deve essere espressa in termini rappresentativi dell'ampiezza della sua variabilità in entrambi i sensi: positivo e negativo (Fig. 4).

Fig. 4 - Pressione sonora in funzione del tempo (fenomeno sinusoidale)



INTENSITA' E POTENZA SONORA

Essendo il suono costituito da una successione di onde di pressione che si allontanano dalla sorgente, si ha nel corso della propagazione una trasmissione di energia al mezzo.

In un campo sonoro dovuto all'attività di una sorgente, l'energia che attraversa l'unità di area nell'unità di tempo è definita intensità sonora (**I**) e viene espressa in W/m^2 .

In condizioni di campo libero l'intensità **I** è legata alla pressione sonora **p** dalla relazione:

$$I = \frac{p^2}{\rho c} \quad [\text{W}/\text{m}^2]$$

in cui

ρ è la densità dell'aria kg/m^3

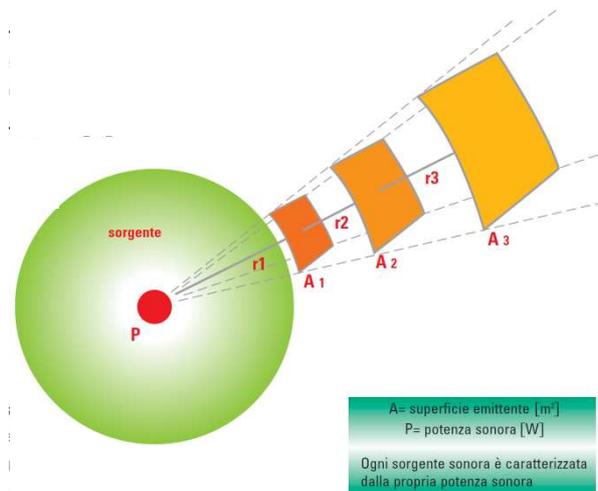
c è la velocità del suono nell'aria m/s .

Il prodotto $\rho \cdot c$ rappresenta l'impedenza specifica dell'aria.

Nel caso semplificato di una sorgente ad emissione sferica, la potenza sonora **P** sarà data dall'espressione:

$$P = I \cdot A = \frac{p^2}{\rho c} \cdot 4 \pi r^2 \quad [\text{W}]$$

in cui r è il raggio della sfera di emissione, in metri, sulla superficie della quale si misura l'intensità **I** (vedi figura che segue).



La **potenza sonora** di una sorgente rappresenta, per così dire, **la causa che produce il fenomeno sonoro** mentre **la pressione sonora rappresenta gli effetti**.

La conoscenza della potenza sonora di macchine e di ogni altro tipo di sorgente è molto importante in tutti i problemi connessi con il controllo del rumore.

UNITA' DI MISURA

Per esprimere in termini quantitativi le caratteristiche del fenomeno sonoro descritte nei paragrafi precedenti, si potrebbero utilizzare direttamente le relative grandezze:

- Pascal (Pa) per la pressione sonora
- Watt (W) per la potenza sonora
- Watt per metro quadrato (W/m²) per l'intensità sonora.

Occorre fare a questo proposito due considerazioni:

- in termini quantitativi, una scala lineare risulta estremamente vasta: rammentando quanto detto in precedenza, la gamma delle pressioni sonore che rientrano nel campo uditivo ha gli estremi il cui rapporto è prossimo a 1:100.000.000; sotto questo aspetto l'uso di una scala risulterebbe alquanto scomodo
- il nostro meccanismo uditivo ha una risposta agli stimoli sonori che, in termini grossolani, può definirsi più vicina alla scala logaritmica che a quella lineare.

Convenzionalmente si è ritenuto più idoneo rappresentare il fenomeno sonoro con una scala logaritmica.

Per la pressione è stata assunta una quantità di riferimento che corrisponde alla soglia di percezione di un orecchio normale alla frequenza di 1000 Hz; tale quantità vale 2×10^{-5} Pa.

È stato quindi definito come livello di pressione sonora L_p da esprimere in decibel (dB), il valore che si ottiene dall'espressione:

$$L_p = 10 \log \frac{p^2}{p_0^2} \quad [\text{dB}]$$

in cui:

- p è la pressione sonora misurata (Pa)
- p_0 è la pressione sonora di riferimento, pari a 2×10^{-5} Pa

L'espressione precedente può anche scriversi così:

$$L_p = 20 \log \frac{p}{p_0} \quad [\text{dB}]$$

È importante sottolineare che il dB sostanzialmente non rappresenta l'unità di misura del rumore, ma esprime il livello di pressione sonora in scala logaritmica!

Parte della letteratura riporta che la scala delle pressioni sonore e quindi dei dB varia da 0 a 140 dB, infatti:

se $p = p_0 = 2 \times 10^{-5} \text{ Pa}$	$L_p = 0 \text{ dB}$	SOGLIA DI UDIBILITA'
se $p = 2 \times 10^2 \text{ Pa}$	$L_p = 140 \text{ dB}$	SOGLIA DEL DOLORE

Si consideri ora l'esempio seguente che mira ad illustrare meglio il concetto di livello di pressione sonora.

ESEMPIO

Supponiamo di considerare una pressione sonora p_1 pari a $2 \times 10^{-1} \text{ Pa}$

A tale pressione sonora corrisponde un livello di pressione sonora:

$$L_{p1} = 20 \log \frac{2 \times 10^{-1}}{2 \times 10^{-5}} = 80 \quad [\text{dB}]$$

Se consideriamo ora una pressione sonora doppia p_2 pari a $4 \times 10^{-1} \text{ Pa}$ avremo un livello di pressione sonora:

$$L_{p2} = 20 \log \frac{4 \times 10^{-1}}{2 \times 10^{-5}} = 86 \quad [\text{dB}]$$

Questo semplice esempio dimostra che **ad ogni raddoppio o dimezzamento della pressione sonora corrisponde un aumento o una riduzione del livello di pressione sonora pari a 6 dB** e che pertanto quando si richiede di ridurre la trasmissione del rumore da un ambiente a quello confinante anche di pochi dB, questo in termini numerici corrisponde ad una sensibile diminuzione della pressione sonora!

