

## Acustica negli ambienti chiusi

### Propagazione del suono in un ambiente chiuso

Prendiamo in considerazione una sorgente sonora omnidirezionale **S** (cioè che emette fronti d'onda sferici in ogni direzione con uguale intensità) e la collochiamo in un ambiente a forma di parallelepipedo. Ad una certa distanza **r** collochiamo un ricevitore **R** come mostrato in figura 1. Il suono emesso da **S** raggiunge **R** sia in modo diretto sia attraverso successive riflessioni che avvengono contro le pareti dell'ambiente.

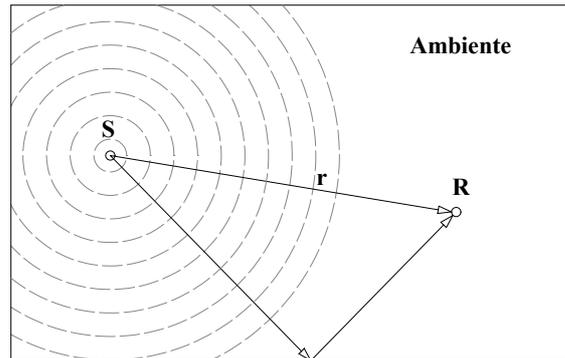


Figura 1 - Propagazione sonora in una stanza

### Metodo delle sorgenti immagine

Il raggio sonoro che si riflette contro una parete percorre una distanza maggiore rispetto al suono che raggiunge il ricevitore **R** in modo diretto. Per determinare questa distanza si utilizza il **metodo delle sorgenti immagine**. Nel caso in cui il suono venga riflesso una sola volta (riflessione di 1° ordine) tale distanza  $r_1$  per costruzione geometrica è quella che percorrerebbe l'onda sonora se provenisse da una sorgente **S'**, speculare della **S** rispetto alla parete di riflessione (figura 2).

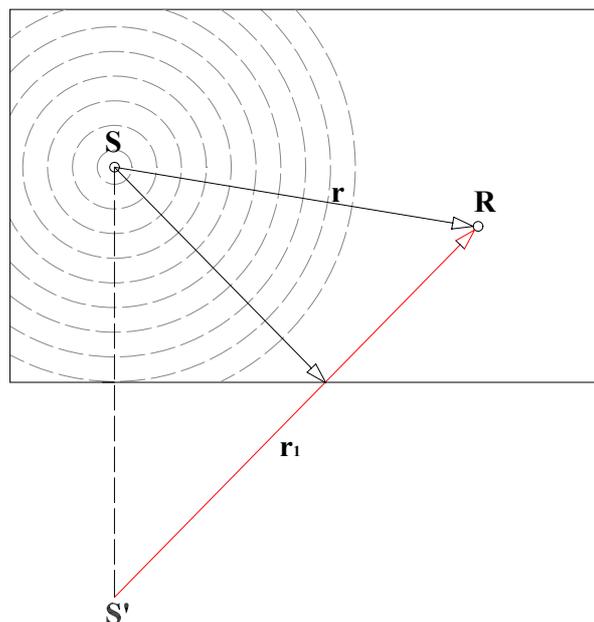


Figura 2 - Costruzione geometrica della sorgente immagine

Nel caso in cui l'onda venga riflessa due volte, si procede determinando la sorgente immagine di 2° ordine, che si ottiene riflettendo la sorgente di 1° ordine nella direzione della seconda riflessione e così via.

Esistono una moltitudine di sorgenti immagine che si ottengono specularizzando le sorgenti di ordine precedente per il numero di facce dell'ambiente. Nel caso del parallelepipedo, considerando solo le riflessioni fino al quarto ordine, avremo questa situazione:

Ordine di riflessione	N° sorgenti immagine
0	1
1	6
2	30
3	150
4	750

### Calcolo dei livelli sonori in un ambiente chiuso

Supponiamo che all'istante  $t=0$  la sorgente prima considerata emetta un impulso con fronti d'onda sempre più grandi. Trascorso il tempo  $t_1$  che il suono impiega a raggiungere R in modo diretto con

$$t_1 = \frac{r}{c} \text{ con } c=340 \text{ m/s (velocità del suono nell'aria)}$$

in prossimità del ricevitore si rileverà un livello sonoro piuttosto elevato che ricade rapidamente a 0, a causa della breve durata dell'impulso. Questo livello che chiamiamo  $L_1$  è il livello sonoro del suono diretto, cioè quello che non ha subito alcuna riflessione ed è pari a

$$L_1 = L_w + 10 \log \frac{Q}{4\pi r^2} \quad (1)$$

Dove  $L_w$  è il livello di potenza della sorgente e  $Q=1$  in quanto la sorgente è omnidirezionale.

