

Fondamenti di Fisica Tecnica

Esercitazione

Marco Frascarolo, ing, PHD

**Università degli Studi di Roma Tre
Dipartimento di Architettura**

Il suono: definizione

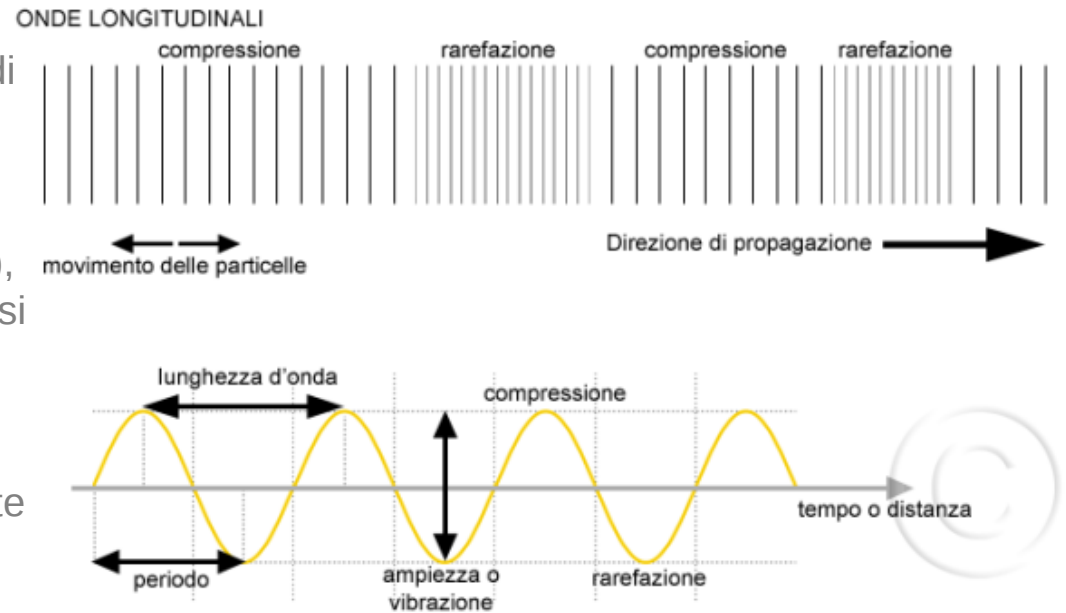
Il suono è un fenomeno determinato da rapide **variazioni di pressione**, prodotte in un mezzo elastico.

Si ha trasporto energetico, non trasporto di materia da un punto all'altro.

Esso richiede un **mezzo elastico** in cui propagarsi (non può propagarsi nel vuoto), che comprende non solo l'aria ma qualsiasi sostanza solida, liquida o gassosa.

Le onde sonore hanno una caratteristica particolare: le particelle di materia coinvolte nel fenomeno sonoro fluttuano intorno ad una posizione di equilibrio. Il loro moto è parallelo alla direzione dell'onda, perciò si definiscono onde **longitudinali**.

Il suono tuttavia può propagarsi anche **sotto altre forme**. Esse devono essere analizzate molto attentamente poiché potrebbero essere un problema nello studio dell'isolamento acustico.



Il Sonographer @ 2014 <http://sonographer.wordpress.com>

Lunghezza d'onda

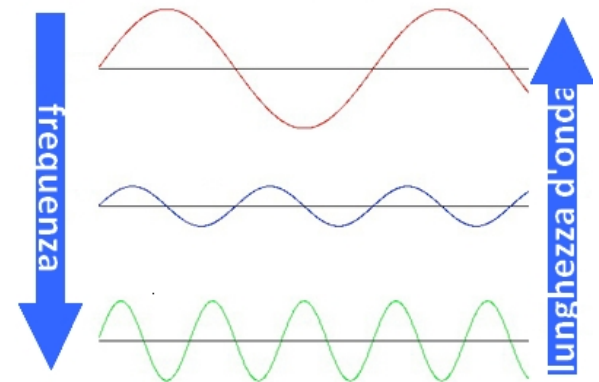
E' la distanza fisica tra due creste di un'onda, ovvero la distanza percorsa dall'onda in un periodo.

$$\lambda = c/f = c/T$$

λ lunghezza d'onda (m)

c velocità di propagazione dell'onda (m/s)

f frequenza dell'onda (Hz)



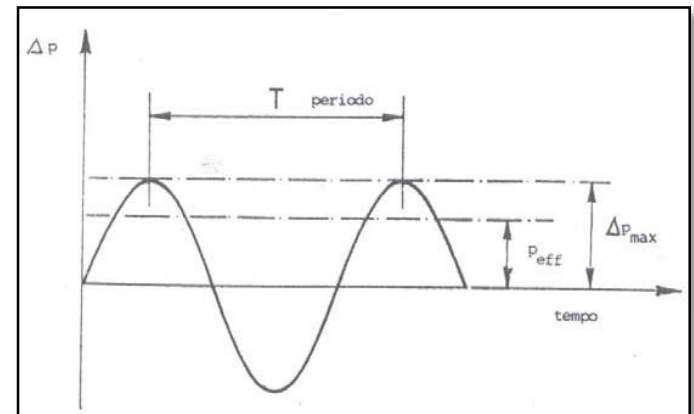
Velocità del suono

E' la velocità con cui un suono si propaga in un mezzo, ovvero la velocità con cui avanza la superficie di separazione tra la zona del mezzo perturbata e quella non ancora perturbata (fronte d'onda). Non è sempre costante e varia all'aumentare della temperatura.

A 0°C la velocità dell'aria è 331,45 m/s $C = 331,45 + 0,62t$ m/s

Pressione efficace

$$P_{eff} = \sqrt{\frac{1}{T} \int_0^T \Delta p(t)^2 dt} = P$$



Decibel e livello di pressione sonora

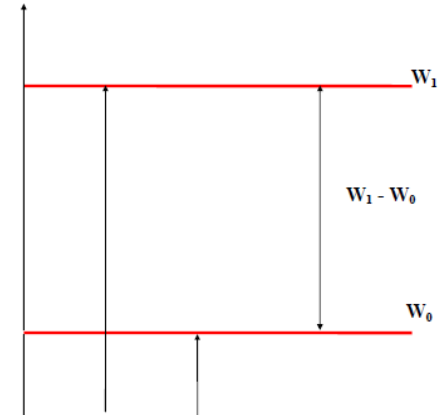
Intensità e potenze sonore associate a fenomeni percepibili dall'orecchio hanno un'**ampia** dinamica:

- 1 pW/m² pico = 10⁻¹² (soglia dell'udibile) ÷ 1 W/m² (soglia del dolore)
- 20 µPa micro = 10⁻⁶ (soglia dell'udibile) ÷ 20 Pa (soglia del dolore)

Dall'analisi di questi aspetti percettivi, si nota che il campo di valori entro il quale la pressione sonora può variare risulta assai ampio. Si adotta la **scala logaritmica** anzichè lineare perché:

- Permette di evitare l'oggettiva difficoltà nel trattare un così vasto intervallo di valori;
- L'enorme capacità dinamica dell'apparato uditivo suggerisce una risposta organizzata più in termini logaritmici che non lineari.

L'introduzione della scala logaritmica consente di confrontare i valori delle grandezze in esame con valori convenzionali della stessa grandezza assunti come riferimento. Si introduce il concetto di **livello** rispetto ad un valore di riferimento della stessa grandezza. Il **decibel (dB)** esprime questo rapporto, e sebbene rappresenti una quantità adimensionale, è ormai trattato come una unità di misura vera e propria.



Livello di Pressione Sonora

$$L_p = 20 \log_{10} P_{\text{eff}} / P_0 \text{ [dB]}$$

$$P_0 = 20 \mu\text{Pa}$$

Livello di potenza sonora

$$L_w = 10 \log_{10} W_1 / W_0 \text{ [dB]}$$

$$W_0 = 10^{-12} \text{ Watt}$$

Livello di intensità sonora

$$L_J = 10 \log_{10} (J / J_0) \text{ [dB]}$$

$$J_0 = 10^{-12} \text{ W/m}^2$$

P_0 W_0 J_0 corrispondi ai valori della soglia normale di udibilità a 1000 Hz

1) Lunghezza d'onda

Sapendo che la velocità del suono in aria è pari a 340 m/s, determinare l'intervallo delle lunghezze d'onda λ udibili (minima e massima λ):

Sapendo che l'intervallo di frequenze udibili varia tra 20 e 20.000 Hz e sapendo che la velocità del suono in aria è pari a 340 m/s,

$$\lambda = c/f = 340/20 = 17 \text{ m}$$

$$\lambda = c/f = 340/20000 = 1,7 \text{ cm}$$

2) Livello di pressione sonora

Calcolare il livello di pressione sonora per una $P_{\text{eff}} = 20 \text{ Pa}$

$L_P = 20 \log_{10} P_{\text{eff}} / P_0 \text{ (dB)}$ $P_0 = 20 \text{ } \mu\text{Pa} = 20 \cdot 10^{-6}$ corrispondente al valore della soglia normale di udibilità a 1000 Hz

$$L_P = 20 \log_{10} P_{\text{eff}} / P_0 = 20 \log_{10} 20 / 20 \cdot 10^{-6} = 20 \log_{10} 10^6 = 20 \cdot 6 = 120 \text{ dB}$$

3) Pressione efficace

Noto il livello di pressione sonora pari a 80 dB, determinare la P_{eff} relativa

$$L_P = 20 \log_{10} P_{\text{eff}} / P_0 \text{ (dB)} \quad P_{\text{eff}} / P_0 = 10^{(L_P/20)} \quad P_{\text{eff}} = P_0 \cdot 10^{(L_P/20)}$$

$$P_{\text{eff}} = (20 \cdot 10^{-6}) \cdot 10^{(80/20)} = 0,2 \text{ Pa}$$

Composizione di livelli sonori

$$L_{J1} = 10 \log_{10} (J_1/J_0)$$

$$L_{J2} = 10 \log_{10} (J_2/J_0)$$

$$L_T = 10 \log_{10} (J_1 + J_2)/J_0$$



72 dB + 72 dB = ~~144~~ dB

ERRATO

$$\text{Se } L_{J1} = L_{J2} \rightarrow J_1 = J_2$$

$$L_T = 10 \log_{10} [(J_1 + J_2)/J_0] = 10 \log_{10} (2J_1/J_0) =$$

$$= 10 \log_{10} (J_1/J_0) + 10 \log_{10} 2 = L_{J1} + 3 \text{ dB}$$



72 dB + 72 dB = 75 dB

CORRETTO

$$L_T = L_{J1} + 3 \text{ dB}$$

$$\text{Se } L_{J1} = \dots = L_{Jn} \quad L_T = L_{J1} + 10 \log_{10} n$$

$$\text{Se } L_{J1} \neq L_{J2} \neq L_{J3} \neq L_{J4} \neq \dots$$

$$L_T = 10 \log_{10} [(J_1 + J_2)/J_0]$$

$$L_{J1} = 10 \log_{10} (J_1/J_0)$$

$$L_{J1}/10 = \log_{10} (J_1/J_0)$$

$$10^{L_{J1}/10} = J_1/J_0$$

$$J_1 = J_0 \cdot 10^{L_{J1}/10}$$

$$L_{J2} = 10 \log_{10} (J_2/J_0)$$

$$L_{J2}/10 = \log_{10} (J_2/J_0)$$

$$10^{L_{J2}/10} = J_2/J_0$$

$$J_2 = J_0 \cdot 10^{L_{J2}/10}$$

$$L_T = 10 \log_{10} [(J_0 \cdot 10^{L_{J1}/10} + J_0 \cdot 10^{L_{J2}/10})/J_0] = 10 \log_{10} (10^{L_{J1}/10} + 10^{L_{J2}/10}) =$$