Analogamente con quanto espresso per il livello di pressione sonora, sono state stabilite le seguenti altre quantità di riferimento:

- per l'intensità sonora: $I_o = 10^{-12} \frac{W}{m^2}$
- per la potenza sonora: $P_o = 10^{-12} W$

Per cui si hanno i seguenti livelli relativi:

- Livello di intensità sonora:

$$L_1 = 10 \log \frac{I}{I_0} \quad [\text{dB}]$$

- Livello di potenza sonora:

$$L_w = 10 \log \frac{P}{P_0} \quad [\text{dB}]$$

La figura 6 riporta le pressioni e i relativi livelli sonori dovuti a eventi comunemente verificabili, con i relativi indici di percezione soggettiva.

Occorre osservare che gli effetti dell'esposizione umana al rumore dipendono da numerosi fattori, quali le caratteristiche di intensità media, durata e tipologia dello stimolo sonoro, intendendo per tipologia le caratteristiche del rumore legate alla sua composizione spettrale e all'evoluzione nel tempo della pressione sonora istantanea (ad esempio caratteristiche tonali in bassa frequenza, caratteristiche impulsive, a tempo parziale, ecc.).

Gli indici di percezione sono inoltre influenzati dalla reazione soggettiva dell'individuo, dalla durata dello stimolo sonoro, dalla tipologia del rumore e dal periodo, diurno o notturno, di esposizione.

Fig. 6 - Livello di pressione sonora di alcuni eventi ricorrenti

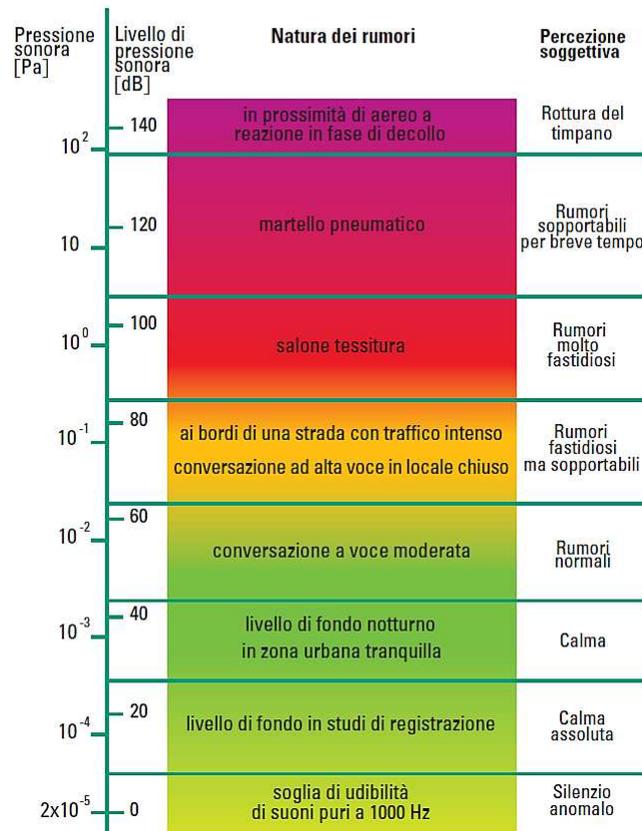
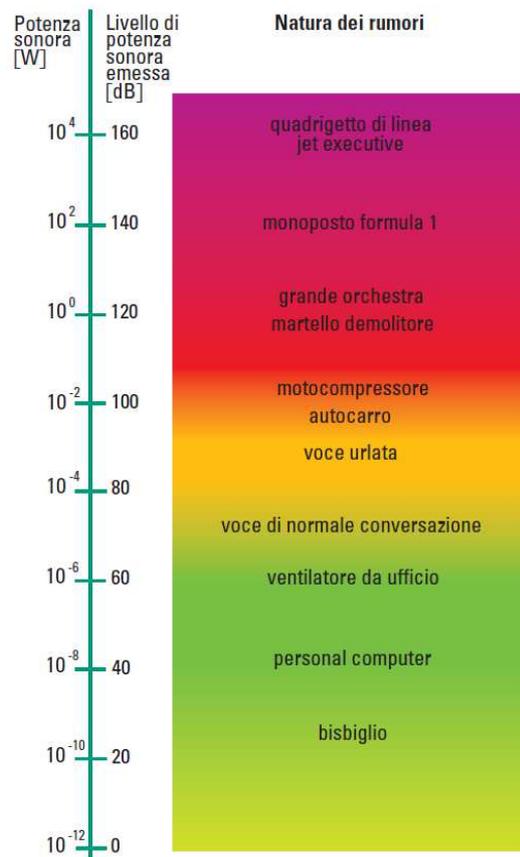


Fig. 7 - Livello di potenza sonora emessa da alcune macchine



SPETTRO DI FREQUENZA

Il fenomeno sonoro dovuto al movimento del pistone, precedentemente illustrato nella figura 1 di pag. 1, ha nel tempo un andamento sinusoidale costante se il movimento è prodotto da un congegno ciclico (biella e manovella) a velocità costante.

Nella pratica comune è possibile ma non molto frequente il verificarsi di fenomeni di quel tipo.

Sono più usuali segnali con forme d'onda più o meno complesse, di tipo periodico o di tipo casuale.

La caratterizzazione di tali segnali, utile per avere una informazione per così dire "timbrica" del suono (in altri termini per capire la sua voce) si ottiene dallo spettro di frequenza.

L'analisi di frequenza di un segnale sonoro consiste nella misura dell'entità delle sue componenti entro la gamma udibile.

In pratica, si misura l'energia che passa attraverso filtri la cui larghezza di banda varia a seconda della finezza richiesta dall'analisi.

L'analisi può essere di tipo sequenziale ed in questo caso si effettuano misure successive, filtro dopo filtro.

Può invece avvenire in tempo reale ed in questo caso i filtri sono posti in parallelo e forniscono contemporaneamente l'indicazione del loro contenuto, in forma tabellare e/o grafica.

Quest'ultimo tipo di analisi è oggi il più praticato, dato il notevole progresso tecnologico che si è avuto nella strumentazione.

IL MECCANISMO UDITIVO

L'apparato uditivo umano è rappresentato schematicamente in figura 8.

