

## INDICE della lezione del 14/04/2016

### ANALISI SPETTRALE

Sistema uditivo umano.....	1
Diagramma delle curve isofoniche .....	1
Filtro di 'ponderazione' .....	<b>Errore. Il segnalibro non è definito.</b>
Analisi in frequenza – Analisi Spettrale .....	4
Forma d'onda .....	5
Analisi in bande di frequenza .....	5
Rumore bianco e rumore rosa .....	7
Un cenno alla giusta collocazione dei materiali fonoassorbenti .....	8
La normativa italiana in materia di acustica .....	9
Il paradosso dei tempi di riverbero negli edifici scolastici .....	10

### PROPAGAZIONE DEL SUONO IN CAMPO LIBERO

Sorgente puntiforme e omnidirezionale.....	12
Sorgente lineare e direttiva .....	14
Direttività delle sorgenti sonore.....	14
Sorgente lineare continua .....	15
Sorgente lineare discreta .....	16
Esercizio .....	18

## ANALISI SPETTRALE Sistema uditivo umano

L'organo uditivo umano, la chiocciola, anche con costante pressione sonora non avverte le medesime sensazioni sonore.

L'udito umano ha una minore sensibilità rispetto alle frequenze molto basse (poche decine di Hz) e alle frequenze molto alte (oltre i 15 kHz).

Suoni di stessa intensità ma frequenza diversa vengono percepiti dall'orecchio in modo diverso.

### Diagramma delle curve isofoniche

È sbagliato usare i dB così come sono in quanto non corrispondono alla sensazione umana. Per procurare la stessa sensazione sonora (phon) occorrono, a frequenze diverse, livelli di pressioni sonore diverse.

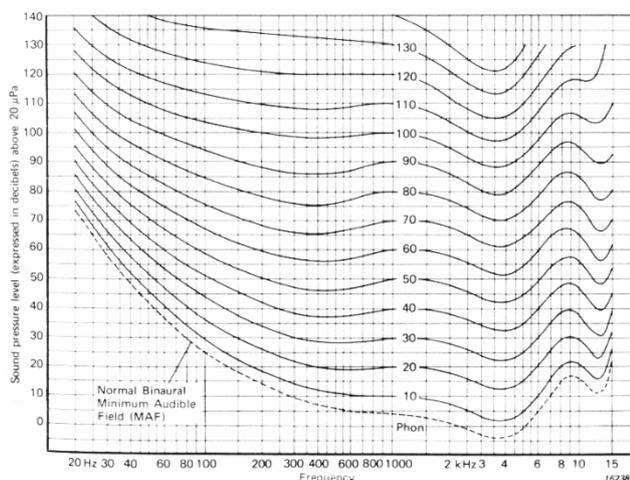


Fig.1 – Diagramma delle curve isofoniche.

Dal grafico risulta che per avere la stessa sensazione di un suono di 40 dB a 1000 Hz, cambiando frequenza a 100 Hz occorre salire ed arrivare fino a 50 dB. La curva più bassa rappresenta la cosiddetta ‘**soglia dell’udibile**’: a 1000 Hz ci troviamo attorno a 0 dB e questi sono i suoni più deboli che l’uomo riesce a sentire.

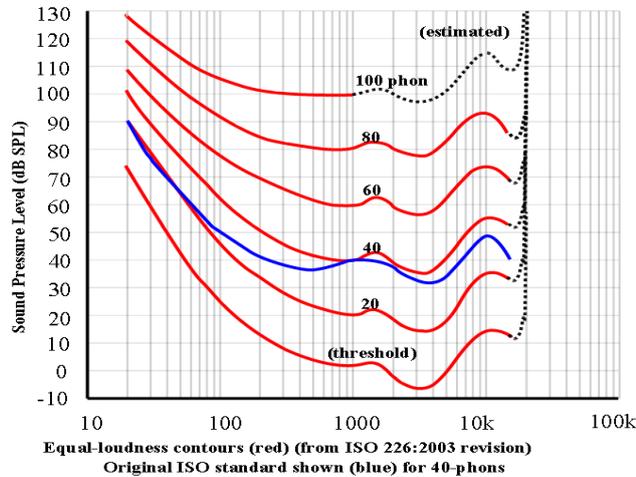


Fig.2 – Diagramma curve isofoniche dalla norma ISO del 2003.

La norma ISO è stata revisionata nel 2003.

La precedente norma era stata sviluppata in base a studi fatti negli anni ‘30 dove si avevano tecnologie diverse rispetto ad ora e quindi si aveva un sistema uditivo più sensibile.

Nel 2003 sono stati fatti nuovi test sugli esseri umani per trovare le nuove curve di isosensazione scoprendo che a bassa frequenza ‘salgono’ molto di più rispetto agli anni ‘30.

Stesso esempio di prima calcolato con il grafico dalla norma del 2003: per avere un suono di 40 dB facendo scendere la frequenza a 100 Hz avrò bisogno di salire fino a 65 dB.

### Filtro di ‘Ponderazione’

Per correggere il funzionamento di un fonometro e renderlo congruo alla percezione umana si inserisce nello strumento un “filtro di ponderazione” (o di “pesatura”). È un circuito elettrico che viene inserito nello strumento di misura, facendo arrivare un livello sonoro non più piatto ma ponderato.

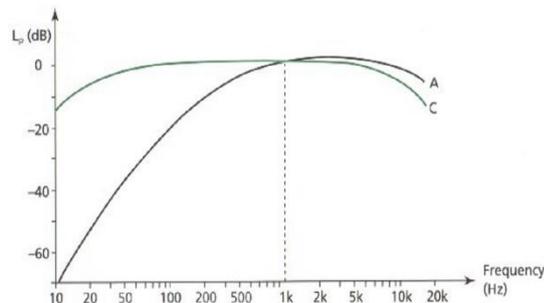


Fig.3 – Diagramma curve ‘ponderate’.

La curva di ponderazione 'C' è molto più bassa perché al crescere del livello sonoro la curva di isosensazione si appiattisce, mentre a livelli sonori più bassi la curva fa un solco più profondo.

A bassi livelli sonori si usa una curva molto gobba, a livelli sonori più intensi si usa una curva meno gobba.