$$L_T = 10 \log_{10} \Sigma 10^{L_i/10}$$

Sottrazione di livelli sonori

$$L_{\text{tot}} = 10 \log_{10} (J_{\text{tot}}/J_0)$$

Rumore ambientale

$$L_{J1} = 10 \log_{10} (J_1/J_0)$$

Rumore residuo

$$L_2 = 10 \log_{10} [(J_{\text{tot}} - J_1)/J_0] = ???$$

Rumore sorgente

$$L_{J_{\text{tot}}} = 10 \log_{10} (J_{\text{tot}}/J_0)$$

$$L_{J_{\text{tot}}}/10 = \log_{10} (J_{\text{tot}}/J_0)$$

$$10^{L_{J_{\text{tot}}}/10} = J_{\text{tot}}/J_0$$

$$J_{\text{tot}} = J_0 * 10^{L_{J_{\text{tot}}}/10}$$

$$L_{J1} = 10 \log_{10} (J_1/J_0)$$

$$L_{J1}/10 = \log_{10} (J_1/J_0)$$

$$10^{L_{J1}/10} = J_1/J_0$$

$$J_1 = J_0 * 10^{L_{J1}/10}$$

$$L_2 = 10 \log_{10} [(J_0 * 10^{L_{J_{\text{tot}}}/10} - J_0 * 10^{L_{J1}/10})/J_0] = 10 \log_{10} (10^{L_{J_{\text{tot}}}/10} - 10^{L_{J1}/10})$$

4) Composizione di livelli sonori

Calcolare il livello risultante dalla sovrapposizione dei seguenti livelli sonori:

a) $L_1 = 80 \text{ dB}$ $L_2 = 80 \text{ dB}$

$$L_T = L_{J1} + 3 \text{ dB} = 80 + 3 = 83 \text{ dB}$$

b) $L_1 = L_2 = L_3 = L_4 = L_5 = 65 \text{ dB}$

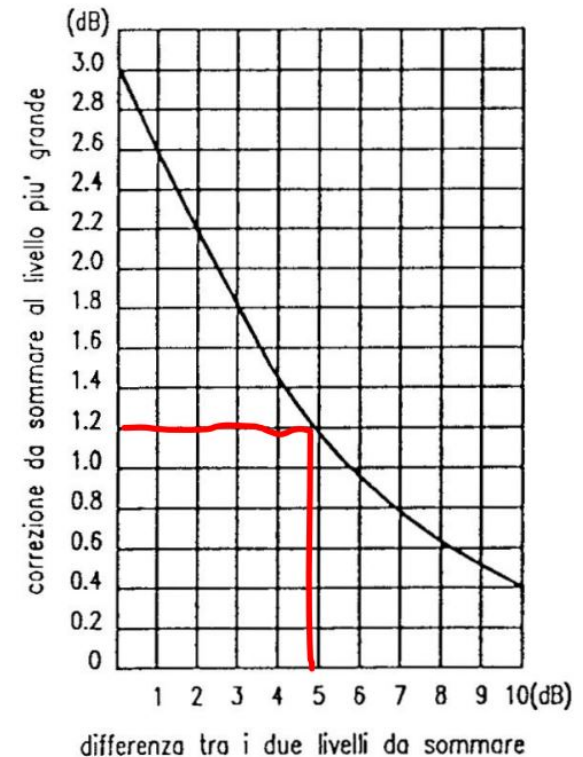
$$L_T = L_{J1} + 10 \log_{10} 5 = 65 + 10 \log_{10} 5 = 72 \text{ dB}$$

c) $L_1 = 80 \text{ dB}$ $L_2 = 70 \text{ dB}$

$$L_T = 10 \log_{10} (10^{80/10} + 10^{70/10}) = 80,4 \text{ dB}$$

d) $L_1 = 70 \text{ dB}$ $L_2 = 50 \text{ dB}$

$$L_T = 10 \log_{10} (10^{70/10} + 10^{50/10}) = 70 \text{ dB}$$



5) Sottrazione di livelli sonori

Calcolare il livello parziale L_2 che sovrapposto ad L_1 dia L_{TOT} :

a) $L_{TOT} = 80 \text{ dB}$ $L_1 = 77 \text{ dB}$

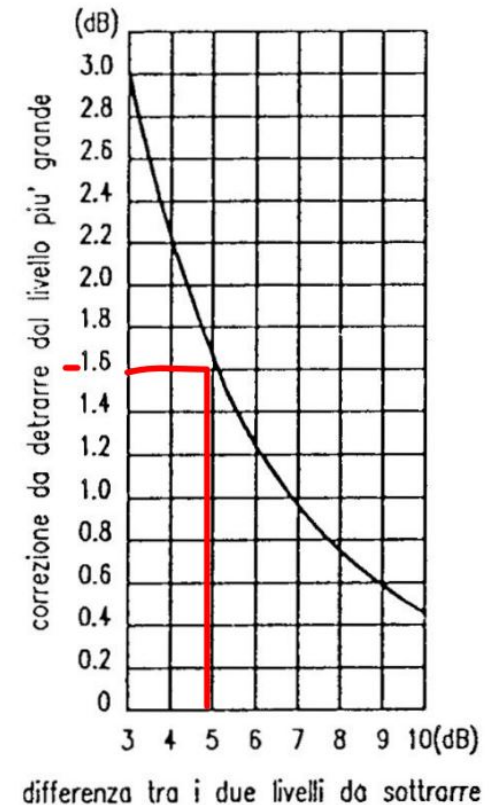
$$L_2 = 10 \log_{10} (10^{80/10} - 10^{77/10}) = 77 \text{ dB}$$

b) $L_{TOT} = 80 \text{ dB}$ $L_1 = 79,5 \text{ dB}$

$$L_2 = 10 \log_{10} (10^{80/10} - 10^{79,5/10}) = 70,4 \text{ dB}$$

c) $L_{TOT} = 70 \text{ dB}$ $L_1 = 25 \text{ dB}$

$$L_2 = 10 \log_{10} (10^{70/10} - 10^{25/10}) = 70 \text{ dB}$$



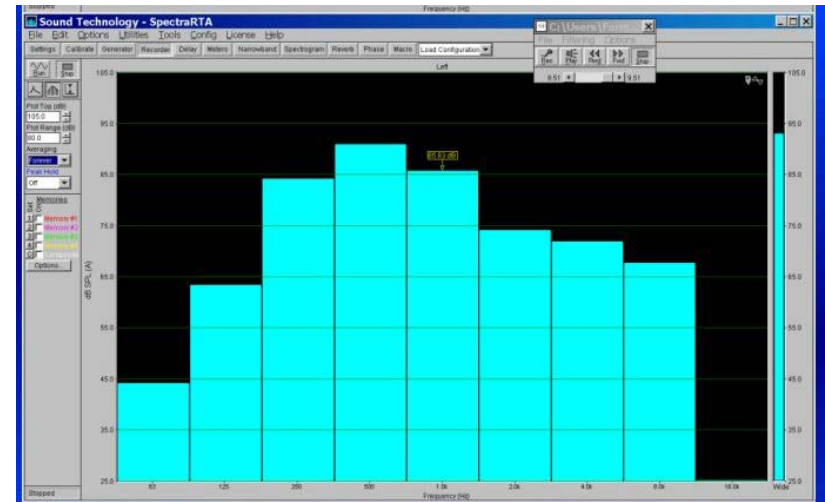
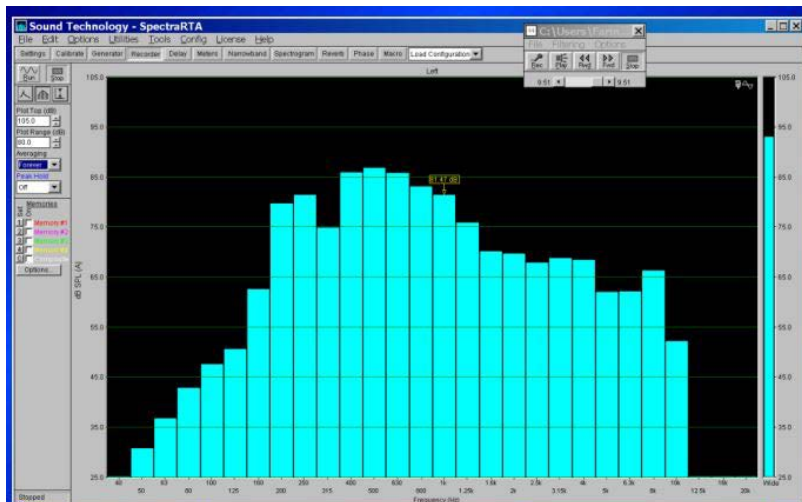
Bande d'ottava e bande di terzi d'ottava

L'intervallo di frequenze udibili è piuttosto vasto (da **20 a 20.000 Hz**) e pertanto è opportuno suddividerla in sottointervalli di minore ampiezza.

Dall'acustica musicale si utilizzano le **bande di ottava**, nelle quali il rapporto fra la frequenza superiore e quella inferiore è pari a 2.

Si usano spesso le **bande a terzi di ottava** nelle quali il rapporto fra le frequenze massima e minima è pari a $2^{1/3}$.

Alla frequenza centrale di ogni banda si attribuisce tutta l'energia contenuta nell'intera banda. In ogni banda di ottava sono contenute tre bande di terzi di ottava di ampiezza crescente e di ampiezza percentuale costante.