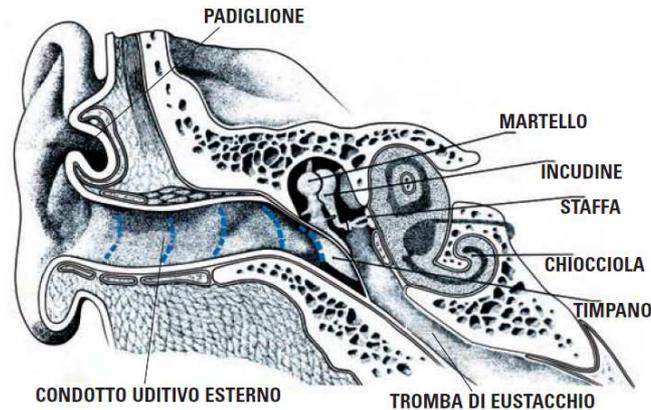
In modo sintetico il suo funzionamento avviene nel modo che segue.

L'onda sonora giunge al padiglione e viene trasmessa come fluttuazione di pressione lungo il condotto uditivo alla cui estremità si trova la membrana timpanica. Questa viene posta in vibrazione; attraverso la catena dei tre ossicini la

vibrazione viene trasmessa lungo l'orecchio medio alla finestra ovale e quindi alla coclea che contiene l'organo di Corti. È da qui che ha origine lo stimolo che, attraverso il nervo acustico, perviene al cervello.

L'apparato uditivo si comporta in pratica come uno strumento di misura: intercetta i segnali sonori, ne valuta l'ampiezza, ne analizza lo spettro di frequenza, ne individua il contenuto d'informazione.

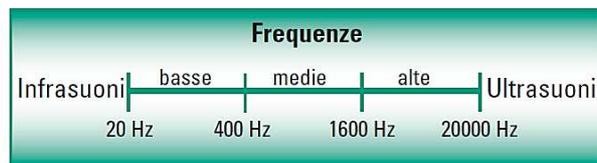
Fig. 8 - Apparato uditivo



RISPOSTA IN FREQUENZA

L'orecchio umano presenta una capacità di percezione in una gamma di frequenza compresa mediamente fra 20 Hz e 20.000 Hz (Fig. 9)

Fig. 9 - Campo di variabilità delle frequenze



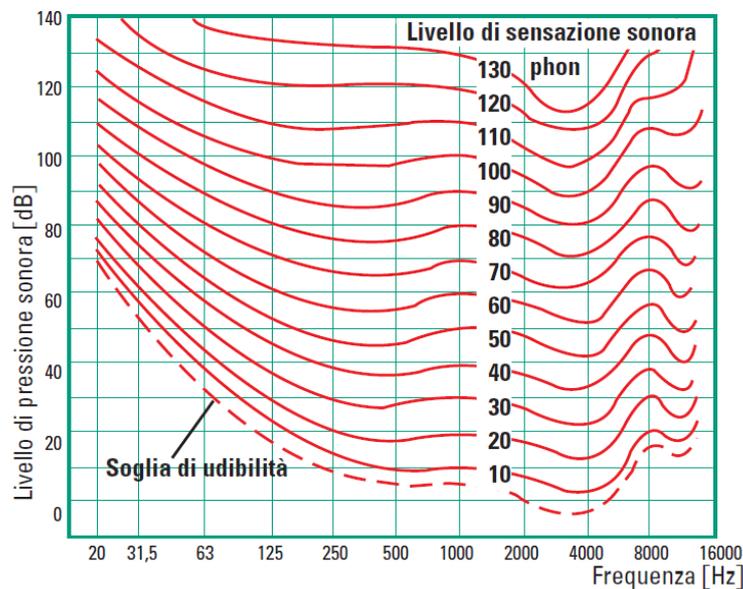
Segnali di frequenza al di sotto dei limiti inferiori sono definiti infrasuoni e possono ancora essere percepiti dall'uomo ma non per via uditiva: altre parti del corpo sono in grado di avvertire il fenomeno attraverso la vibrazione che si propaga nell'aria. Oltre i 20.000 Hz si entra nel campo degli ultrasuoni, non più percepiti dall'uomo.

SENSAZIONE

La percezione del suono da parte dell'apparato uditivo segue leggi alquanto complesse e dipende fortemente dall'intensità e dalla frequenza del suono percepito; a parità di pressione sonora infatti l'intensità della sensazione uditiva varia in funzione della frequenza.

A tal fine sono state messe a punto e normalizzate delle curve di uguale livello di intensità soggettiva, dette "curve isofoniche" (Fig. 10), che descrivono il modo in cui i suoni vengono percepiti con lo stesso "volume" sonoro al cambiare della loro frequenza e intensità.

Fig. 10 - Curve isofoniche

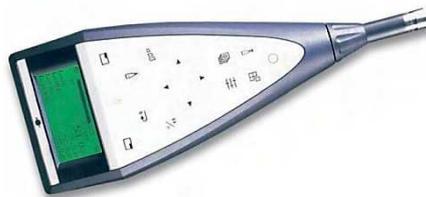


Tali curve sono rappresentate in un grafico specifico che riporta in ascisse la frequenza in Hertz, in ordinata la pressione sonora in dB puri e presenta diverse curve, una per ogni volume sonoro percepito, misurato in “phon”.

Un aspetto interessante da osservare è la maggiore sensibilità presente tra i 1000 e i 5000 Hz: in questa banda di frequenza è concentrata buona parte del contenuto informativo del parlato e il nostro udito si è adeguato e sviluppato di conseguenza.

I dati fisici rilevati dagli strumenti non si correlano direttamente con la sensazione uditiva di percezione del suono. Il caso più noto è quello del fonometro che misura il livello di pressione sonora; la sua funzione principale è quella di convertire un segnale acustico variabile nel tempo in un valore numerico che esprime il livello di pressione (Fig. 11).