Il raggio che viene riflesso dalla parete impiega per raggiungere il ricevitore R un tempo  $t_2$  pari a

$$t_2 = \frac{r_1}{c}$$

ed il livello sonoro  $L_2$  ad esso corrispondente dovrà tener conto non solo della distanza  $r_1$  ma anche del **coefficiente di assorbimento acustico** della parete  $\alpha_1$  e quindi sarà uguale a

$$L_2 = L_w + 10 \log \frac{1}{4\pi r_1^2} + 10 \log(1 - \alpha_1) \quad (2)$$

Per un suono che giunge al ricevitore dopo due riflessioni,  $L_3$  sarà uguale a

$$L_3 = L_w + 10 \log \frac{1}{4\pi r_3^2} + 10 \log [(1 - \alpha_1)(1 - \alpha_2)]$$

(3)

Via via che il suono si riflette sulle pareti i livelli sonori misurati sono più bassi, in quanto ad ogni riflessione il raggio sonoro perde energia, e questo abbassamento segue la legge sferica per cui il livello sonoro cala di 6 dB ogni raddoppio di distanza.

Rappresentando su un sistema cartesiano i livelli sonori via via misurati in funzione del tempo si nota un andamento decrescente che rappresenta la cosiddetta **coda sonora** (figura 3).

I livelli sonori decrescono fino ad un certo punto dove si ha una **coda sonora continua** nel quale non è più possibile separare un'onda riflessa da un'altra in quanto ne arrivano una moltitudine negli stessi istanti.

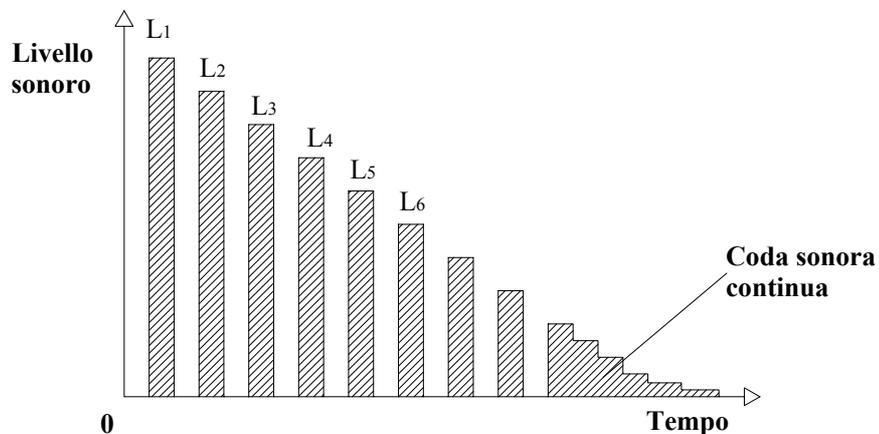


Figura 3 - Livelli sonori di una sorgente impulsiva

Il fenomeno per cui una volta spenta la sorgente sonora impulsiva, le onde riflesse arrivano in più o meno rapida successione al ricevitore con un ritardo rispetto al suono diretto prende il nome di **riverberazione**.

Sostanzialmente è possibile suddividere gli ambienti in due categorie, che si differenziano tra loro per alcune proprietà:

- **ambienti riverberanti**: costruiti appositamente e caratterizzati da un coefficiente di assorbimento nullo e da schermi che rendono uniforme la distribuzione del suono nell'ambiente.
- **ambienti semi-riverberanti**: rappresentano la maggior parte degli ambienti; essi assorbono parte delle onde sonore emesse e di conseguenza si ha una perdita di energia.

Nello studio dell'acustica negli ambienti chiusi noi ci occuperemo sempre di ambienti semi-riverberanti.