È solo parzialmente corrispondente all'udito umano.

In particolare si usano due tipi di filtri:

- **Filtro di ponderazione 'A'** per i suoni non troppo intensi. I valori misurati con questa curva si esprimono in [dB(A)]. Il [dB(A)] è un filtro elettronico fatto di componenti elettrici inserito nel fonometro tra il microfono e il misuratore, ma è anche un filtro matematico. Attraverso una tabella ottengo i valori ponderati. Per ogni frequenza trovo l'attenuazione esatta del filtro 'A'. Esiste anche un metodo analitico.

f (Hz)	A (dB)	f (Hz)	A (dB)
12.5	-63.4	16	-56.7
16	-56.7		
20	-50.5		
25	-44.7		
31.5	-39.4	31.5	-39.4
40	-34.6		
50	-30.2		
63	-26.2		
80	-22.5	63	-26.2
100	-19.1		
125	-16.1		
160	-13.4		
200	-10.9	125	-16.1
250	-8.6		
315	-6.6		
400	-4.8		
500	-3.2	250	-8.6
630	-1.9		
800	-0.8		
1000	0.0		
1250	0.6	500	-3.2
1600	1.0		
2000	1.2		
2500	1.3		
3150	1.2	1000	0.0
4000	1.0		
5000	0.5		
6300	-0.1		
8000	-1.1	2000	1.2
10000	-2.5		
12500	-4.3		
16000	-6.6		
20000	-9.3	4000	1.0
		8000	-1.1
		16000	-6.6

Fig.4 – Tabella valori ponderati dal filtro 'A'.

- **Filtro di ponderazione 'C'** per i suoni molto forti o esplosioni oltre i 100 dB (condizioni eccessive per l'uomo). I valori misurati con questa curva si esprimono in [dB(C)].

Esempio.

Livello sonoro 80 dB

-Frequenza 100 Hz

Quanti [dB(A)] sono?  $80 - 19.1 = 60.9$

Quindi 80 dB (veri) a 100 Hz sono uguali a 60.9 [dB(A)].

-Frequenza 50 Hz

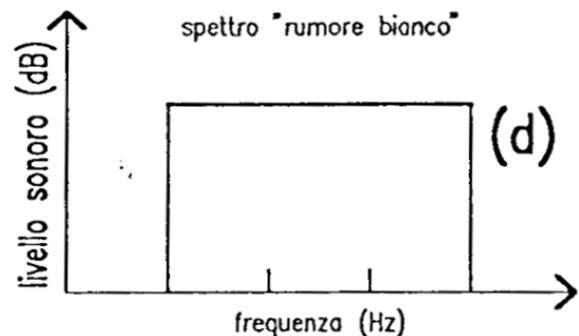
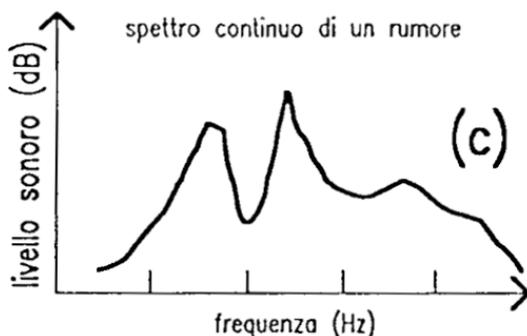
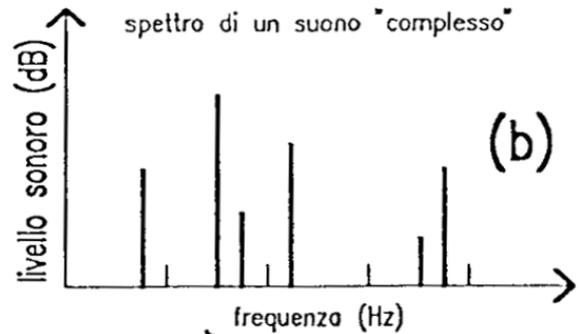
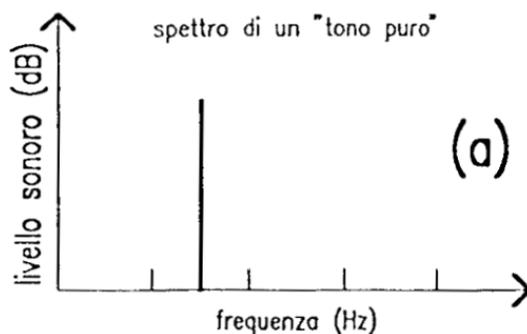
80 dB a 50 Hz sono uguali a  $(80 - 30.2) 49.8$  [dB(A)].

### Analisi in frequenza – Analisi Spettrale

Lo **spettro** è la rappresentazione attraverso un grafico (con in ascissa la frequenza (Hz) e in ordinata il livello sonoro (dB) ) del livello sonoro (o dell'energia sonora) in funzione della frequenza su un diagramma livello sonoro - frequenza (o energia - frequenza).

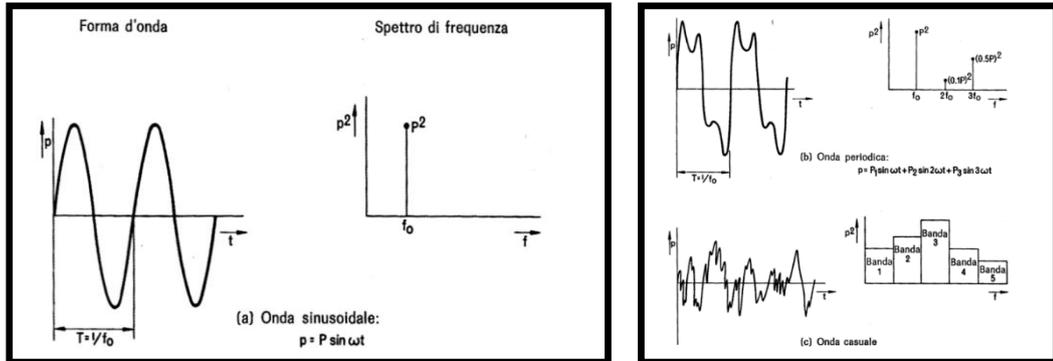
È importante distinguere:

- **Tono puro**
- **Suono complesso** : l'energia sonora è concentrata in un certo numero di frequenze discrete.
- **Spettro continuo**: suono che ha energia a tutte le frequenze (tamburo, voce, macchinario, ventilatore).
- **Rumore bianco**: spettro piatto su tutte la frequenze, ad ogni frequenza c'è lo stesso livello sonoro (es. rumore dell'aria compressa che esce da una bombola). Spesso si usa per fare i test acustici per comodità. La deviazione dalla 'bianchezza' del suono si traduce in una colorazione del suono.