Fig. 11 - Esempio di fonometro

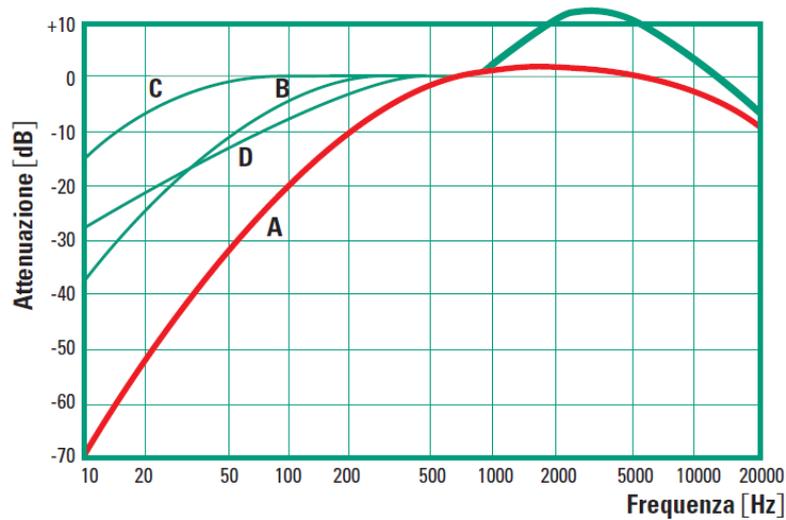


Il livello rilevato dallo strumento non corrisponde esattamente a quello che viene percepito dall’orecchio umano.

Ecco perché si sono rese necessarie delle curve di ponderazione di vario genere, in grado di riportare i valori registrati dallo strumento alla percezione umana.

Ai fini della valutazione del disturbo uditivo, la curva di ponderazione normalmente impiegata è la curva A (costruita in base alla isofonica a 40 phon); in altri settori, quali quello aeronautico, navale, ecc. vengono utilizzate altre curve (ad esempio, le curve B e C sono costruite rispettivamente in base alle isofoniche a 70 phon e 100 phon) (Fig. 12).

Fig. 12 - Curve di ponderazione



Ecco perché nel caso di misure effettuate in edilizia il fonometro viene tarato sulla scala di ponderazione A che tiene conto appunto dell’andamento medio della risposta in frequenza dell’orecchio e pertanto il livello di pressione sonora viene indicato con i dB(A).

I dB(A) sono utilizzati anche in tutti i recenti documenti legislativi che si occupano dell’inquinamento acustico.

E’ possibile passare dai dB ai dB(A) mediante opportuni fattori di conversione indicati nella tabella seguente (Tab. 3).

Tab. 3 - Fattori di conversione dai dB ai dB(A)

FREQUENZA [Hz]	LPS [dB]	FATTORE DI PONDERAZIONE SCALA A	LPS [dB(A)]
31,5	72	-39,4	32,6
63	78	-26,2	51,8
125	79	-16,1	62,9
250	66	-8,6	57,4
500	64	-3,2	60,8
1000	62	0	62
2000	46	+1,2	47,2
4000	47	+1,0	48
8000	48	-1,1	46,9
16000	36	-6,6	29,4

E’ importante osservare che alla frequenza di 1000 Hz il valore registrato dallo strumento corrisponde esattamente al valore percepito dall’uomo!

LA PROPAGAZIONE DEL RUMORE

La conoscenza delle leggi che governano il comportamento dell'energia sonora durante la sua propagazione è importante per vari motivi:

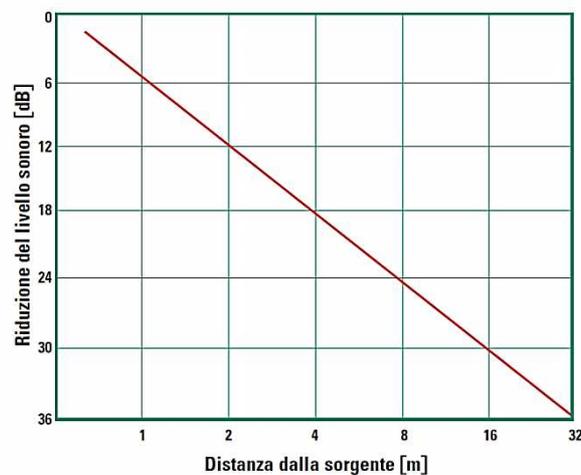
- consente di prevedere il livello di pressione sonora prodotto in un determinato ambiente e ad una determinata distanza da una sorgente di potenza sonora nota
- essendo noto il livello di pressione sonora prodotto in un punto, in una determinata situazione, consente di valutare quale livello si produce in punti e situazioni diversi per effetto del funzionamento della stessa sorgente sonora
- se l'energia sonora si propaga in mezzi diversi dall'aria, permette di valutare in una certa misura il comportamento acustico di tali mezzi (che potrebbero essere ad esempio i materiali da costruzione, intesi come ostacoli alla propagazione sonora).

PROPAGAZIONE ALL'ESTERNO

Il caso più elementare di propagazione è quello che avviene all'esterno, in campo libero e senza ostacoli, in assenza di vento.

Nella propagazione all'aperto, per sorgenti puntiformi, il livello di pressione sonora subisce un decremento di 6 dB ad ogni raddoppio di distanza (propagazione sferica) (Fig. 13).

Fig. 13 - Riduzione del livello di pressione sonora in funzione della distanza dalla sorgente



Per sorgenti lineari (ad es. linee di traffico) il decremento è di 3 dB ad ogni raddoppio di distanza (propagazione cilindrica).

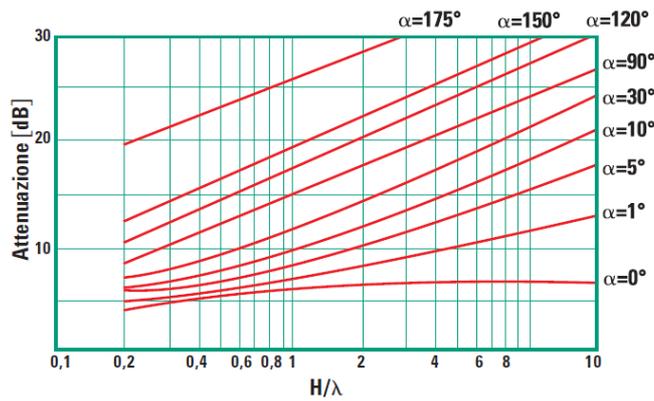
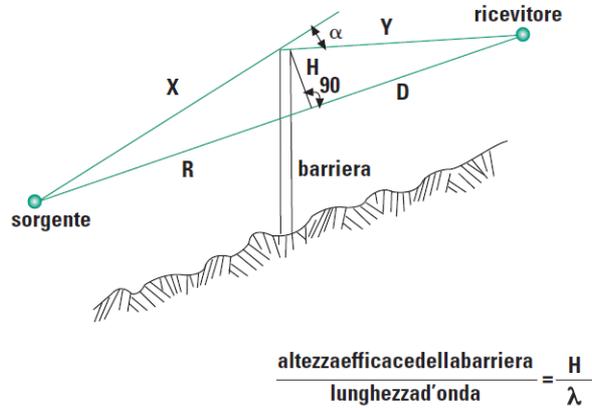
In realtà il fenomeno sonoro all'esterno può subire una serie di attenuazioni dovute alle condizioni ambientali, quali la presenza di barriere naturali o artificiali, di pioggia, neve o nebbia, le condizioni di temperatura nel mezzo di propagazione e/o di turbolenza (vento), le caratteristiche di assorbimento del mezzo di propagazione e del terreno, anche in presenza di eventuale vegetazione.