Bande d'ottava

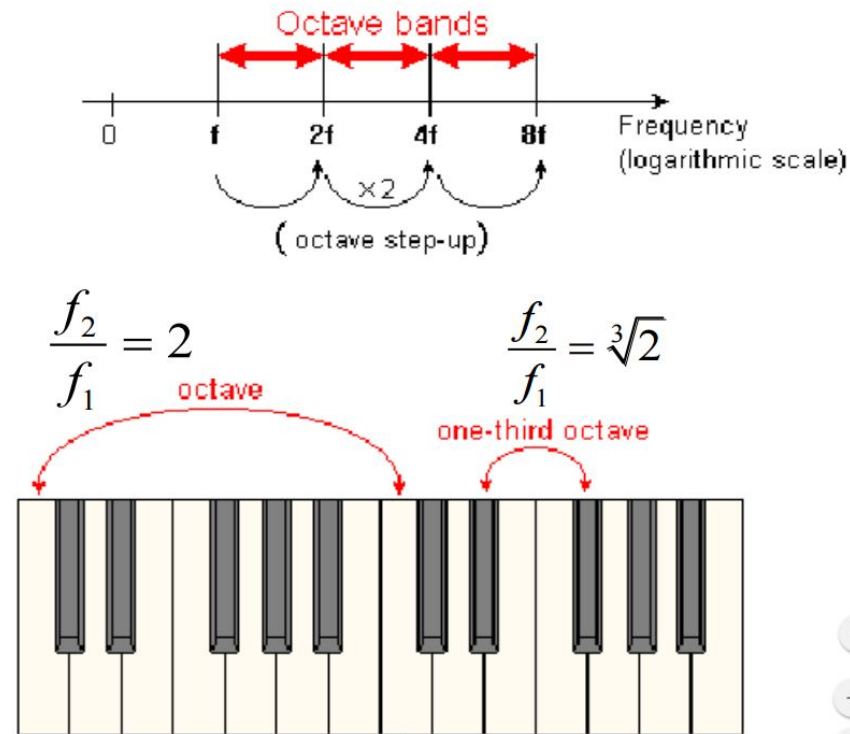
Banda di ottava

$$f_2 = 2 f_1$$

$\Delta f / f_0 = 0,707$ ampiezza percentuale di banda

f_0 frequenza centrale di banda

Frequen. nomin. (Hz)	Frequenza limite		Frequen. nomin. (Hz)	Frequenza limite	
	inferiore (Hz)	superiore (Hz)		inferiore (Hz)	superiore (Hz)
16	11,2	22,4	1000	710	1400
31,5	22,4	45	2000	1400	2800
63	45	90	4000	2800	5600
125	90	180	8000	5600	11200
250	180	355	16000	11200	22400
500	355	710			



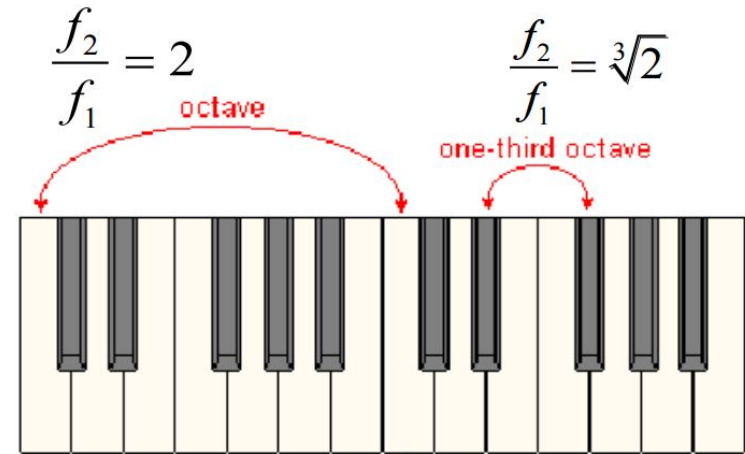
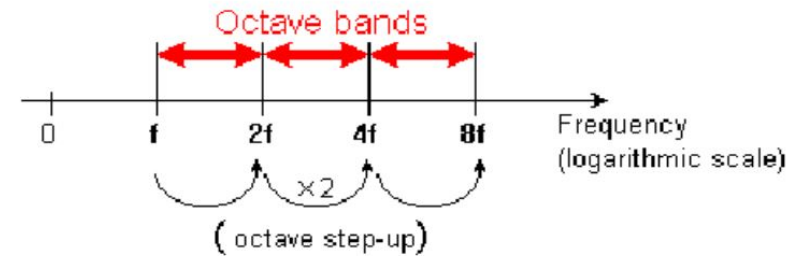
Bande di terzi d'ottava

Banda di terzi d'ottava

$$f_2 = 2^{1/3} f_1 = 1,260 f_1$$

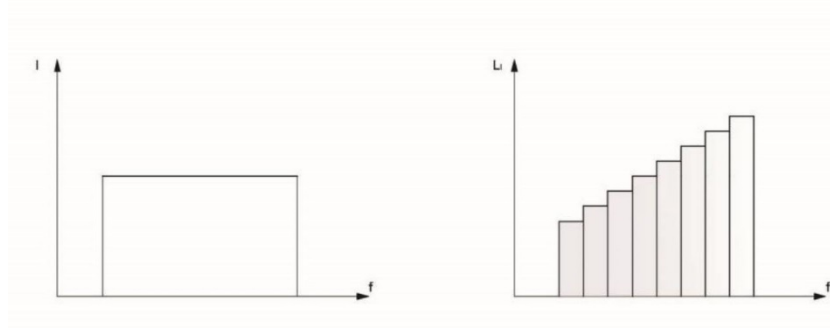
$\Delta f / f_0 = 0,232$ ampiezza percentuale di banda
 f_0 frequenza centrale di banda

N. d'ordine	Frequen. nomin. (Hz)	Frequenza limiti		N. d'ordine	Frequen. nomin. (Hz)	Frequenze limiti	
		inferiore (Hz)	superiore (Hz)			inferiore (Hz)	superiore (Hz)
12	16	14,3	18	28	630	560	710
13	20	18	22,4	29	800	710	900
14	25	22,4	28	30	1000	900	1120
15	31,5	28	35,5	31	1250	1120	1400
16	40	35,5	45	32	1600	1400	1800
17	50	45	56	33	2000	1800	2240
18	63	56	71	34	2500	2240	2800
19	80	71	90	35	3150	2800	3550
20	100	90	112	36	4000	3550	4500
21	125	112	140	37	5000	4500	5600
22	160	140	180	38	6300	5600	7100
23	200	180	224	39	8000	7100	9000
24	250	224	280	40	10000	9000	11200
25	315	280	355	41	12500	11200	14000
26	400	355	450	42	16000	14000	18000
27	500	450	560	43	20000	18000	22400

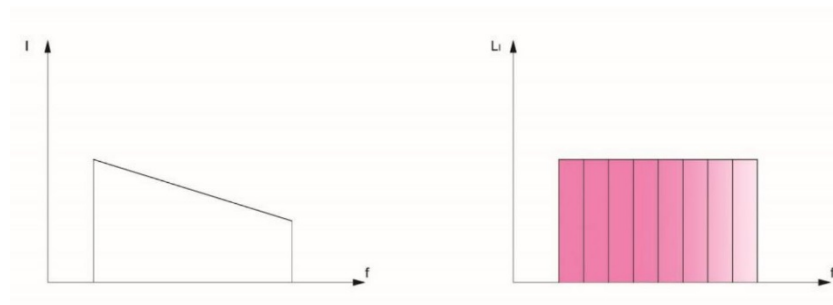


Rumore bianco e rumore rosa

Rumore bianco: distribuzione spettrale delle intensità costante a tutte le frequenze che dà luogo ad una distribuzione crescente dei livelli con le frequenze per l'aumento dell'ampiezza di banda. Visto che ogni banda d'ottava ha ampiezza doppia rispetto alla banda precedente, l'incremento che si verifica è di 3dB/ottava, in quanto 3dB significano un raddoppio dell'energia.



Rumore rosa: particolare tipo di rumore in cui le componenti a bassa frequenza hanno intensità maggiore. Distribuzione spettrale delle intensità decrescente all'aumentare delle frequenze con una pendenza negativa di -3 dB/ottava. Si hanno livelli costanti alle varie bande



6) Frequenze di bande d'ottava e terzi d'ottava

Nota la frequenza centrale di banda pari a 1000 Hz, determinare la larghezza di banda, la frequenza inferiore e superiore della banda di ottava e terzo d'ottava corrispondente.

Banda di ottava

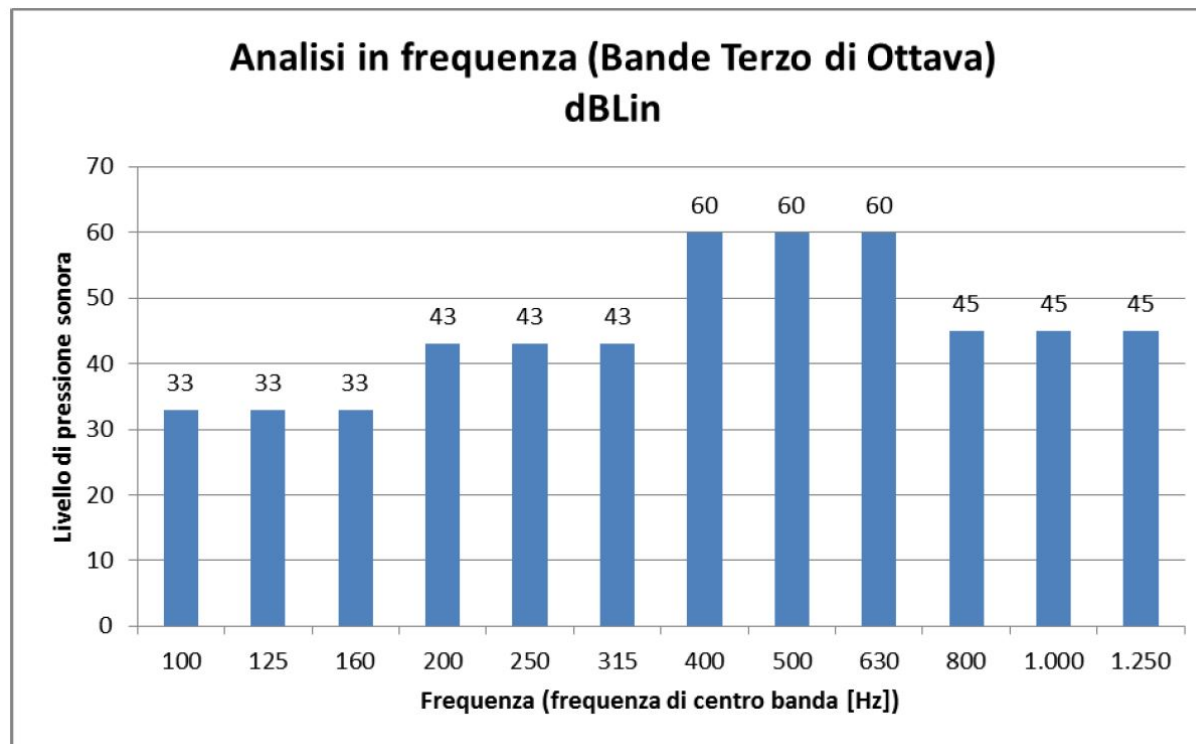
$$\begin{aligned} f_s / f_i &= 2 & \Delta f / f_c &= 0,707 & \text{ampiezza percentuale di banda} & & \Delta f &= 1000 * 0,707 = 707 \text{ Hz} \\ f_i &= 707 \text{ Hz} & f_s &= 2 * f_i = 2 * 707 = 1,414 \text{ Hz} & & & f_c &= \sqrt{(f_1 * f_2)} \end{aligned}$$

Banda di terzi ottava

$$\begin{aligned} f_s / f_i &= 2^{1/3} & \Delta f / f_c &= 0,232 & \Delta f &= 1000 * 0,232 = 232 \text{ Hz} \\ f_i &= \Delta f / (2^{1/3} - 1) = 893 \text{ Hz} & f_s &= 2^{(1/3)} * f_i = 1125 \text{ Hz} \end{aligned}$$