## Forma d'onda

Ad ogni rappresentazione spettrale corrisponde una determinata forma d'onda nel tempo.



Un andamento sinusoidale corrisponde ad un tono puro.

Un andamento periodico ma non sinusoidale corrisponde ad un suono armonico.

Andamento casuale: non si individua nessuna struttura e nessuna periodicità.

È un rumore in banda larga la cui energia si distribuisce lungo tutto lo spettro. Per fare lo spettro di un rumore di questo tipo normalmente lo si analizza per bande, usando dei filtri passabanda si vede quanta energia arriva.

## Analisi in bande di frequenza

La descrizione della composizione in frequenza dei segnali sonori può essere condotta valutando il contenuto di energia sonora all'interno di prefissati intervalli di frequenze, le **bande di frequenza**.

**Filtri passabanda.** Esistono due modi di filtraggio:

- **Analisi a banda costante (in banda stretta)**, in cui tutte le bande sono ampie uguali (es. da 0 a 100, da 100 a 200.. ecc); è una tecnica che consente una risoluzione molto elevata e contemporaneamente consente un'elaborazione molto rapida detta FFT 'Fast Fourier Transform'. Il sistema di Fourier produce un numero di bande che è multiplo di 2, quindi si ottengono 1024 bande, 2048 bande, 4096 bande ecc

$$\Delta f = f_s - f_i = \text{costante}$$

- **Analisi a banda percentuale costante da 1/1 o 1/3 di ottava;** La banda più semplice è la banda 1/1 di ottava in cui la frequenza superiore è 2 volte la frequenza inferiore. La banda di ottava di riferimento è la banda centrata su 1000 Hz. La frequenza di centro banda è definita come la media geometrica della frequenza inferiore e superiore:

$$f_c = \sqrt{f_s \cdot f_i}$$

Se prendo una banda in cui il centro banda è a 1000 Hz e la cui ampiezza è 1/1 di ottava vuol dire che il suo estremo inferiore sarà la metà del suo estremo superiore. In particolare questa parte a 707 Hz e finisce a 1414 Hz.

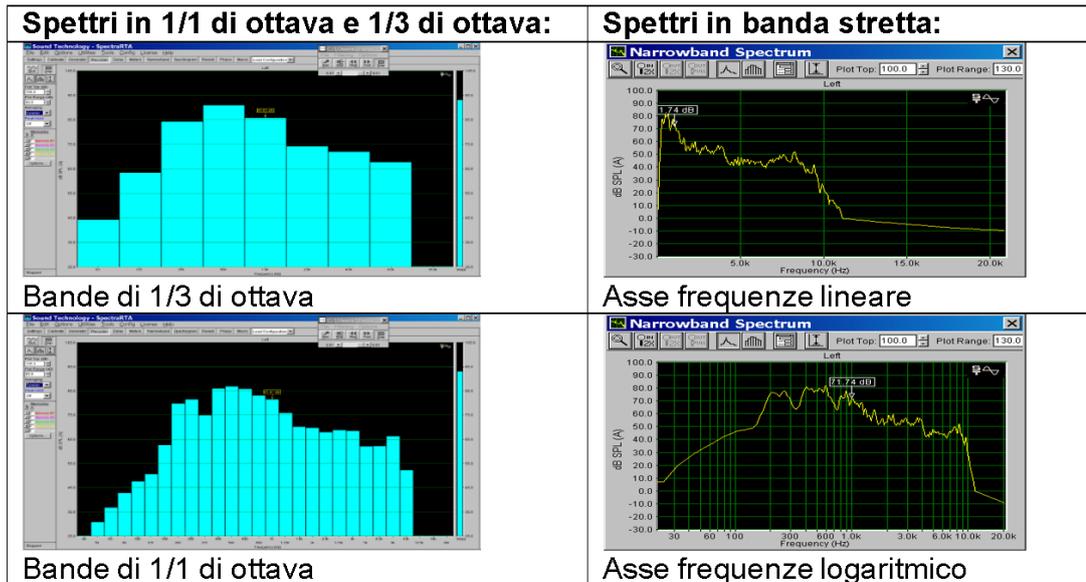
La banda 1/1 di ottava successiva centrata su 2000 Hz parte dove finisce la prima, a 1414 Hz e finisce a 2828 Hz.

$\frac{\Delta f}{f_c} = \frac{1}{\sqrt{2}} = 0.707$	$f_s = 2 f_i$	1/1 ottava
$\frac{\Delta f}{f_c} = 0.232$	$f_s = 2^{1/3} f_i$	1/3 ottava

Con 10 bande di ottava si copre l'intero spettro udibile dell'uomo. Tuttavia un'analisi con solo 10 bande risulta un po' grossolana e ne deriva uno spettro poco dettagliato per questo si passa ai terzi di ottava. Ogni ottava viene divisa in tre terzi quindi il numero totale di bande cresce a 30.

Il rapporto tra ampiezza di banda e frequenza di centro banda scende da 0.707 a 0.232. L'estremo superiore di ogni banda è  $2^{1/3}$  dell'estremo inferiore. 1/3 di ottava fa 1/1 di ottava. Questa è l'analisi più usata.