In questi casi per il calcolo della dissipazione dell'energia sonora si fa riferimento alle norme:

- UNI ISO 9613-1:2006 Attenuazione sonora nella propagazione all'aperto
Parte 1: Calcolo dell'assorbimento atmosferico;
- UNI ISO 9613-2:2006 Attenuazione sonora nella propagazione all'aperto
Parte 2: Metodo generale di calcolo.

A titolo di esempio, nel caso di barriere naturali o artificiali, le norme riportano un diagramma (Fig. 14), che consente di stimare il livello di attenuazione in funzione del rapporto tra altezza efficace della barriera e lunghezza d'onda.

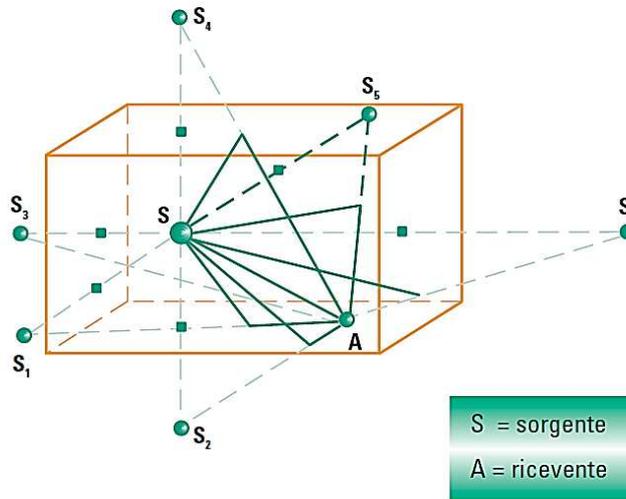
Fig. 14 - Presenza di barriere naturali o artificiali



PROPAGAZIONE IN AMBIENTI CHIUSI

Il livello di pressione sonora prodotto da una sorgente funzionante in un ambiente confinato, non dipende più soltanto dalla potenza sonora e dalla distanza, ma anche dal comportamento acustico delle superfici interne dell'ambiente. L'energia sonora emessa da una sorgente giungerà infatti al punto di ascolto sia per via diretta, sia per riflessione sulle superfici circostanti (Fig. 15).

Fig. 15 - Emissione e ricezione del suono



In forma generale, nell'ipotesi semplificativa di ambiente le cui tre dimensioni non sono molto diverse fra loro, si ha la seguente relazione:

$$L_p = L_w + 10 \log \left[\frac{Q}{4 \pi r^2} + \frac{4 (1-\alpha)}{S \alpha} \right] \text{ dB}$$

in cui:

Lp	livello di pressione sonora nel punto d'ascolto	dB	
Lw	livello di potenza sonora della sorgente	dB	
R	distanza dalla sorgente	m	
Q	fattore di direttività della sorgente nella direzione di r		adimensionale
α	coefficiente di assorbimento acustico medio delle superfici interne dell'ambiente		adimensionale
S	superficie totale interna dell'ambiente	m ²	

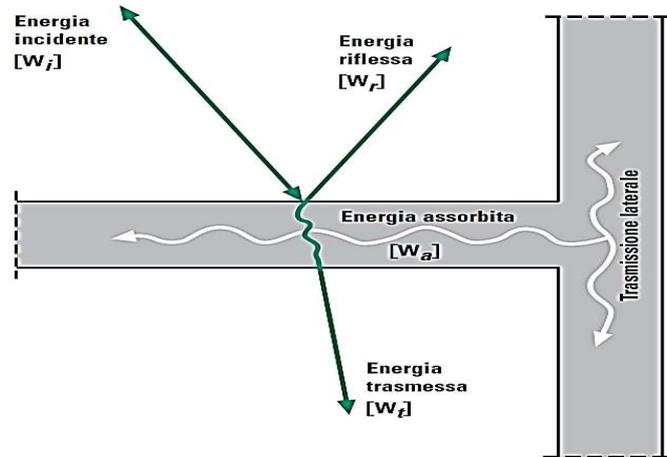
Il primo termine fra parentesi è relativo alla propagazione diretta, il secondo termine tiene conto delle caratteristiche acustiche dell'ambiente.

Questa espressione, definita del campo misto, è molto utile nelle applicazioni pratiche. Può consentire, ad esempio, di prevedere gli effetti di un trattamento fonoassorbente ambientale.

COMPORAMENTO DEL SUONO IN PRESENZA DI OSTACOLI

Quando l'energia sonora (Wi) incontra un ostacolo, costituito da un mezzo diverso da quello in cui si propaga, avviene un fenomeno di scomposizione (Fig.16)

Fig. 16 - Scomposizione dell'energia sonora in presenza di ostacoli



Una parte di energia viene riflessa (W_r), una parte trasmessa (W_t), una parte assorbita all'interno del mezzo (W_a). A seconda del tipo di materiale interessato, cambiano le proporzioni di questa scomposizione, pur restando in pareggio il bilancio energetico:

$$W_i = W_r + W_a + W_t$$

- | | |
|---|--|
| Nel caso di interventi di fonoisolamento: | l'energia che si vuole ridurre o controllare è l'energia trasmessa W_t , |
| Nel caso di interventi di fonoassorbimento:
(e di correzione acustica) | l'energia sulla quale si agisce è l'energia assorbita W_a |
| PROPRIETA' ACUSTICHE DEI MATERIALI | ISOLAMENTO ACUSTICO E POTERE FONOIOLANTE |

La capacità di una struttura di abbattere il rumore aereo può essere definita, in maniera diversa, mediante due grandezze:

l'isolamento acustico e il potere fonoisolante.