7) Bande d'ottava e terzi d'ottava

Dato il seguente spettro in bande di 1/3 di ottava, ricavale i livelli delle corrispondenti bande di ottava ed il livello complessivo



7) Bande d'ottava e terzi d'ottava - SOLUZIONE

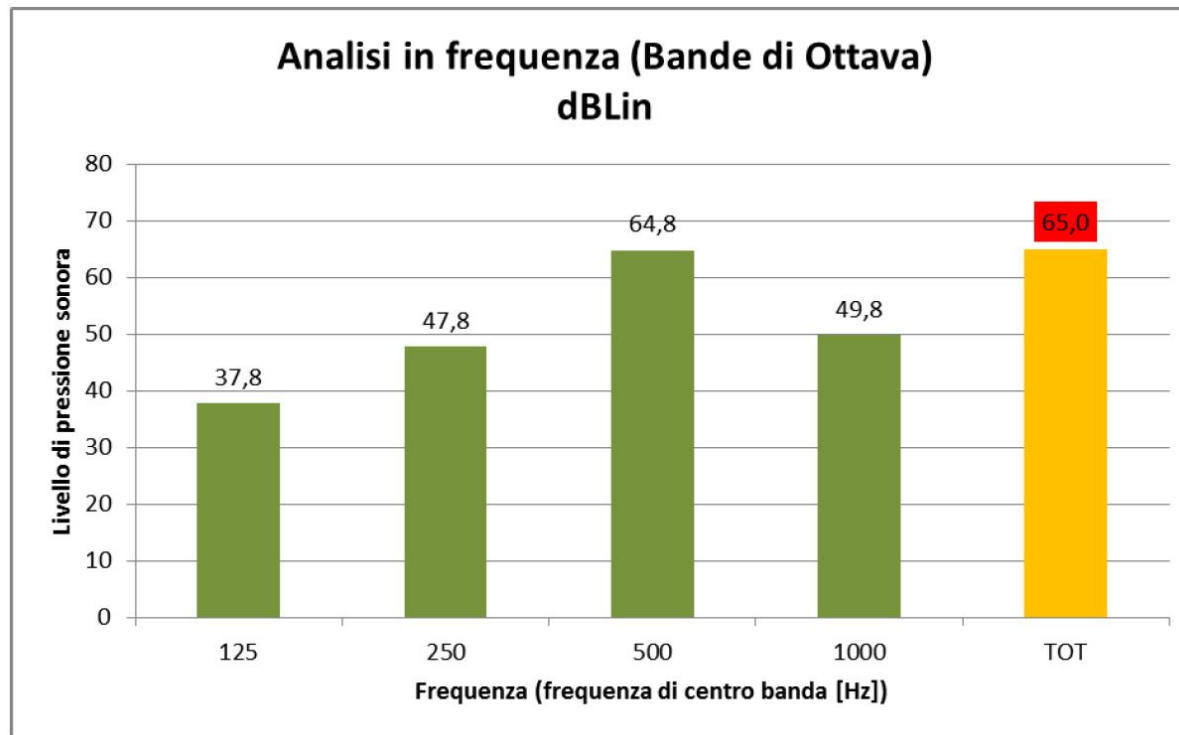
$$L_{125} = L_{125} + 10 \log_{10} 3 = 37,8 \text{ dB}$$

$$L_{250} = L_{250} + 10 \log_{10} 3 = 47,8 \text{ dB}$$

$$L_{500} = L_{500} + 10 \log_{10} 3 = 64,8 \text{ dB}$$

$$L_{1000} = L_{1000} + 10 \log_{10} 3 = 49,8 \text{ dB}$$

$$L_{\text{tot}} = 10 \log_{10} (10^{37,8/10} + 10^{47,8/10} + 10^{64,8/10} + 10^{49,8/10}) = 65,0 \text{ dB}$$

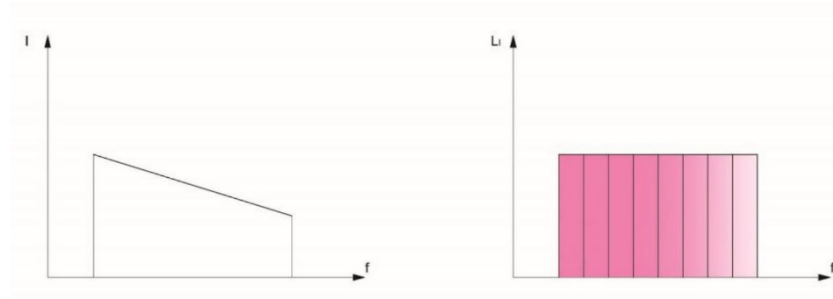


8) Rumore bianco, rumore rosa

Determinare la differenza tra i livelli di due bande di ottava adiacenti, per un rumore bianco e un rumore rosa.

9) Rumore rosa

Limitando l'analisi in frequenza da 100 Hz a 1250 Hz in bande di 1/3 di ottava e da 125 Hz a 1000 Hz in bande di ottava, sapendo che nella banda di 1/3 di ottava a 500 Hz il livello è pari a $L_{500} = 75,0$ dB e che la sorgente di rumore è del tipo rumore rosa, determinare i livelli di tutte le bande di 1/3 di ottava, di tutte le bande di ottava e il livello complessivo.



9) Rumore rosa - SOLUZIONE

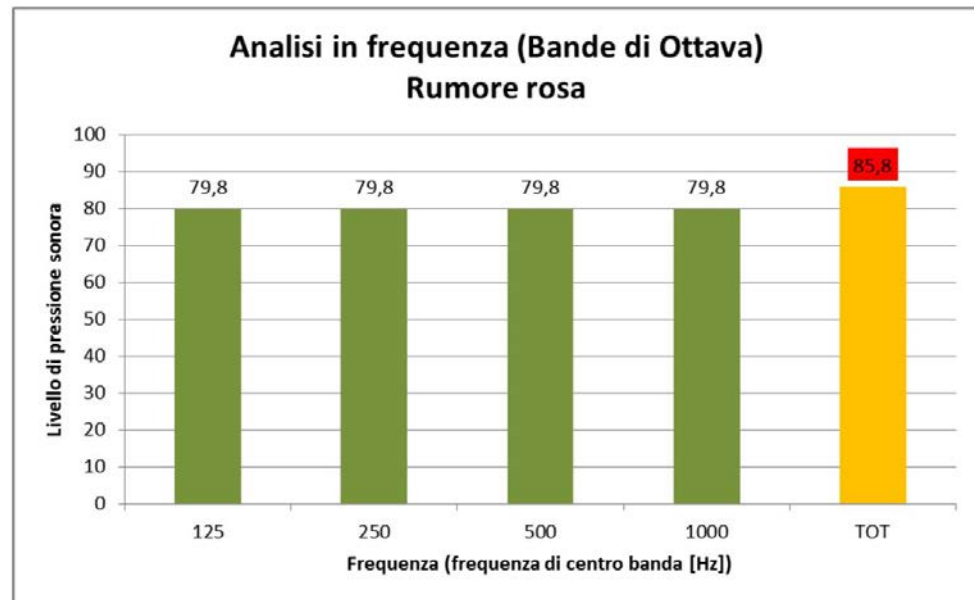
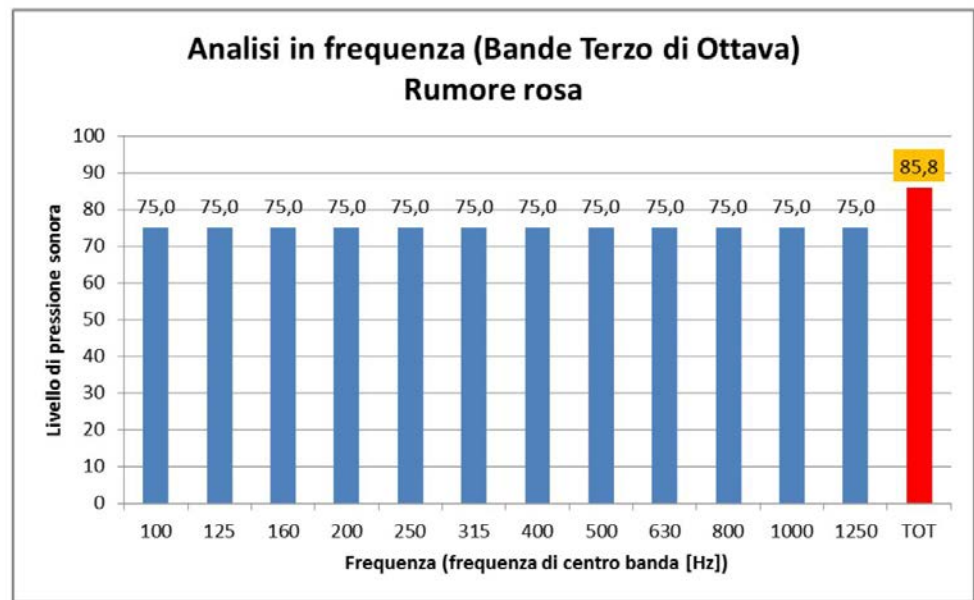
$$L_{125} = 75 + 10 \log_{10} 3 = 79,8 \text{ dB}$$

$$L_{250} = 75 + 10 \log_{10} 3 = 79,8 \text{ dB}$$

$$L_{500} = 75 + 10 \log_{10} 3 = 79,8 \text{ dB}$$

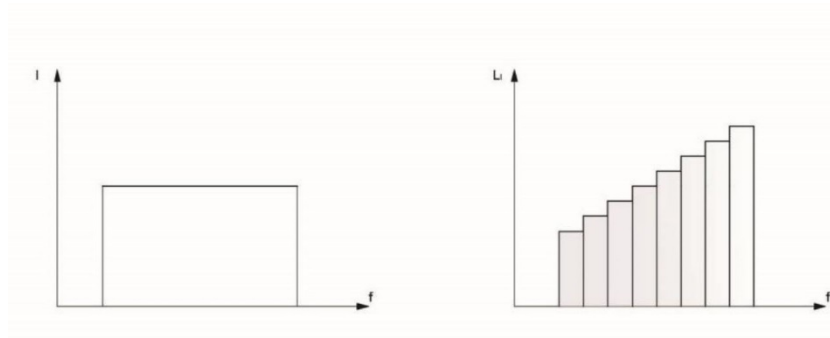
$$L_{1000} = 75_0 + 10 \log_{10} 3 = 79,8 \text{ dB}$$

$$L_{\text{tot}} = 79,8 + 10 \log_{10} 4 = 85,8 \text{ dB}$$



10) Rumore bianco

Determinare il livello di pressione sonora di una sorgente di rumore bianco, sapendo che nella banda di ottava a 1000 Hz il livello parziale è pari a $L_{1000} = 70$ dB (eseguire l'analisi in frequenza da 31,5 Hz a 16.000 Hz)