Bande di 1/1 ottava			Bande di 1/3 ottava		
Frequenza limite inferiore	Frequenza di centro banda	Frequenza limite superiore	Frequenza limite inferiore	Frequenza di centro banda	Frequenza limite superiore
11	16	22	14,1	16	17,8
			17,8	20	22,4
			22,4	25	28,2
22	31,5	44	28,2	31,5	35,5
			35,5	40	44,7
			44,7	50	56,2
44	63	88	56,2	63	70,8
			70,8	80	89,1
			89,1	100	112
88	125	177	112	125	141
			141	160	178
			178	200	224
177	250	355	224	250	282
			282	315	355
			355	400	447
355	500	710	447	500	562
			562	630	708
			708	800	891
710	1000	1420	891	1000	1122
			1122	1250	1413
			1413	1600	1778
1420	2000	2840	1778	2000	2239
			2239	2500	2818
			2818	3150	3548
2840	4000	5680	3548	4000	4467
			4467	5000	5623
			5623	6300	7079
5680	8000	11360	7079	8000	8913
			8913	10000	11220
			11220	12500	14130
11360	16000	22720	14130	16000	17780
			17780	20000	22390



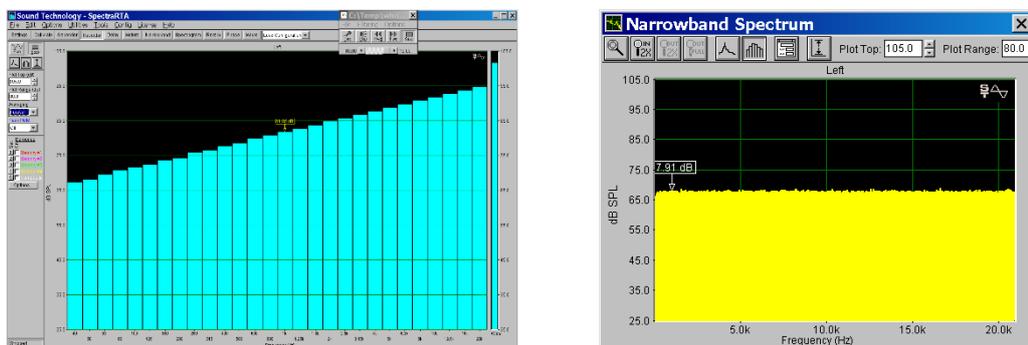
Esempio di resa grafica di spettri dello stesso suono analizzato nei vari modi: L'analisi in ottave da meno informazioni, l'analisi in 1/3 di ottava ha una discreta risoluzione.

Le analisi in banda stretta sono entrambe fatte con FFT, nel primo caso l'asse delle frequenze è un asse lineare quindi tutte le bande risultano di uguale grandezza come sono nella realtà e lo spettro sembra 'schiacciato' verso le basse frequenze. Nel secondo caso l'asse delle frequenze è logaritmico per renderlo più simile alle analisi in ottave.

Il nostro sistema uditivo è logaritmico e la percezione umana è perfettamente rappresentata dall'analisi in terzi di ottava. L'analisi in banda stretta non risulta corretta perché il nostro orecchio non ha una grande risoluzione ad alte frequenze.

### Rumore bianco e rumore rosa

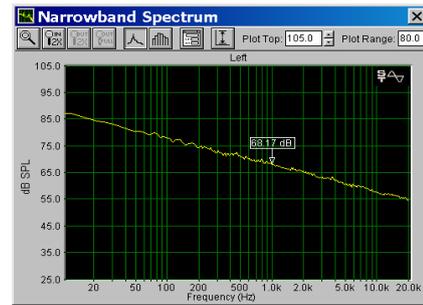
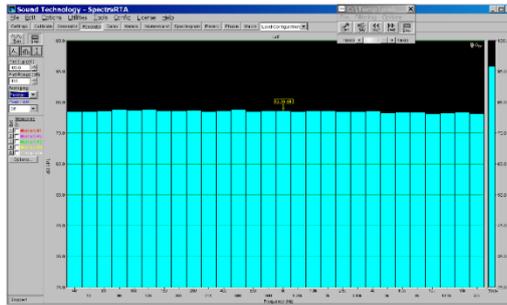
Rumore bianco: piatto a tutte le frequenze in un'analisi a banda stretta (FFT). In un'analisi in 1/3 di ottava non risulta più piatto ma cresce con una pendenza di 3 dB per ottava.



Rumore rosa: piatto in una analisi in ottave o terzi di ottava.

In un'analisi a banda stretta risulta decrescente con una pendenza di 3 dB per ottava. È più ricco di basse frequenze rispetto al rumore bianco.

Il rumore rosa è il più usato proprio perché l'analisi a banda stretta è la più usata.



## Un cenno alla giusta collocazione dei materiali fonoassorbenti

Poiché un certo tempo ottimale di riverbero può rinforzare il parlato, oppure essere una qualità apprezzata nell'esecuzione musicale, bisogna collocare in modo strategico e mirato i materiali fonoassorbenti.

Di solito è bene che siano distanti dalla sorgente sonora e piuttosto collocati verso il fondo delle sale dove lo sfasamento temporale può risultare fastidioso.

**Coefficienti di Assorbimento**

Tipo di superficie	125Hz	250Hz	500Hz	1kHz	2kHz	4kHz
Mattoni a vista	0,03	0,03	0,03	0,04	0,05	0,07
Intonaco dipinto	0,01	0,02	0,02	0,03	0,04	0,05
Cemento	0,01	0,02	0,04	0,06	0,08	0,10
Moquette su cemento	0,02	0,06	0,14	0,37	0,60	0,65
Marmo	0,01	0,01	0,01	0,01	0,02	0,02
Linoleum	0,02	0,03	0,03	0,03	0,03	0,02
Parquet	0,04	0,04	0,07	0,06	0,06	0,07
Porte in legno	0,1	0,07	0,05	0,04	0,04	0,04
Vetro	0,35	0,25	0,18	0,12	0,07	0,04
Tendaggi	0,05	0,07	0,13	0,22	0,32	0,35
Griglie di ventilazione	0,3	0,4	0,5	0,5	0,5	0,4
Superficie dell'acqua	0,01	0,01	0,01	0,02	0,02	0,03
Sedie in legno vuote	0,04	0,05	0,06	0,1	0,1	0,08
Sedie in legno occupate	0,3	0,41	0,49	0,84	0,87	0,84
Panche in legno vuote	0,1	0,09	0,08	0,08	0,08	0,08
Panche in legno occupate	0,5	0,56	0,66	0,76	0,8	0,76
Poltroncine vuote	0,49	0,66	0,8	0,88	0,82	0,7
Poltroncine occupate	0,6	0,74	0,88	0,96	0,93	0,85
Area con pubblico	0,25	0,35	0,42	0,46	0,5	0,5

Fig.12 – Coefficienti di assorbimento acustico di alcuni materiali.