L'isolamento acustico D (in inglese NR - Noise Reduction) rappresenta la differenza espressa in dB tra il livello sonoro misurato nell'ambiente in cui si genera il rumore e quello misurato nell'ambiente ricevente.

Tale grandezza dipende dalle caratteristiche degli ambienti di misura, quali dimensioni e assorbimento acustico. L'espressione più semplificata di D è la seguente:

$$D = L_1 - L_2$$

dove:

L_1 livello medio di pressione sonora nell'ambiente sorgente (dB)

L_2 livello medio di pressione sonora nell'ambiente ricevente (dB)

Il potere fonoisolante R (in inglese TL - Transmission Lost) invece esprime l'attitudine a impedire la trasmissione dell'energia sonora.

Isolamento acustico e potere fonoisolante sono legati da relazioni matematiche.

Con riferimento alle annotazioni di figura 16, viene definito il fattore di trasmissione τ :

$$\tau = \frac{W_t}{W_i}$$

espresso da una grandezza adimensionale.

Tanto più è piccola quanto più è grande l'attitudine del materiale a ostacolare la trasmissione.

Il potere fonoisolante R è definito da:

$$R = 10 \log \frac{1}{\tau} \quad [\text{dB}]$$

e il suo valore numerico è quindi proporzionale alla prestazione.

Il potere fonoisolante è la proprietà che interessa tutti i divisori: verticali e orizzontali, interni ed esterni, fissi e mobili, utilizzati nelle costruzioni edilizie.

La sua conoscenza è utile per poter prevedere il livello di isolamento acustico fra ambienti.

In linea del tutto generale, è possibile affermare che il potere fonoisolante R di una struttura dipende dalla sua massa per unità di superficie (massa areica) espressa in kg/m², con alcune eccezioni, quali ad esempio le pareti leggere in lastre di cartongesso o le strutture doppie (murature con intercapedine) come meglio si vedrà al successivo paragrafo "Divisori semplici omogenei".

Con riferimento alla correlazione matematica tra isolamento acustico D e potere fonoisolante R, questa è espressa dalla seguente formula:

$$D = R + 10 \log \left(\frac{A_{ric}}{S} \right) \quad [\text{dB}]$$

dove:

A_{ric} area di assorbimento equivalente dell'ambiente ricevente m²

S area del divisorio m²

Se si considera la definizione di **tempo di riverberazione**, inteso come la durata necessaria affinché un segnale sonoro presente nell'ambiente decresca di 60 dB dopo la sua interruzione (come riportato nel successivo paragrafo Misura dell'assorbimento acustico), la formula si può anche esprimere nel seguente modo:

$$D = R + 10 \log \left(\frac{0,16 V}{S T_{60}} \right) \quad [\text{dB}]$$

dove:

V volume dell'ambiente ricevente (m³)

S area del divisorio (m²)

T₆₀ tempo di riverberazione, alla frequenza considerata, dell'ambiente ricevente (s).

DIVISORI SEMPLICI OMOGENEI

In linea generale e teorica, il potere fonoisolante dipende dalla frequenza f del suono e dalla massa per unità di superficie m² (massa areica) del divisorio.

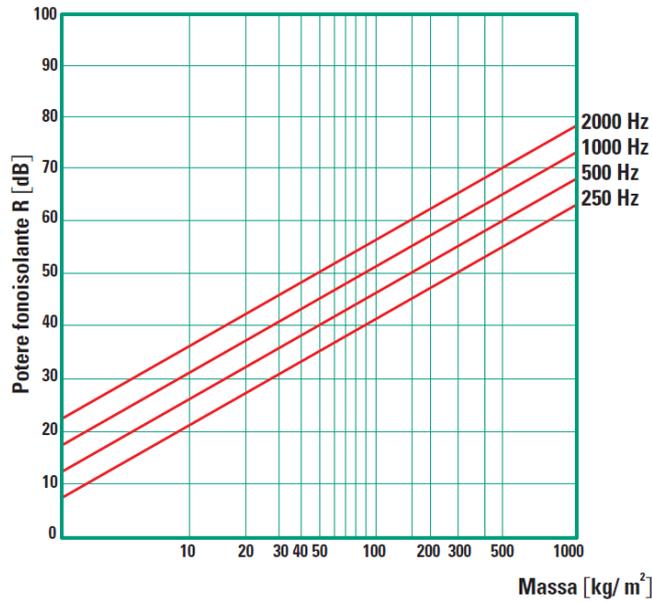
La "legge di massa" (Fig. 17) riportata dai testi è, nella sua forma più semplificata, la seguente:

$$R = 20 \log (m f) - 48 \quad [dB]$$

dove:

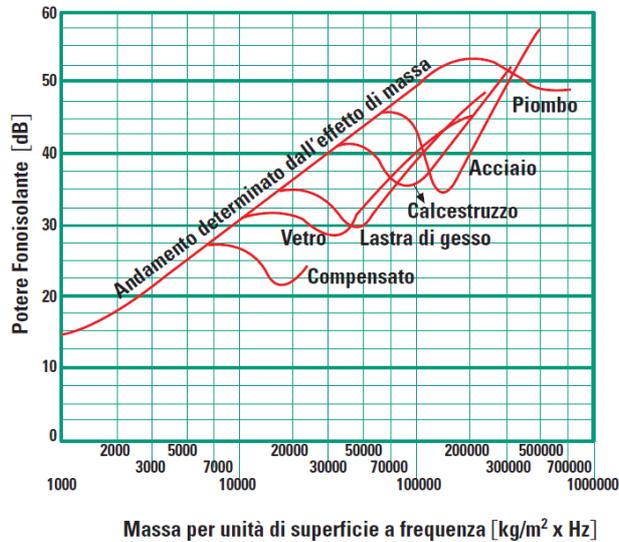
- f frequenza del suono incidente Hz
- m massa superficiale della parete kg/ m²

Fig. 17 - Rappresentazione schematica della legge della massa



Il suo utilizzo consente di ottenere dati di prima approssimazione (Fig. 18).