A questo proposito è utile introdurre il concetto di **unità assorbenti** di un ambiente. Le unità assorbenti di un ambiente sono definite come il prodotto della sommatoria dei coefficienti di assorbimento  $\alpha_i$  delle facce da cui è costituito, per la superficie  $S_i$  di queste ultime e si misurano in  $m^2$ .

$$\text{UNITA' ASSORBENTI} = \sum \alpha_i S_i$$

Nel caso in cui l'ambiente non è vuoto andranno considerati anche i coefficienti di assorbimento e le superfici degli oggetti, persone ecc. presenti in esso.

A questo punto è possibile determinare il livello sonoro diretto e riverberante in un ambiente chiuso.

Il **livello sonoro diretto** si calcola così:

$$L_{\text{dir}} = L_w + 10 \log \frac{Q}{4\pi r_1^2} \quad (4)$$

Il **livello sonoro riverberante o riflesso** si calcola così:

$$L_{\text{rif}} = L_w + 10 \log \left[ \frac{4}{\sum \alpha_i \cdot S_i} \right] \quad (5)$$

Il **livello sonoro totale** in un ambiente in cui si verifica il fenomeno del riverbero sarà uguale a :

$$L_{\text{tot}} = L_w + 10 \log \left[ \frac{Q}{4\pi r_1^2} + \frac{4}{\sum \alpha_i \cdot S_i} \right] \quad (6)$$

Questa è chiamata **formula del campo semi-riverberante**.

La figura 4 mostra l'andamento del livello sonoro dentro ad una stanza al variare della distanza dalla sorgente nel caso di campo semi-riverberante. Si tratta di un grafico in scala doppio logaritmica poiché sia la distanza dalla sorgente che il livello sonoro sono grandezze logaritmiche.

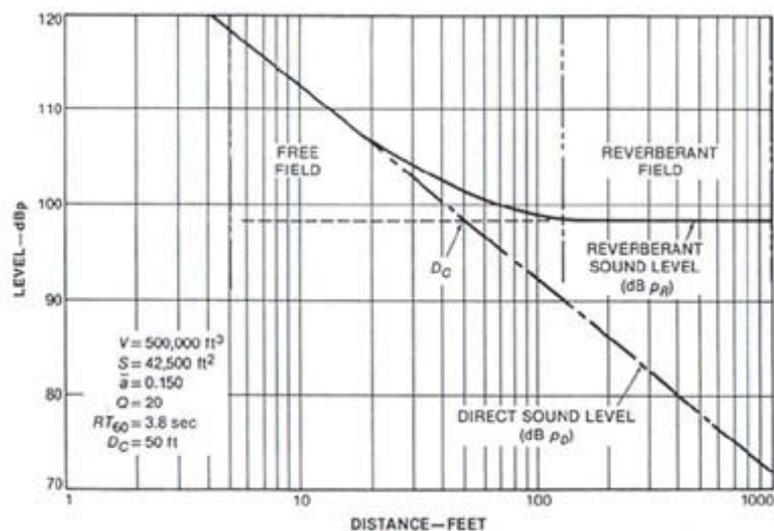


Figura 7 - Andamento del livello del suono diretto e del campo riverberante

Si può notare come la curva che rappresenta il livello sonoro diretto (direct sound level) sia una retta decrescente, infatti la sola presenza del suono diretto determinerebbe un decadimento perfettamente rettilineo del livello sonoro. La curva

che rappresenta il livello riverberante (reverberant sound level) invece si stacca dalla curva del livello diretto e decresce fino ad un certo punto dopo di che diventa una retta orizzontale. Queste due curve determinano sul grafico 3 aree con caratteristiche differenti:

**Campo vicino:** è l' area che precede la retta verticale passante per il punto di intersezione delle due curve; in questa zona per valori superiori di 10 dB a partire dalla retta del livello sonoro riverberante, il campo riverberante è trascurabile.

**Campo semi-riverberante:** va dal campo vicino fino alla retta verticale passante nel punto di intersezione tra la retta del suono diretto e una retta orizzontale con ordinata costante di 10 dB in meno rispetto alla retta orizzontale del suono riverberante. Nel campo semi-riverberante il livello sonoro diminuisce di 6 dB ogni raddoppio di distanza.