## La normativa italiana in materia di acustica

L'acustica è il settore più normato nell'edilizia in Italia e il mancato rispetto delle intricate norme può seriamente pregiudicare il rilascio dell'abitabilità.

Norme da applicare nell'edilizia pubblica con particolare riguardo a quella scolastica e residenziale, sono contenute nella ISO 3382 e per quanto riguarda le norme con valore di legge (procedendo in ordine cronologico) esse sono contenute:

- nel **D.M. del 18/12/1975**:  
**“Norme tecniche aggiornate relative all’edilizia scolastica ivi compresi gli indici minimi di funzionalità didattica, edilizia e urbanistica, da osservarsi nella esecuzione di opere di edilizia scolastica”**
- nel **D.P.C.M. del 05/12/1997**:  
**“Determinazione dei requisiti acustici passivi degli edifici”**

Il **D.M. del '75**, come si evince dal titolo, si riferisce miratamente agli edifici scolastici, dettando norme dettagliate non solo sull'acustica, ma su tutti i parametri dell'edilizia scolastica, dall'illuminazione, ai sedili, agli infissi.

Il **D.P.C.M. del '97** ha rappresentato una grossa novità in quanto per la prima volta ha dettato norme rivolte a tutti i tipi di edifici per tutte quelle parti che sono soggette a dei vincoli acustici, quindi affrontando problemi di fono isolamento, di calpestio, di barriera dei serramenti e persino di rumore degli impianti, pervadendo così l'iter progettuale di tutti gli edifici in Italia, pubblici e privati di qualunque entità.

**Tabella A - Classificazioni, degli ambienti abitativi (art. 2)**

- categoria A: edifici adibiti a residenza o assimilabili;
- categoria B: edifici adibiti ad uffici e assimilabili;
- categoria C: edifici adibiti ad alberghi, pensioni ed attività assimilabili;
- categoria D: edifici adibiti ad ospedali, cliniche, case di cura e assimilabili;
- categoria E: edifici adibiti ad attività scolastiche a tutti i livelli e assimilabili;
- categoria F: edifici adibiti ad attività ricreative o di culto o assimilabili;
- categoria G: edifici adibiti ad attività commerciali o assimilabili.

**Tabella B - Requisiti acustici passivi degli edifici, dei loro componenti e degli impianti tecnologici**

Categorie di cui alla Tab. A	Parametri				
	$R'_w$ (*)	$D_{2m,nl,w}$	$L'_{n,w}$	$L_{A50max}$	$L_{A50}$
1. D	55	45	58	35	25
2. A, C	50	40	63	35	35
3. E	50	48	58	35	25
4. B, F, G	50	42	55	35	35

Fig.13 – Classificazione degli edifici secondo il D.P.C.M. del 05/12/1997.

## Il paradosso dei tempi di riverbero negli edifici scolastici

a) Il D.M. del 18/12/75, a proposito del tempo di riverberazione testualmente recita: “il tempo di riverberazione nelle aule arredate non deve superare i limiti prescritti dalle presenti norme”

Questi limiti sono riportati in una coppia di grafici, che danno i valori dei tempi di riverbero in funzione dei volumi delle aule.

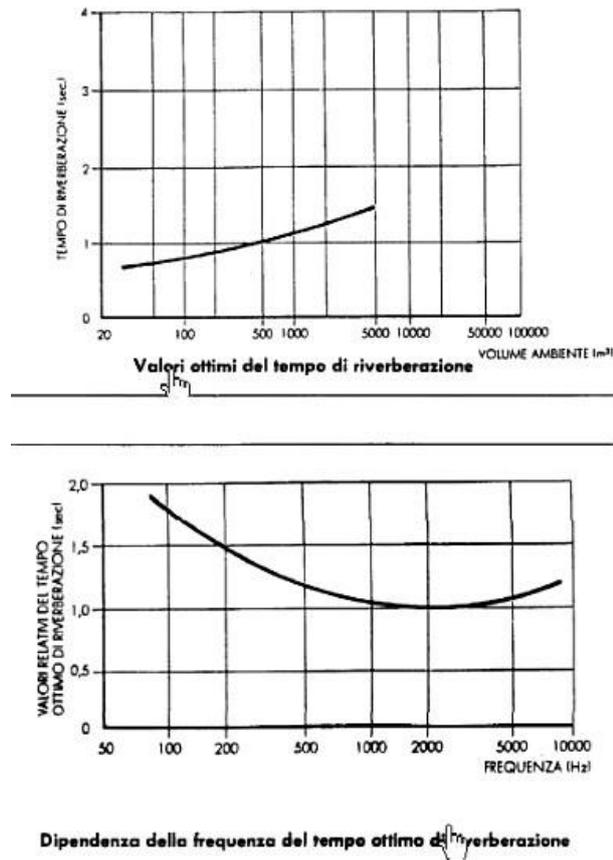


Fig.14 – Calcolo dei tempi di riverbero nelle aule scolastiche.

I due diagrammi vanno incrociati.

Su entrambi in ordinata sono graduati i tempi di riverbero e devono avere gli stessi valori.

I due diagrammi così come si presentano nel D.M. sono elaborati per una sala di  $1000 m^3$  e per una frequenza centrata su  $500 Hz$ .

Questo si deduce dal fatto che a questi valori corrisponde in entrambi i grafici il tempo di riverbero pari a  $1.2 s$ .

Ciò vuol dire che quando le sale hanno cubature differenti (e si parte dal volume perché è il primo dato in possesso del progettista) si parte dal primo grafico e si legge sull'ordinata il tempo di riverbero, quindi si ritrova lo stesso tempo nel secondo grafico e si scala in alto o in basso la relativa curva in modo che si ottenga il corrispondente andamento delle frequenze.