10) Rumore bianco - SOLUZIONE

$$L_{31,5} = 55 \text{ dB}$$

$$L_{63} = 58 \text{ dB}$$

$$L_{125} = 61 \text{ dB}$$

$$L_{250} = 64 \text{ dB}$$

$$L_{500} = 67 \text{ dB}$$

$$L_{1000} = 70 \text{ dB}$$

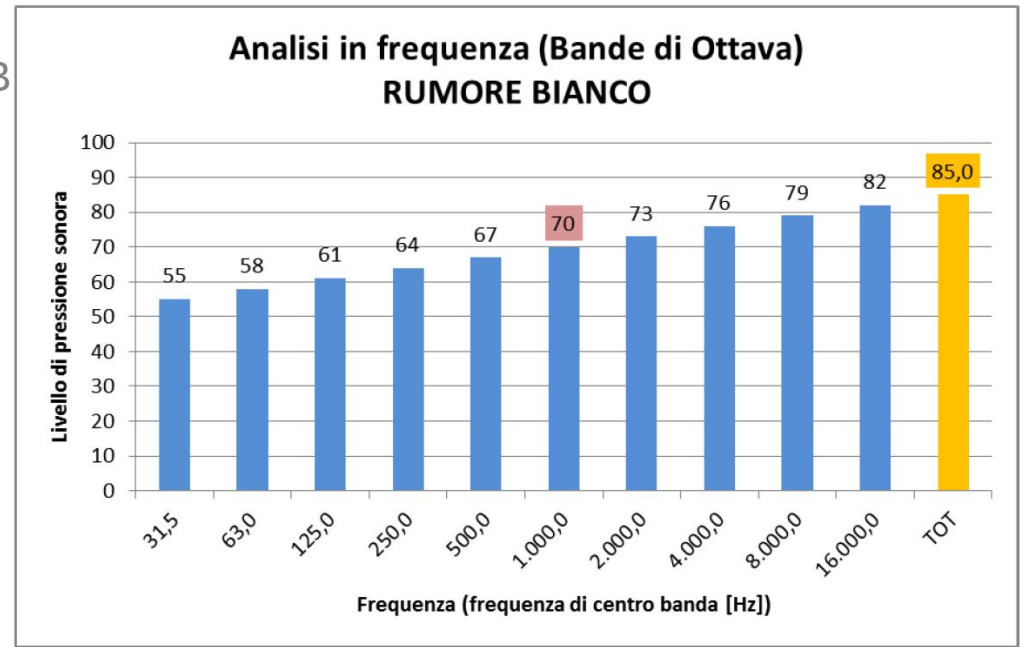
$$L_{2000} = 73 \text{ dB}$$

$$L_{4000} = 76 \text{ dB}$$

$$L_{8000} = 79 \text{ dB}$$

$$L_{16000} = 82 \text{ dB}$$

$$L_{\text{tot}} = 10 \log_{10} (10^{55/10} + 10^{61/10} + \dots) = 85 \text{ dB}$$



11) Medie con livelli di pressione sonora

Noti i seguenti livelli di pressione sonora:

$$L_1 = 70 \text{ dB}$$

$$L_2 = 65 \text{ dB}$$

$$L_3 = 63 \text{ dB}$$

$$L_4 = 50 \text{ dB}$$

determinare:

a. la media energetica $L_{\text{med}} = 10 \log_{10} \frac{1}{n} \sum 10^{\frac{L_i}{10}} = 65,8 \text{ dB}$

b. la media aritmetica $L_{\text{arit}} = \frac{\sum L_i}{n} = 62 \text{ dB}$

c. la media energetica nel tempo energetica $L_{\text{med t}} = 10 \log_{10} \frac{1}{\sum t_i} \sum t_i 10^{\frac{L_i}{10}} = 62,2 \text{ dB}$

$$L_1 = 70 \text{ dB} \quad t_1 = 2\text{h}$$

$$L_2 = 65 \text{ dB} \quad t_2 = 1\text{h}$$

$$L_3 = 63 \text{ dB} \quad t_3 = 1\text{h}$$

$$L_4 = 50 \text{ dB} \quad t_4 = 12\text{h}$$

Curve di ponderazione

Livello sonoro ponderato in curva A (dBA)

Per rappresentare al meglio la risposta umana al suono è necessario compensare strumentalmente il fatto che l'orecchio sente meglio alle alte frequenze piuttosto che alle basse. L'operazione di ponderazione consiste nell'applicare dei coefficienti correttivi, frequenza per frequenza, ai decibel lineari (ovvero privi di ponderazione) rilevati col fonometro in modo da ottenere l'effettiva sensazione umana.

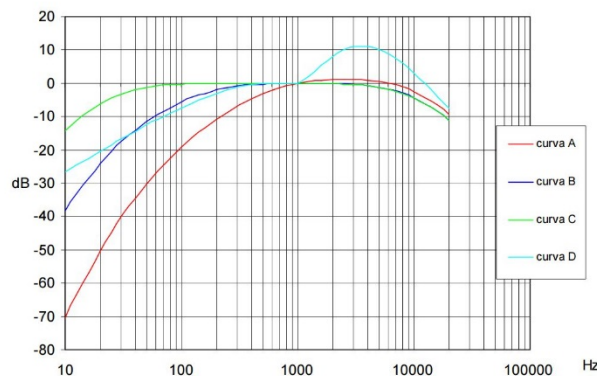
Esistono varie curva da applicare ai vari casi secondo le indicazioni delle normative vigenti:

- **curva A** (per livelli sotto i 60 dB) dB(A)
- **curva B** (tra 60 e 80 dB)
- **curva C** (oltre 80 dB)
- **curva D** (per rumori molto forti, es. aerei)

curva B adatta ai suoni a basse frequenza

curva C adatta ai suoni ad alte frequenza

curva D impiegata per rumore aeroportuale



Frequenza Hz	Ponderazione A	Ponderazione B	Ponderazione C	Ponderazione D
10	- 70,4	- 38,2	- 14,3	- 26,5
12,5	- 63,4	- 33,2	- 11,2	- 24,5
16	- 56,7	- 28,5	- 8,5	- 22,5
20	- 50,5	- 24,2	- 6,2	- 20,5
25	- 44,7	- 20,4	- 4,4	- 18,5
31,5	- 39,4	- 17,1	- 3,0	- 16,5
40	- 34,6	- 14,2	- 2,0	- 14,5
50	- 30,2	- 11,6	- 1,3	- 12,5
63	- 26,2	- 9,3	- 0,8	- 11,0
80	- 22,5	- 7,4	- 0,5	- 9,0
100	- 19,1	- 5,6	- 0,3	- 7,5
125	- 16,1	- 4,2	- 0,2	- 6,0
160	- 13,4	- 3,0	- 0,1	- 4,5
200	- 10,9	- 2,0	0	- 3,0
250	- 8,6	- 1,3	0	- 2,0
315	- 6,6	- 0,8	0	- 1,0
400	- 4,8	- 0,5	0	- 0,5
500	- 3,2	- 0,3	0	0
630	- 1,9	- 0,1	0	0
800	- 0,8	0	0	0
1000	0	0	0	0
1250	+ 0,6	0	0	+ 2,0
1600	+ 1,0	0	- 0,1	+ 5,5
2000	+ 1,2	- 0,1	- 0,2	+ 8,0
2500	+ 1,3	- 0,2	- 0,3	+ 10,0
3150	+ 1,2	- 0,4	- 0,5	+ 11,0
4000	+ 1,0	- 0,7	- 0,8	+ 11,0
5000	+ 0,5	- 1,2	- 1,3	+ 10,0
6300	- 0,1	- 1,9	- 2,0	+ 8,5
8000	- 1,1	- 2,9	- 3,0	+ 6,0
10000	- 2,5	- 4,3	- 4,4	+ 3,0
12500	- 4,3	- 6,1	- 6,2	0
16000	- 6,6	- 8,4	- 8,5	- 4,0

12) Curva di ponderazione

Nota l'analisi per bande d'ottava di un suono, determinare il livello di pressione sonora globale in dB e in dB(A)

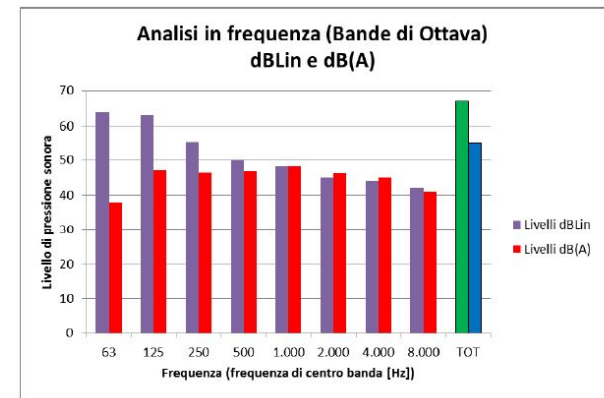
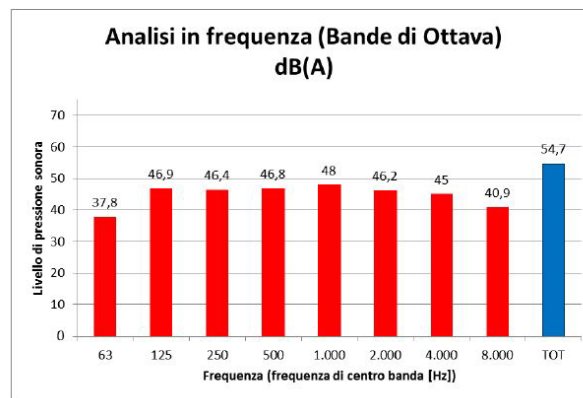
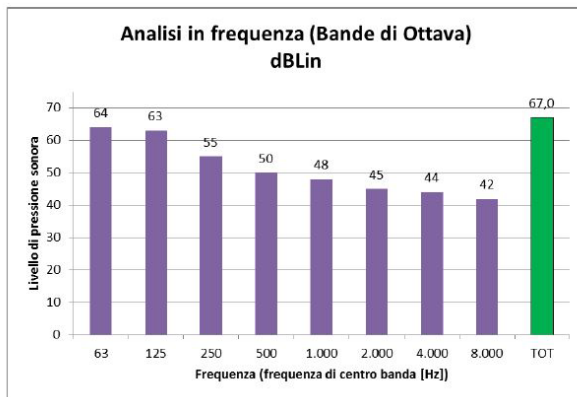
Frequenza (Hz)	63	125	250	500	1000	2000	4000	8000
L_p / ottava (dB)	64,0	63,0	55,0	50,0	48,0	45,0	44,0	42,0

12) Curva di ponderazione - SOLUZIONE

Frequenza (Hz)	63	125	250	500	1000	2000	4000	8000
L_p / ottava (dB)	64,0	63,0	55,0	50,0	48,0	45,0	44,0	42,0
Correzione «A»	-26,2	-16,1	-8,6	-3,2	0,0	+1,2	+1,0	-1,1
L_p / ottava (dB(A))	37,8	46,9	46,4	46,8	48,0	46,2	45,0	40,9

$$L_{T \text{ dB lin}} = 10 \log_{10} (10^{64/10} + 10^{63/10} + \dots) = 67,0 \text{ dB}$$

$$L_{T \text{ dB(A)}} = 10 \log_{10} (10^{37,8/10} + 10^{46,9/10} + \dots) = 54,7 \text{ dB}$$

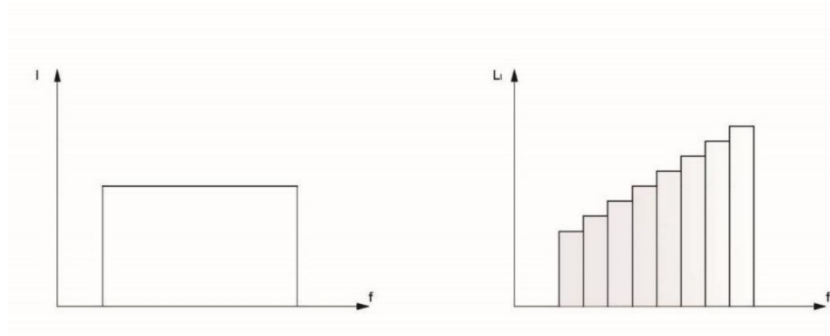


13) Curva di ponderazione + rumore bianco + rumore rosa

Una sorgente di rumore bianco e una di rumore rosa, attivate separatamente, producono entrambe lo stesso livello sonoro complessivo. Quale delle due sorgenti produce il livello sonoro complessivo ponderato A più elevato?