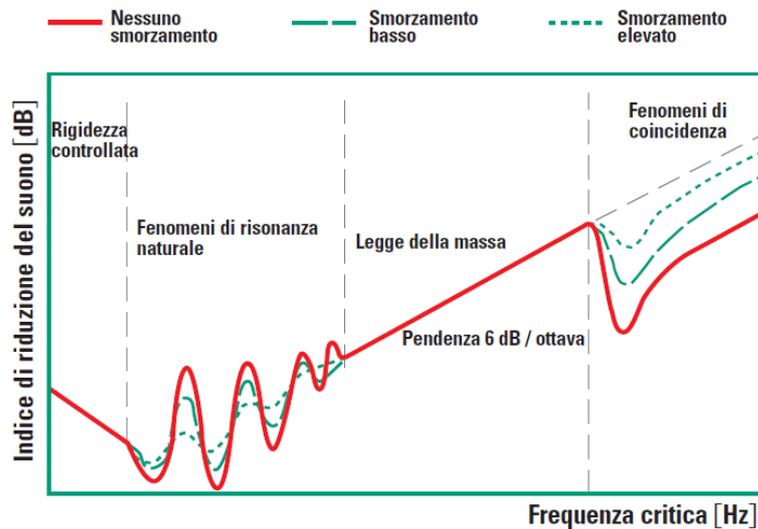
Fig. 18 - Potere fonoisolante di materiali d'uso corrente in edilizia



In effetti, un divisorio di dimensioni finite, investito da energia sonora, è soggetto a fenomeni di vibrazione e di risonanza che possono influire sul suo comportamento acustico.

In forma generica e puramente indicativa, il comportamento in frequenza di un divisorio è riportato in figura 19.

Fig. 19 - Campo di validità della legge della massa



Si osservano tre zone tipiche:

- zona centrale, governata dalla legge della massa, in cui il potere fonoisolante cresce regolarmente con la frequenza, con una pendenza di 20 dB per decade;
- zona di bassa frequenza caratterizzata dal fenomeno di risonanza che consiste in irregolarità di andamento dovute alle frequenze naturali di oscillazione del divisorio che dipendono dalle dimensioni e dalle caratteristiche fisicoelastiche
- zona di alta frequenza caratterizzata dal fenomeno di coincidenza, che consiste in una caduta di prestazione determinata dallo spessore, dalle caratteristiche fisicoelastiche e, in misura notevole, dalle condizioni ai bordi.

Nelle zone di alta e bassa frequenza possono verificarsi delle perdite di isolamento dovute a frequenze di risonanza o coincidenza; la frequenza a partire dalla quale ha inizio la perdita è definita frequenza critica (simbolo f_c); il suo valore può essere previsto dal calcolo qualora sia nota la velocità di propagazione longitudinale nel materiale.

La tabella 4 riporta per alcuni materiali il valore del parametro [$f_c \cdot h$] che rappresenta il prodotto della frequenza critica per lo spessore [h] del divisorio.

La tabella riporta inoltre il valore del fattore di perdita [η] che esprime le doti di smorzamento interno del materiale.

Tab. 4 - Frequenza critica f_c per alcuni materiali

MATERIALE	$f_c \cdot h$ [Hz · m]	η
Legno compensato	9	0.01
Acciaio	13	0.0001
Alluminio	12,5	0.0005
Vetro	12	0.001
Lastre di cartongesso	30	0.01
Piombo	54	0.01
Mattoni pieni	22	0.01
Cemento normale	19	0.005
Cemento alleggerito	38	0.01

Più è alto il fattore di perdita, più il materiale è smorzante, meno sono accentuate le cadute di potere fonoisolante dovute a coincidenza.

Si tenga presente che i dati della tabella 4 si riferiscono al solo materiale e non tengono conto di eventuali effetti ai bordi. Nella pratica tali effetti ci sono e, in misura più o meno accentuata, possono modificare il fattore di perdita, con conseguenti effetti sul potere fonoisolante.

Noto lo spessore del divisorio è pertanto possibile calcolare il valore della frequenza critica.

Ad esempio, una lastra di vetro di sp. 5 mm avrà una frequenza critica pari a
 $f_c = 12/0.005 = 2400$ Hz.

Per una parete in mattoni pieni di spessore 24 cm si avrà invece:
 $f_c = 22/0.24 = 91.6$ Hz.

Per una lastra in cartongesso di spessore 12,5 mm, la frequenza critica sarà pari a:
 $f_c = 30/0,0125 = 2400$ Hz.

DIVISORI DOPPI

Oltre alle risonanze già descritte a proposito dei divisori semplici, un divisorio doppio è soggetto ad una risonanza dovuta alla massa areica dei due componenti e alla distanza che li separa.

La frequenza f_0 di tale risonanza, definita di massa-aria-massa, dipende anche dall'angolo di incidenza del suono; per incidenza diffusa d'ambiente si utilizza la seguente espressione:

$$f_0 = 85 \sqrt{\frac{1}{d} \left(\frac{1}{m_1} + \frac{1}{m_2} \right)} \text{ [Hz]}$$

con:

d	distanza di separazione fra i due elementi	m
m_1, m_2	masse areiche dei due elementi	kg/m ²

Sul comportamento delle pareti doppie si possono ancora fornire alcune indicazioni, tratte dalla letteratura e dalla sperimentazione.

Se la distanza che separa i due componenti è contenuta entro 10-15 cm, la prestazione può considerarsi paragonabile a quella fornita da una parete semplice di massa equivalente.

Per intercapedini maggiori si può avere un aumento di prestazione legato alla frequenza.

Per valori d'intercapedine uguali o superiori alla mezza lunghezza d'onda del suono incidente si può avere al limite un potere fonoisolante pari alla somma aritmetica dei poteri fonoisolanti relativi ai due elementi considerati separatamente.