Ad esempio se si ha un locale di  $100 m^3$  si vedrà sul primo grafico che il tempo di riverbero misura circa  $0.8 s$ , allora si va sul secondo grafico e si sposta la

curva, in questo caso verso il basso, in modo che la frequenza di  $500\text{ Hz}$  corrisponda in ordinata al tempo di riverbero pari a  $0.8\text{ s}$  e quindi si leggono tutti i tempi di riverbero corrispondenti alle varie frequenze indicate.

Questo metodo empirico è il frutto di esperienza, perché non ci sono precise istruzioni in merito all'interno del D.M. stesso.

Va osservato che la curva del secondo grafico non è piatta e proprio per questo indica tempi diversi a diverse frequenze e si può notare che “spancia” verso l'alto sulla sinistra, il che significa che il D.M. ammette tempi di riverbero più lunghi per le frequenze più basse, sempre più difficili da gestire.

Il sofisticato sistema previsto dal D.M. richiede una attenta cura nella scelta dei materiali per far sì che i coefficienti di assorbimento  $\alpha$ , che variano con le frequenze, possano soddisfare i tempi di riverbero indicati dal grafico.

Va anche sottolineato che il D.M. del '75 si riferisce a tutti i locali degli edifici scolastici.

b) Ma ecco che entra in vigore il D.P.C.M. del 05/12/1997 che procede ad una classificazione degli edifici in diverse categorie edilizie, e fissa una serie di parametri acustici, considerando gli edifici nel loro insieme, ma con alcune eccezioni.

Per determinate categorie edilizie fissa dei limiti per il tempo di riverberazione, e cioè per gli “edifici adibiti ad attività scolastiche a tutti i livelli e assimilabili”.

Ed inoltre emana definizioni relative ad alcuni singoli locali.

Il D.P.C.M. fa riferimento alla norma tecnica ISO 3382 e definisce il T20 imponendo di misurarlo con la tecnica impulsiva.

Ma per i valori dei tempi di riverbero in ambito scolastico richiama in vita una circolare del ministero dei lavori pubblici, la n° 3150 del 22 Maggio '67, conferendole valore di legge.

Questa circolare, precedente al D.M. del '75, era ormai da tempo caduta in disuso, tanto più che le circolari non sono leggi.

Essa si intitolava: “Criteri di valutazione e collaudo dei requisiti acustici negli edifici scolastici” e stabiliva che la “media” dei tempi di riverbero misurati alle quattro frequenze centrali ( $250, 500, 1000, 2000\text{ Hz}$ ) non doveva superare  $1.2\text{ s}$ , ad aule arredate e con la presenza di due persone (cioè i tecnici rilevatori) distanti tra loro almeno due metri.

Il D.P.C.M., recependo la vecchia circolare, ha reso vincolanti e inderogabili questi dispositivi, per cui in nessuna aula scolastica d'Italia, qualunque sia la sua cubatura, si può superare il tempo di riverbero di  $1.2\text{ s}$ .

E analogamente fissa il tetto massimo dei tempi di riverbero per le palestre scolastiche che non devono superare  $2.2\text{ s}$ .

E' evidente la coesistenza della doppia normativa.

Le differenti disposizioni si riescono a combinare solo per il fatto che il D.P.C.M. parla di “media” e questo consente di ottemperare a entrambe le leggi vigenti.

Anche se non è così in tutti i casi e a volte bisogna operare delle scelte.

Quindi in conclusione, solo per le aule didattiche e per le palestre esiste un doppio limite.

## PROPAGAZIONE DEL SUONO IN CAMPO LIBERO Sorgente puntiforme e omnidirezionale

L'esempio più semplice di propagazione sonora è quella che si verifica in campo libero, ossia in presenza di una sorgente puntiforme e omnidirezionale, capace di propagare il suono in tutte le direzioni.

Per questa ragione, questo tipo di propagazione viene chiamata anche "Propagazione Sferica".

L'energia che si propaga resta in prima approssimazione costante (non c'è assorbimento da parte dell'aria) ma l'intensità sonora diminuisce perché si distribuisce su una superficie sempre più grande.

Infatti al raddoppiare della distanza dalla sorgente  $r$ , la superficie su cui la potenza sonora emessa si distribuisce quadruplica.

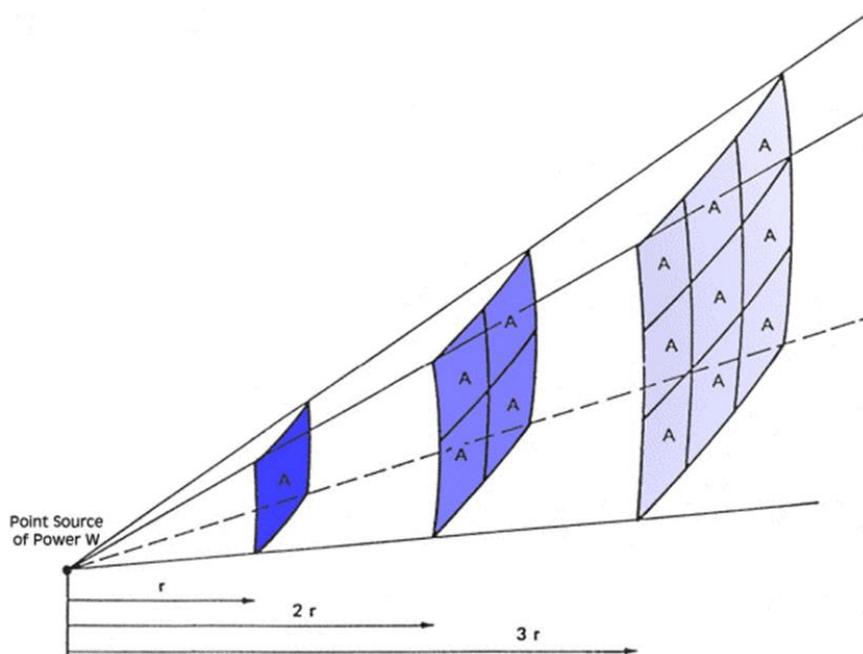


Fig.15 – Aumento della superficie con il quadrato della distanza  $r$ .

Supponendo che la sorgente sonora emetta una potenza sonora  $W$ , si può calcolare l'intensità sonora  $I$ :

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

L'intensità sonora  $I$  è pertanto il rapporto tra la potenza sonora  $W$  e la superficie  $S$  sulla quale si distribuisce.