14) Curva di ponderazione + rumore bianco

Una sorgente di rumore bianco ha un livello nella banda di ottava con frequenza centrale 31,5 Hz pari a 55 dB. Determinare il livello sonoro complessivo in dBlin e in dB(A). Eseguire l'analisi in frequenza da 31,5 a 16.000 Hz.

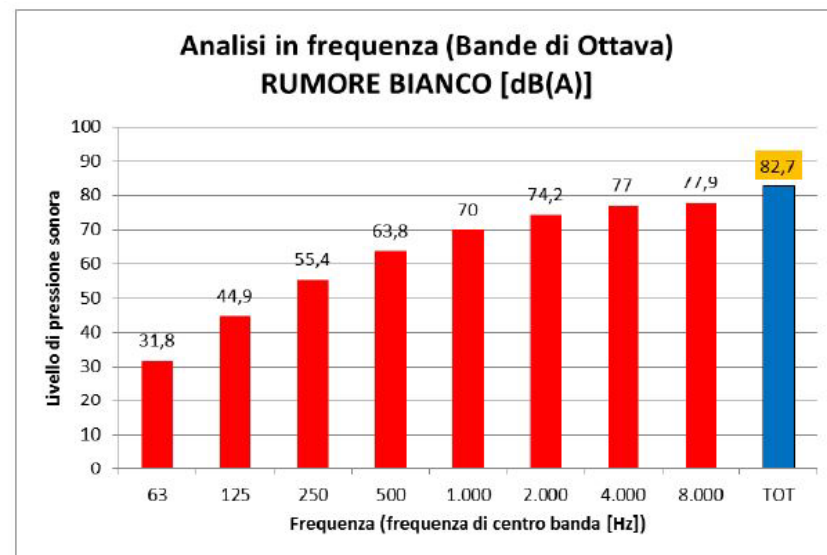
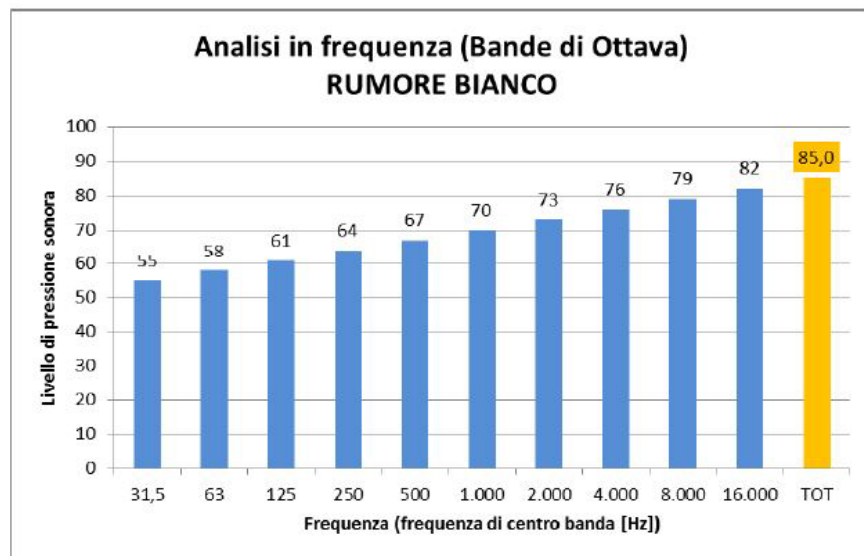


14) Curva di ponderazione + rumore bianco - SOLUZIONE

Frequenza (Hz)	31,5	63	125	250	500	1000	2000	4000	8000	16000
L_p / ottava (dB)	55,0	58,0	61,0	64,0	67,0	70,0	73,0	76,0	79,0	82,0
Correzione «A»	-39,4	-26,2	-16,1	-8,6	-3,2	0,0	+1,2	+1,0	-1,1	-6,6
L_p / ottava (dB)	-	31,8	44,9	55,4	63,8	70	74,2	77,0	77,9	75,4

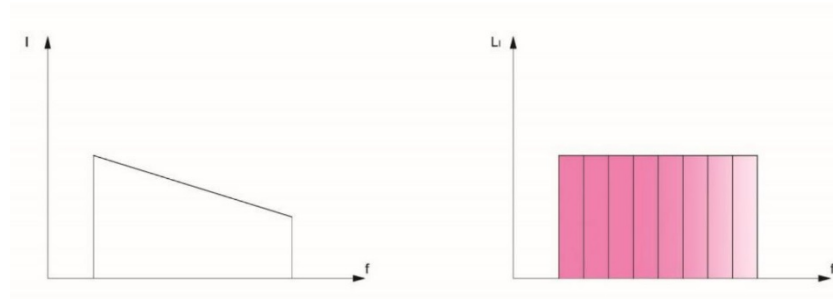
$$L_{T \text{ dB lin}} = 10 \log_{10} (10^{55/10} + 10^{61/10} + \dots) = 85 \text{ dB}$$

$$L_{T \text{ dB(A)}} = 10 \log_{10} (10^{37,8/10} + 10^{46,9/10} + \dots) = 82,7 \text{ dB}$$



15) Curva di ponderazione + rumore rosa

Una sorgente di rumore rosa ha un livello nella banda di ottava con frequenza centrale 31,5 Hz pari a 75 dB. Determinare il livello sonoro complessivo in dBlin e in dB(A). Eseguire l'analisi in frequenza da 31,5 a 16.000 Hz.

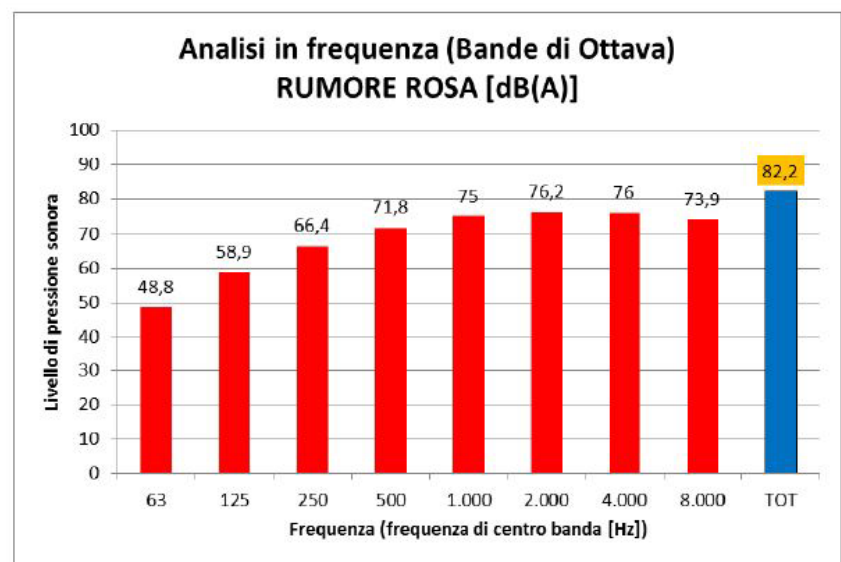
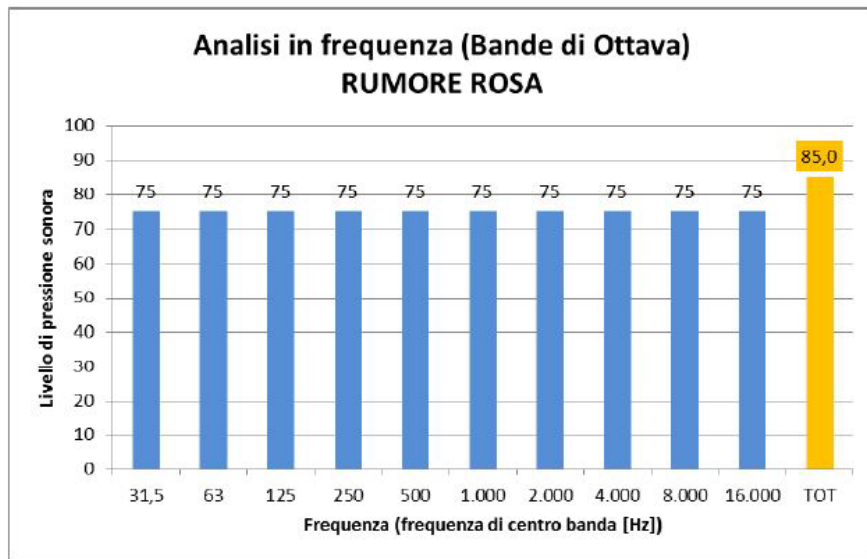


15) Curva di ponderazione + rumore rosa SOLUZIONE

Frequenza (Hz)	31,5	63	125	250	500	1000	2000	4000	8000	16000
L_p / ottava (dB)	75,0	75,0	75,0	75,0	75,0	75,0	75,0	75,0	75,0	75,0
Correzione «A»	-39,4	-26,2	-16,1	-8,6	-3,2	0,0	+1,2	+1,0	-1,1	-6,6
L_p / ottava (dB)	35,6	48,8	58,9	66,4	71,8	75,0	76,2	76,0	73,9	68,4

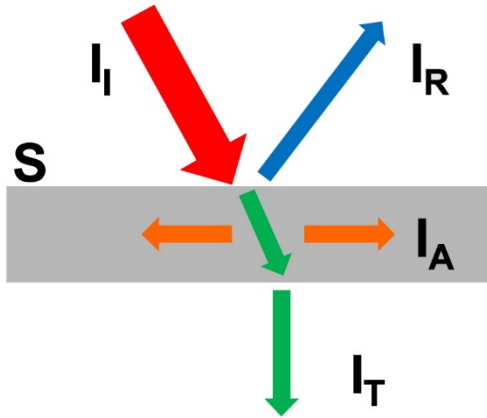
$$L_{T \text{ dB lin}} = 75 + 10 \log_{10} 10 = 85 \text{ dB}$$

$$L_{T \text{ dB(A)}} = 10 \log_{10} (10^{48,8/10} + 10^{58,9/10} + \dots) = 82,2 \text{ dB}$$



Assorbimento, riflessione, trasmissione

L'energia sonora che incide sulla superficie S si divide in tre componenti: una parte viene riflessa dalla superficie, una parte viene assorbita ed una parte trasmessa oltre il materiale/pacchetto



Coefficiente di assorbimento

$$\alpha = I_A/I_i$$

Coefficiente di trasmissione

$$\tau = I_T/I_i$$

Coefficiente di riflessione

$$\rho = I_R/I_i$$

Per il principio di conservazione dell'energia le tre componenti in cui si divide I_i sommate dovranno nuovamente dare I_i

$$I_A + I_T + I_R = I_i$$

$$\alpha + \tau + \rho = 1$$

Tempo di riverberazione

Wallace Clement Sabine (1868-1919) primo studioso di acustica con metodo scientifico.