La letteratura fornisce alcune relazioni sul potere fonoisolante di divisori doppi, tra queste si riporta a titolo esemplificativo la seguente:

$$R_w = R_1 + R_2 + 10 \log \left(\frac{1}{4} + \frac{S_t}{S_c \alpha_c} \right) \text{ [dB]}$$

dove:

R_w	potere fonoisolante della parete	dB
R_1, R_2	potere fonoisolante dei singoli elementi calcolabile mediante la legge di massa	dB
S_t	area della parete	m ²
$(S_c \alpha_c)$	unità di assorbimento equivalente dell'intercapedine esistente tra gli elementi	m ²

In letteratura e nelle norme tecniche di pertinenza inoltre sono riportate alcune relazioni semplificative che consentono di effettuare una stima del potere fonoisolante R_w in assenza di trasmissioni laterali per varie tipologie di pareti, quali ad esempio:

Partizioni orizzontali o verticali singole o doppie

$$R_w = 20 \log m \text{ (con fattore cautelativo di - 2dB)} \quad \text{dB}$$

se $m > 80 \text{ kg/m}^2$

Nel caso di pareti doppie l'intercapedine deve essere di spessore uguale o minore di 50 mm e priva di riempimento

Strutture monolitiche con $m > 150 \text{ kg/m}^2$

$$R_w = 37,5 \log m - 42 \text{ (con fattore cautelativo di - 2dB)} \quad \text{dB}$$

$$R_w = 32,1 \log m - 28,5 \quad \text{dB}$$

$$R_w = 32,4 \log m - 26 \quad \text{dB}$$

$$R_w = 40 \log m - 45 \quad \text{dB}$$

Pareti in laterizio

$$R_w = 16 \log m + 7 \quad \text{dB}$$

se $80 < m < 400 \text{ kg/m}^2$

Pareti doppie in laterizio (con intercapedine di almeno 10 cm)

$$R_w = 20 \log m + 20 \log d - 10 \quad \text{dB}$$

d spessore intercapedine cm

Pareti doppie in laterizio ($s = 8 \text{ cm}$) con intercapedine riempita da materiale isolante con proprietà di fonoassorbimento

$$R_w = 20 \log m + 2 \quad \text{dB}$$

Pareti in calcestruzzo armato

$$R_w = 23,2 \log m - 4,5 \quad \text{dB}$$

ASSORBIMENTO ACUSTICO

Il coefficiente di assorbimento acustico α (si veda anche il paragrafo "Propagazione in ambienti chiusi"):

$$\alpha = \frac{W_a}{W_i}$$

esprime **l'attitudine di un materiale a dissipare al suo interno l'energia sonora incidente.**

L'assorbimento acustico avviene per una trasformazione:

parte dell'energia sonora incidente viene trasformata in calore.

Il fenomeno dell'assorbimento riguarda in particolare i materiali destinati a rivestire le superfici di ambienti, allo scopo di controllarne la risposta acustica.

In linea generale, l'assorbimento avviene per una delle seguenti cause:

- per porosità
- per risonanza di cavità
- per risonanza di membrana.

ASSORBIMENTO PER POROSITA'

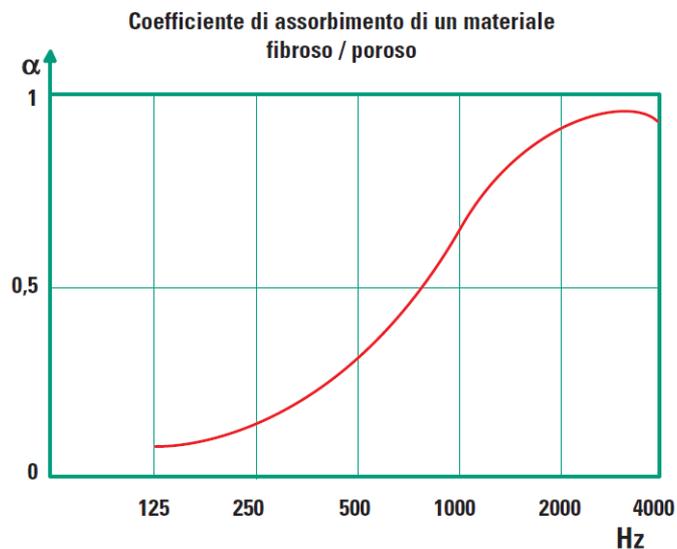
È una caratteristica dei materiali a struttura fibrosa o cellulare (a celle aperte) contenenti un'alta percentuale d'aria al loro interno (in genere superiore al 90%).

Possono essere di origine minerale, vegetale, animale, sintetica.

L'assorbimento avviene per effetto dell'attrito delle particelle d'aria in vibrazione negli interstizi della struttura porosa; sotto l'aspetto quantitativo, esso dipende dalla densità, dalla quantità d'aria contenuta, dalla resistenza al flusso del materiale.

Nel campo delle frequenze udibili, i materiali a celle aperte forniscono le migliori prestazioni alle alte frequenze (Fig. 20).

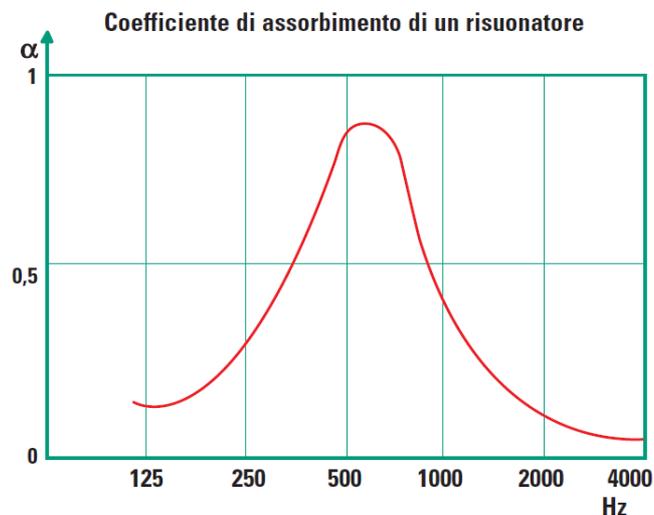
Fig. 20 - Assorbimento per porosità

**ASSORBIMENTO PER RISONANZA DI CAVITA'**

Viene sfruttato il principio fisico del risonatore che è formato da una cavità con un foro d'ingresso.

Se la cavità è totalmente vuota, il risonatore è definito "non smorzato" e la curva di risonanza ha un andamento molto selettivo. Se la cavità è riempita, anche solo parzialmente, con materiale poroso, il risonatore diventa "smorzato" e la curva di risonanza si allarga, coprendo una gamma più vasta di frequenza (Fig. 21).

Fig. 21 - Assorbimento per risonanza di cavità



GRAZIE PER L'ATTENZIONE