Da qui, tramite l'uso dei logaritmi, si può passare al livello di intensità sonora:

$$L_I = 10 \log \frac{I}{I_0} =$$

Sostituendo  $\frac{W}{4\pi r^2}$  a  $I$  si avrà:

$$= 10 \log \left( \frac{W}{4\pi r^2 I_0} \right) = 10 \log \left( \frac{W}{4\pi r^2} \frac{W_0}{W_0} \right) = 10 \log \frac{W}{W_0} + 10 \log \frac{W}{I_0} + 10 \log \frac{1}{4\pi} + 10 \log r^{-2}$$

$10 \log \frac{W}{I_0}$  lo si può trascurare in quanto sia la potenza sonora che l'intensità sonora di riferimento valgono  $10^{-12}$

Quindi:

$$L_I = L_W - 11 - 20 \log r \quad [dB]$$

dove

$-20 \log r$  → indica che al crescere della distanza  $r$ , il livello sonoro diminuisce

$-11$  → indica il valore negativo equivalente a  $10 \log \frac{1}{4\pi}$

Si deduce che raddoppiando la distanza  $r$ , la superficie quadruplica:

$$-20 \log r = -20 \log 2 = 6dB$$

Perciò ogni volta che la distanza raddoppia, il livello sonoro diminuisce di 6 dB.

Questa diminuzione di livello sonoro al raddoppio della distanza viene chiamato  $\Delta L_2$ .

## Sorgente lineare e direttiva

Nella realtà, le sorgenti sonore omnidirezionali non sono così frequenti, poiché vengono costruite artificialmente con molta difficoltà.

La maggior parte delle sorgenti sonore, invece, sono direttive.

Per poter calcolare il livello di pressione sonora  $L_p$  basta eguagliarlo al livello di intensità sonora  $L_I$ , in quanto onda piana e progressiva, e aggiungere il fattore di direttività  $Q$  della sorgente sonora.

Quindi:

$$L_I = L_p = L_w - 11 - 20 \log r + 10 \log Q \quad [dB]$$

Nella sorgente sonora puntiforme e omnidirezionale il fattore  $Q$  è uguale a 1, perciò il termine scompare.

Nel caso delle altre sorgenti sonore, invece, il fattore di direttività  $Q$  varia.

## Direttività delle sorgenti sonore

Il campo acustico generato da una sorgente sonora è, generalmente, caratterizzato da una emissione di energia sonora diversa secondo le varie direzioni.

Definiamo pertanto il "**fattore di direttività**"  $Q$  come il rapporto tra l'intensità sonora nella direzione  $\theta$  ( $I_\theta$ ) e l'intensità sonora  $I_0$  che avrebbe il campo acustico in quel punto, se la sorgente fosse omnidirezionale.

$$Q = \frac{I_\theta}{I_0}$$

Il valore della direttività  $Q$ , dipende dalla frequenza e normalmente aumenta con essa.

Definiamo, inoltre, l'indice di direttività  $D$ , dato dalla relazione:

$$D = 10 \log Q \quad [dB]$$

Il fattore di direttività  $Q$  può essere maggiore o minore di 1, perciò l'indice di direttività  $D$  può essere positivo o negativo.

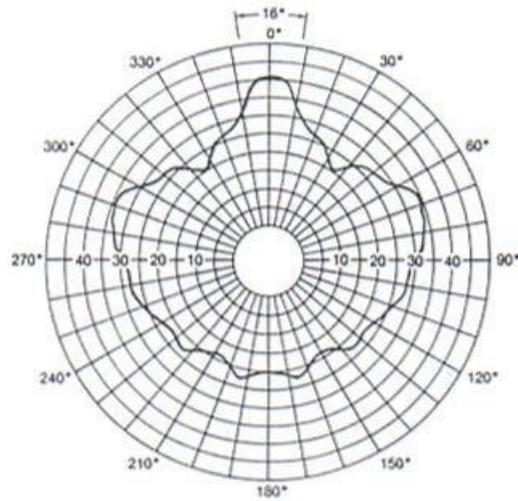


Fig.16 – Curve di Direttività di un altoparlante reale.

Esiste poi una direttività che non dipende dalla sorgente sonora ma dipende dalla vicinanza degli ostacoli.

Il campo sonoro, infatti, può essere modificato dalla presenza di ostacoli e superfici riflettenti. La potenza sonora si distribuirà in modalità diversa a seconda del diverso posizionamento della sorgente sonora.

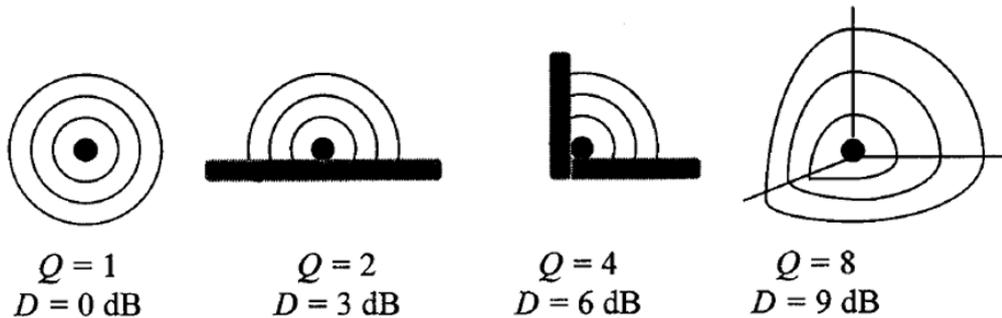


Fig.17 – Direttività in base alla posizione della sorgente.

### Sorgente lineare continua

Per molte sorgenti sonore, come strade, ferrovie, linee di trasporto in generale, ha più senso considerare l'ipotesi di sorgente lineare continua.

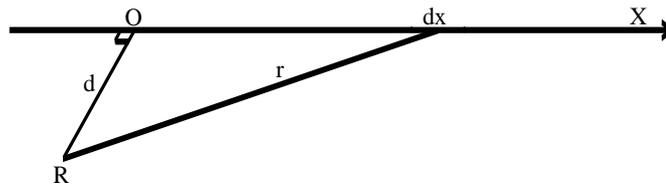


Fig.18 – Geometria sorgente lineare – ricevitore nel caso di sorgente continua.