Professore all'università di Harvard, testò l'acustica della Lecture Hall e comprese che il problema della lunga persistenza del suono che si aveva era dovuto alla grandezza della sala, ai suoi arredi, persone comprese.

Definì il tempo di riverberazione come il tempo necessario affinché la densità di energia sonora decada di 60 dB dal valore originario dopo che la sorgente ha cessato di vibrare.

Tempo di riverberazione $RT_{60} = 0,163 V/A$

V = volume della sala

A = area di assorbimento equivalente = $\sum S_i \alpha_i$

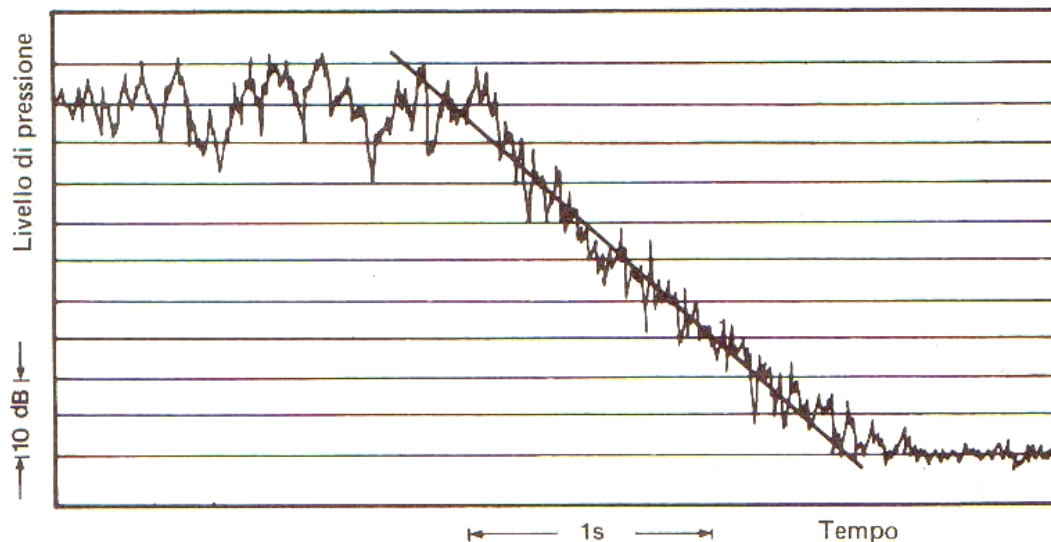


Fig. 3.3 – Esempio di andamento reale del transitorio di estinzione dovuto alla riverberazione (coda sonora), in una sala. In ordinate, la densità di energia rappresentata in scala logaritmica (dB); in ascisse il tempo. La retta inclinata rappresenta l'andamento ideale di tipo esponenziale, previsto dalla approssimazione di Sabine (§ 3.3 e 3.5).

Tempo di riverberazione ottimale

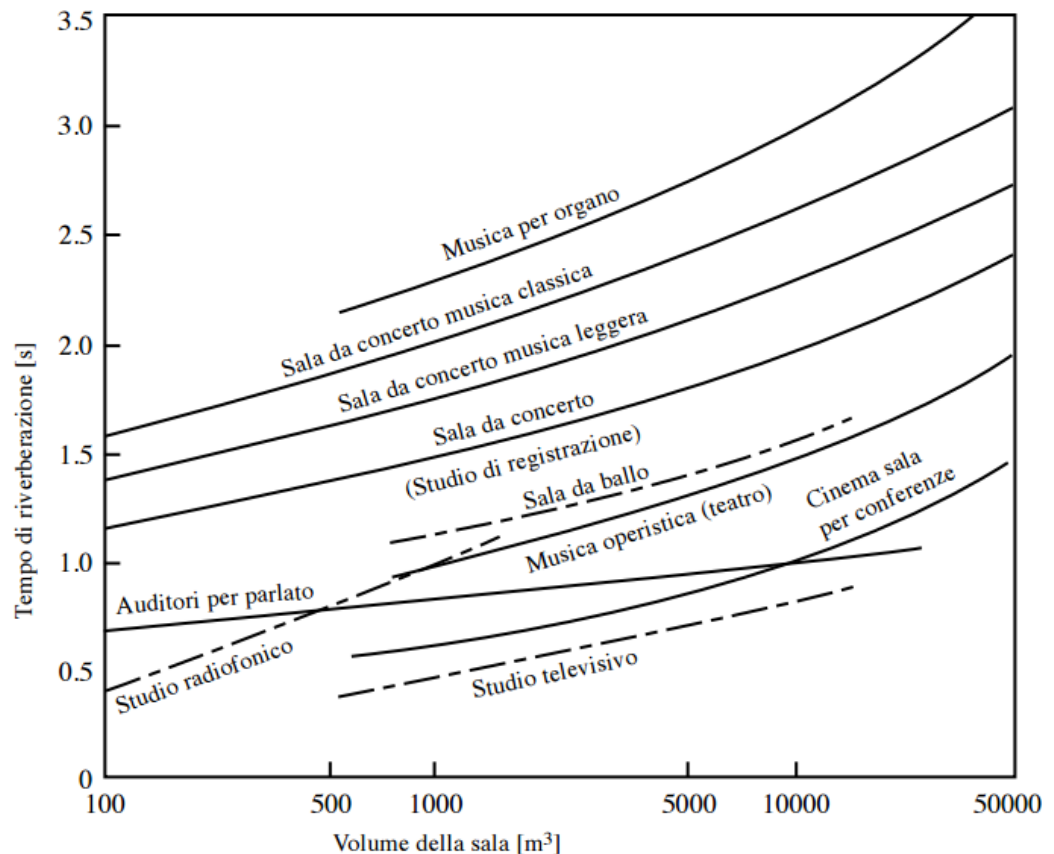
Per la migliore intellegibilità occorre che nel punto di ascolto si abbia un'intensità sonora sufficiente ed una dispersione temporale non eccessiva del suono emesso dalla sorgente.

La riverberazione riveste un duplice ruolo:

- **innalza l'intensità sonora** rispetto a quella del suono diretto;
- **aumenta la dispersione temporale**, incidendo negativamente sulla comprensione delle note e dei fonemi.

Il tempo di riverberazione deve assumere un valore ottimale in modo da offrire il miglior compromesso possibile.

Non ne esiste uno ottimale valido in generale, esso varia principalmente in funzione della **destinazione d'uso** e delle **dimensioni** della sala.

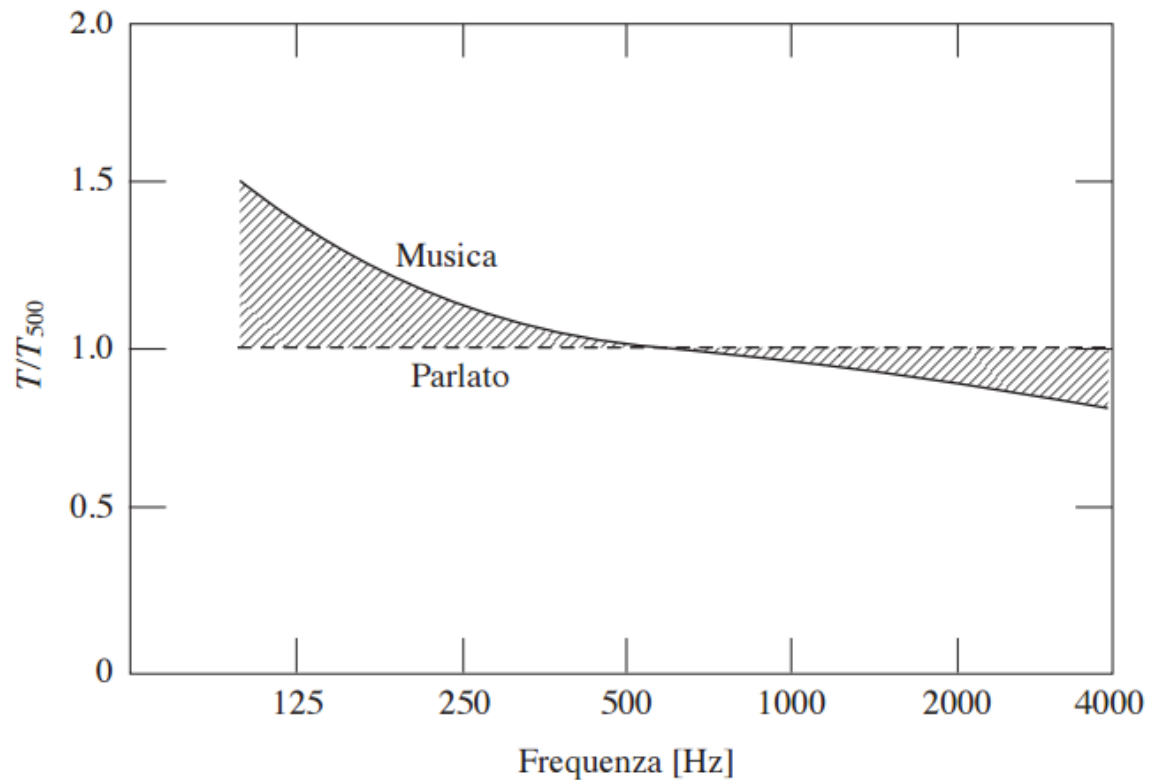


Andamento del tempo di riverberazione ottimale

Il tempo di riverberazione ottimale è **variabile in funzione della frequenza**, alle frequenze più basse può quasi raddoppiare rispetto al valore corrispondente a 500 Hz.

Ambiente riverberante: correzione acustica applicando **pannelli fonoassorbenti**.