**Campo diffuso:** va dal campo semi-riverberante in poi. In questa area il livello di suono diretto è trascurabile.

E' possibile inoltre determinare la cosiddetta **distanza critica ( $d_c$ )**, ovvero la distanza dalla quale il campo sonoro diretto e il campo riverberante assumono lo stesso valore. Per trovare numericamente questo valore si pone  $L_{dir} = L_{riv}$  da cui avremo:

$$L_w + 10 \log \frac{Q}{4 \pi d_c^2} = L_w + 10 \log \frac{4}{\sum \alpha_i \cdot S_i} \quad (7)$$

da cui

$$\frac{Q}{4 \pi d_c^2} = \frac{4}{\sum \alpha_i \cdot S_i}$$

da cui ricaviamo  $d$  :

$$d_c = \sqrt{\left( \frac{Q}{16} \cdot \sum \alpha_i \cdot S_i \right)} \quad (8)$$

### Esempio di calcolo della distanza critica

Abbiamo un ambiente con unità assorbenti  $\sum \alpha_i S_i = 20 \text{ m}^2$  e la direttività della sorgente  $Q$  è pari ad 1. Si vuole determinare la distanza critica.

$$d_c = \sqrt{\left( \frac{1}{16} \cdot 20 \right)} = 1,1 \text{ m}$$

### Analisi temporale di un suono non impulsivo

Lo scopo principale che uno studio acustico di un ambiente deve raggiungere è quello di garantire che il suono diffuso nell'ambiente non giunga al ricevitore in modo distorto ma in modo chiaro e distinto.

Se si considerano dei suoni non impulsivi, per esempio la voce umana e la musica, è possibile caratterizzarli tramite delle unità fondamentali. Le unità fondamentali da cui è composta la voce umana sono i **fonemi**, mentre le unità fondamentali da cui è

composta la musica sono le **note musicali**. Ognuno di queste unità avrà una coda sonora che andrà a "sporcare" il fonema o la nota musicale che segue. Se il fonema o la nota successiva è più alto di quello precedente maschera la sua coda sonora, se è più basso si sovrappone (figura 8).

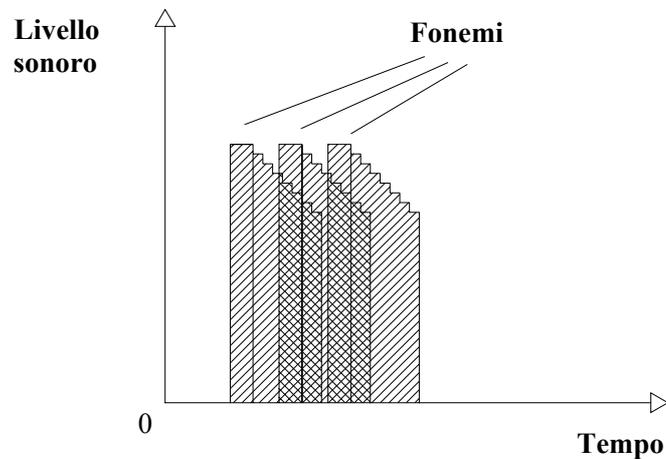


Figura 8- Fonemi e loro coda sonora

### Durata convenzionale della coda sonora o tempo di riverbero

Analizziamo adesso la curva che rappresenta il livello sonoro di una sorgente stazionaria e come varia nel tempo (figura 9).