In questo caso la propagazione del suono avviene con una redistribuzione

della potenza sonora su un fronte cilindrico.

$$L_p = L_w' - 10 \log d - 6 \quad (\text{emissione incoerente})$$

$$L_p = L_w' - 10 \log d - 8 \quad (\text{emissione coerente})$$

in cui  $L_w'$  è il livello di potenza per metro.

La prima formula è relativa al caso più comune, in cui tutti i punti della sorgente lineare emettono rumori diversi.

La seconda formula è relativa al caso meno comune, in cui tutti i punti della sorgente lineare emettono lo stesso rumore.

Considerando il caso più comune,

$$L_p = L_w' - 10 \log d - 6$$

la diminuzione di livello sonoro sarà:

$$\Delta L_2 = 3dB$$

Perciò al raddoppiare della distanza l'intensità sonora diminuirà di soli 3dB, perciò per ottenere un'attenuazione considerevole occorre allontanarsi notevolmente dalla sorgente sonora.

### Sorgente lineare discreta

Esiste poi il caso di sorgente lineare "discreta", costituita da una fila di sorgenti puntiformi, che emettono suoni incoerenti.

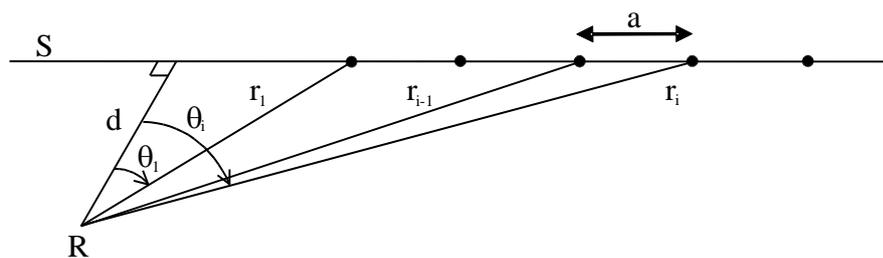


Fig.19 – Geometria sorgente lineare – ricevitore nel caso di sorgente discreta.

Anche in questo caso la propagazione del suono avviene con una redistribuzione della potenza sonora su un fronte cilindrico.

$$L_p = L_{w_p} - 10 \log(a) - 10 \log(d) - 6 \quad (\text{emissione incoerente})$$

dove

$L_{w_p}$  è il livello di potenza di una di queste sorgenti puntiformi,  
 $a$  è la distanza tra le varie sorgenti puntiformi.

In particolare la distanza  $a$  cresce proporzionalmente alla velocità delle sorgenti puntiformi.

$$a = \frac{V \cdot 1000}{N} \quad [m]$$

dove

$V$  è la velocità in km/h,

$N$  è il numero di sorgenti/h

Se  $V= 100$  km/h e  $N=1000 \rightarrow a = 100m$

Considerando una fila di veicoli come una sorgente lineare discreta, avremo un valore ottimale di velocità pari a 90 km/h.

In questo modo si avrà un flusso di traffico scorrevole, un basso impatto ambientale e una relativa attenuazione del livello sonoro.

## Esercizio

Spettro rumore								
f (Hz)	63	125	250	500	1000	2000	4000	
Lp (dB)	80	78	75	78	70	65	69	
A (dB)	-26.2	-16.1	-8.6	-3.2	0	1.2	1	(1)
Lp(dBA)	53.8	61.9	66.4	74.8	70	66.2	70	(2)
Livelli totali LIN e A								
Ltot = 10 log (10^(Lp1/10) + 10^(Lp2/10) + ...)								
10^(Li/10)	100000000	63095734	31622777	63095734	10000000	3162278	7943282	
Ltot = 84.5 dB - LIN								
10^(Li/10)	239883.29	1548817	4365158	30199517	10000000	4168694	10000000	(3)
Ltot = 77.8 dB(A)								

Il valore totale in dB(A) è più basso rispetto al valore totale in dB-LIN

-----  
 (1) I valori di A sono estrapolati dalla seguente tabella:

f (Hz)	A (dB)	f (Hz)	A (dB)
12.5	-63.4		
16	-56.7	16	-56.7
20	-50.5		
25	-44.7		
31.5	-39.4	31.5	-39.4
40	-34.6		
50	-30.2		
63	-26.2	63	-26.2
80	-22.5		
100	-19.1		
125	-16.1	125	-16.1
160	-13.4		
200	-10.9		
250	-8.6	250	-8.6
315	-6.6		
400	-4.8		
500	-3.2	500	-3.2
630	-1.9		
800	-0.8		
1000	0.0	1000	0.0
1250	0.6		
1600	1.0		
2000	1.2	2000	1.2
2500	1.3		
3150	1.2		
4000	1.0	4000	1.0
5000	0.5		
6300	-0.1		
8000	-1.1	8000	-1.1
10000	-2.5		
12500	-4.3		
16000	-6.6	16000	-6.6
20000	-9.3		

(2) I valori sono ottenuti sommando i livelli di pressione sonora con i corrispondenti valori di A.

(3) I livelli di pressione sonora totali in dB - LIN sono ottenuti mediante la

formula della somma incoerente di due livelli.

Inizialmente si calcola:

$$10^{(L_i/10)} \rightarrow 10^{\frac{L_{P1}}{10}} + 10^{\frac{L_{P2}}{10}} + \dots$$

Quindi:

$$L_{TOT} = 10 \log(10^{\frac{L_{P1}}{10}} + 10^{\frac{L_{P2}}{10}} + \dots)$$

(4) I livelli di pressione sonora totali in dB(A) sono ottenuti mediante la formula della somma incoerente di due livelli.

Inizialmente si calcola:

$$10^{(L_{ai}/10)} \rightarrow 10^{\frac{L_{P1}}{10}} + 10^{\frac{L_{P2}}{10}} + \dots$$

Quindi:

$$L_{TOT} = 10 \log(10^{\frac{L_{P1}}{10}} + 10^{\frac{L_{P2}}{10}} + \dots)$$