I materiali vanno scelti in modo da agire sulle frequenze alle quali il tempo di riverberazione risulta essere troppo elevato



Assorbimento acustico delle superfici

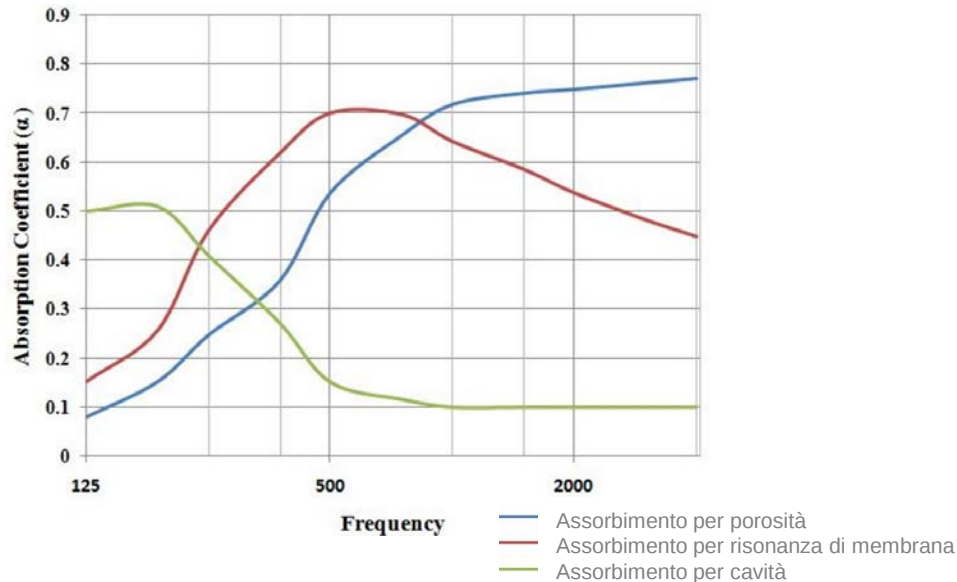
Materiali fonoassorbenti porosi

Andamento del coefficiente di assorbimento al variare dello spessore dello strato, o della distanza dalla parete rigida

Pannelli rigidi forati e montati su materiale cedevole

Risuonatori acustici

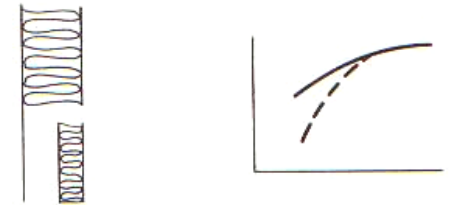
Andamento del coefficiente di assorbimento con la frequenza



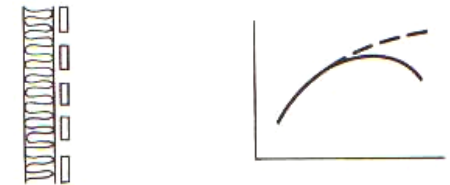
THIN POROUS MATERIAL



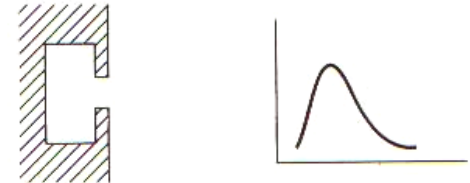
THICKER POROUS MATERIAL (OR WITH AIRSPACE)



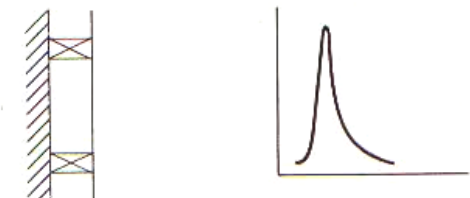
THIN POROUS MATERIAL WITH PERFORATED FACING



ENCLOSED VOLUME RESONATOR



VERY THIN MEMBRANE RESONATOR



16) Tempo di riverberazione

Calcolare il tempo di riverberazione a 500 Hz di un ambiente con le seguenti caratteristiche:
Volume $V = 324 \text{ mc}$

Pareti Superficie totale $S_0 = 122 \text{ mq}$
Coefficiente di assorbimento acustico medio $\alpha_0 = 0.03$ (a 500 Hz)

Soffitto Superficie $S_s = 98 \text{ mq}$
Coefficiente di assorbimento acustico medio $\alpha_s = 0.8$ (a 500 Hz)

Pavimento Superficie $S_p = 98 \text{ mq}$
Coefficiente di assorbimento acustico $\alpha_p = 0.06$ (a 500 Hz)

Il coefficiente di assorbimento medio dell'ambiente risulta:

$$\alpha_{\text{med}} = \sum S_i \alpha_i / \sum S_i = (122 \cdot 0,03 + 98 \cdot 0,8 + 98 \cdot 0,06) / (122 + 98 + 98) = 87,94 / 318 = 0,28$$

Applicando la formula di Sabine per il tempo di riverberazione:

$$\begin{aligned} \text{Tr} &= 0,16 V/A = 0,16 V/(\alpha_{\text{med}} S_{\text{totale}}) = 0,16 V/(\alpha_i S_i) = 0,161 \cdot 324 / (122 \cdot 0,03 + 98 \cdot 0,8 + 98 \cdot 0,06) = \\ \text{Tr} &= 0,59 \text{ sec} \end{aligned}$$

17) Area di assorbimento equivalente e tempo di riverberazione ottimale

Si consideri spazio polivalente con le seguenti dimensioni:

Area in pianta $10 \times 18 \text{ m} = 180 \text{ mq}$

Altezza 6 m

Volume 1080 mc

Attraverso l'emissione di un rumore rosa e le relative misure dei tempi di riverberazione, si elaborano con i software i seguenti valori di T_{20} alle varie frequenze:

Frequenza (Hz)	125	250	500	1000	2000
T_{20}	1,323	1,159	1,010	1,036	0,941

17) Area di assorbimento equivalente e tempo di riverberazione ottimale

Quesito 1 – Calcolo delle aree di assorbimento equivalenti (a.a.e.) dello stato di fatto

Dalla formula di Sabine ($Tr = 0,16 V/A$) troveremo le a.a.e. corrispondenti a ciascuna frequenza, utilizzando per ciascuna il relativo valore di T_{20} . Si usa la formula inversa di Sabine.

$$A = 0,16 * V / T_{20} \quad [\text{mq}]$$

Alla frequenza 500 Hz si ha: $A = 0,16 * V / T_{20} = 0,16 * 1080 / 1,010 = 171,09 \quad [\text{mq}]$

Frequenza (Hz)	125	250	500	1000	2000
a.a.e. originarie (mq)	130,61	149,09	171,09	166,79	183,63

17) Area di assorbimento equivalente e tempo di riverberazione ottimale

Quesito 2 – Calcolo delle a.a.e. ottimale

Consideriamo i seguenti valori del tempo di riverberazione ottimale $T_{20 \text{ ottimale}}$ alle varie frequenze.

Frequenza (Hz)	125	250	500	1000	2000
$T_{20 \text{ ottimale}}$ (s)	0,7	0,6	0,5	0,45	0,4

Considerando come frequenza di riferimento la frequenza centrale a 500 Hz, dovendo arrivare ad un valore $T_{20} = 0,5$ sec partendo dal valore pari a 1,010 sec, occorrerà aggiungere le a.a.e. mancanti, in modo che la formula di Sabine calcolata con le a.a.e. attuali più le a.a.e. aggiuntive restituisca il tempo di riverberazione ottimale che abbiamo fissato.

Si calcola la A relativa al $T_{20 \text{ ottimale}}$:

$$A = 0,16 \cdot V / T_{20 \text{ ottimale}} = 0,16 \cdot 1080 / 0,5 = 345,6 \text{ mq}$$

Essa corrisponde alle a.a.e. ottimali che dovranno essere impiegate nella sala. Si sta calcolando sempre nella frequenza di 500 Hz, ma proprio perché è una frequenza centrale/base, le a.a.e. ottimali trovate sono assunte valide per tutte le altre frequenze:

17) Area di assorbimento equivalente e tempo di riverberazione ottimale

Quesito 3 – Calcolo delle a.a.e. da aggiungere

Le a.a.e. da aggiungere sono quelle che si dovranno avere alla fine (cioè 345.6 mq) meno quelle che già il locale ha, cioè le a.a.e. esistenti, ricavate sopra col valore del tempo di riverbero.

Considerando le a.a.e. già presenti all'interno della sala, si calcola il numero di a.a.e. da aggiungere:

$$\text{a.a.e. da aggiungere} = 345,6 - 171,09 = \mathbf{174.51 \text{ mq}} \text{ (a 500 Hz)}$$

Frequenza (Hz)	125	250	500	1000	2000
a.a.e da aggiungere (mq)	214,99	196,50	174,51	178,80	161,97

17) Area di assorbimento equivalente e tempo di riverberazione ottimale

Quesito 4 – Calcolo delle a.a.e. ottimali

A questo punto si va a cercare il materiale fonoassorbente in modo da rilevare il coefficiente di assorbimento acustico indicato alle varie frequenze. Una volta scelto il materiale, resta da stabilire quanta superficie di questo materiale dovremo utilizzare.

Scegliamo come materiale un pannello in lana di roccia Rockfon, che presenta i seguenti coefficienti di assorbimento alle varie frequenze:

Frequenza (Hz)	125	250	500	1000	2000
Coefficiente di assorbimento Rockfon α	0,5	0,85	1	0,9	1

La regola è metterlo a punto alle frequenze intermedie, 500 e 1000 Hz. Come si vede dalla tabella qui sopra, in corrispondenza di queste frequenze il coefficiente di assorbimento è praticamente 1. In tal caso le a.a.e. sono circa uguali ai mq di materassino da mettere.

Si decide dunque di aggiungere nel locale 175 mq di superficie fonoassorbente (pannelli Rockfon).

17) Area di assorbimento equivalente e tempo di riverberazione ottimale

Quesito 5 – Calcolo assorbimento aggiuntivo

Si calcola l'assorbimento aggiuntivo che il nuovo materiale sta introducendo. Moltiplichiamo la superficie (175 mq per tutto il locale) per il coefficiente di assorbimento di ciascuna frequenza del materiale prescelto.

Assorbimento aggiuntivo = $175 \times 1 = 175$ mq (a 500 Hz)

Frequenza (Hz)	125	250	500	1000	2000
Assorbimento aggiuntivo dovuto a 175 mq di materiale fonoassorbente	87,5	148,75	175	157,5	175

a.a.e. totali finali = $171,09 + 175 = 346,09$ mq (a 500 Hz)

Frequenza (Hz)	125	250	500	1000	2000
a.a.e. totali finali (mq)	218,11	297,84	346,09	324,29	358,63

Il valore ottimale che bisognava ottenere di circa 345.6 è vero a 500 Hz, è quasi vero a 2000 Hz ed è meno vero alle basse frequenze dove di solito ci sono più problemi.

17) Area di assorbimento equivalente e tempo di riverberazione ottimale

Quesito 6 – Verifica T_{20} dopo l'intervento

Occorre adesso verificare il tempo di riverberazione dopo l'intervento correttivo.

$$T_{20 \text{ finale}} = 0,16 V/A_{\text{finali}} = 0,16 \cdot 1080 / 346,09 \text{ (a 500 Hz)}$$

Frequenza (Hz)	125	250	500	1000	2000
$T_{20 \text{ finale}}$	0,792	0,580	0,499	0,533	0,482

Tempo di Riverbero T20 (s)