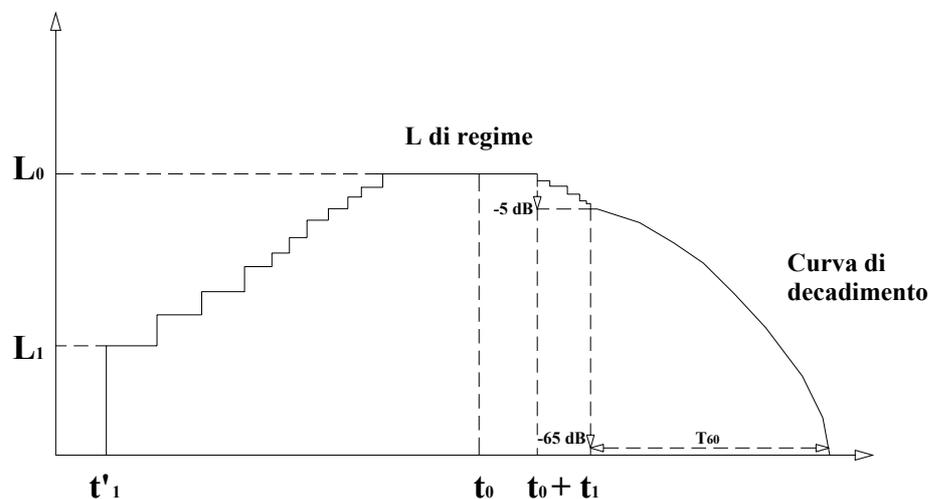


Figura 9- Curva di decadimento di una sorgente sonora stazionaria

Supponiamo di accendere la sorgente sonora e di lasciarla accesa finché non si è raggiunto il livello di regime  $L_0$ . All'istante  $t_0$  quindi spegniamo la sorgente che stava emettendo un suono stazionario. L'ascoltatore posto alla distanza  $d$  istantaneamente non si accorge che la sorgente è stata spenta e fino al tempo uguale a  $t_0 + t_1$  il suono che è nell'aria continua ad arrivare e il livello sonoro rimane costante. Trascorso il tempo  $t_1$  viene a mancare il contributo del suono diretto e il livello sonoro incomincia a calare determinando la cosiddetta **curva di decadimento**. Si nota dal grafico come

la curva di decadimento sia più liscia rispetto alla curva che va in salita, e si dimostra che questa curva su un diagramma lineare nel tempo è una retta.

Questo fenomeno fu studiato da Sabine all'inizio del XX secolo e portò alla formulazione della **durata convenzionale della coda sonora** chiamata anche **tempo di riverberazione o di riverbero**.

Il tempo di riverbero è definito come il tempo necessario affinché il livello sonoro decada di 60 dB ed è chiamato  $T_{60}$ .

Per fare questa valutazione tuttavia occorre uscire dal tratto in cui la curva è irregolare e farla nel tratto liscio che segue. Secondo la normativa **ISO3382 del 1997** il tratto su cui valutare la pendenza media della curva deve iniziare a -5 dB rispetto al livello  $L_0$ .

In termini pratici la misurazione del  $T_{60}$  avviene spegnendo la sorgente, si attende che il livello decresca di 5 dB, poi si attiva un cronometro e lo si spegne quando il livello si è ridotto di 60 dB. Il  $T_{60}$  stabilisce così quanto un ambiente è riverberante. Spesso diventa più comodo utilizzare intervalli di decrescita sonora inferiori come 20 dB o 30 dB. In questo caso per ottenere il  $T_{60}$  si dovrà moltiplicare il tempo ottenuto per 3 e per 2 rispettivamente.

Avremo che  $T_{20} = t_{20} \times 3 = T_{60}$  e che  $T_{30} = t_{30} \times 2 = T_{60}$ .

Se si conosce il volume  $V$  di un ambiente e le unità assorbenti si può utilizzare la formula di Sabine per calcolare  $T_{60}$  secondo cui:

$$T_{60} = 0,16 \cdot \frac{V}{\sum \alpha_i \cdot S_i} \quad (9)$$

In generale un ambiente è molto riverberante quando il tempo di riverbero è superiore a 2 secondi, viceversa è molto asciutto se il tempo di riverbero è sotto al secondo. In un ambiente un po' di riverbero fa bene, valori troppo elevati fanno male. Il tempo di riverbero è quindi uno dei principali parametri di progettazione acustica; per ogni tipo di sala esistono dei valori di  $T_{60}$  ottimali:

Utilizzo	$T_{60}$ ottimo
Sala registrazione	0,3 s
Aula piccola	0,5 s
Aula grande	1 s
Cinema	0,7 s- 0,8 s
Teatro d'epoca	1,3 s-1,5 s
Concert Hall	1,7 s- 2,3 s
Chiesa	8 s - 10 s

### Calcolo del coefficiente di assorbimento di un materiale

Supponiamo di voler calcolare il coefficiente di assorbimento acustico di un materiale di area  $A$ , e immaginiamo di conoscere le dimensioni dell'ambiente dove andrà collocato. Si procede innanzitutto calcolando il  $T_{60}$  dell'ambiente senza il materiale:

$$T_{60}(1) = 0,16 \cdot \frac{V}{\sum \alpha_i \cdot S_i}$$

Lezione del 09/01/2003 - ore 8,30 - 10,30

Successivamente si introduce nell'ambiente il materiale di cui voglio determinare  $\alpha$  e determino il nuovo  $T_{60}$  :

$$T_{60}(2) = 0,16 \cdot \frac{V}{\left[ \left( \sum \alpha_i \cdot S_i \right) + \alpha \cdot A \right]}$$

Da questa ricaverò  $\alpha$ .