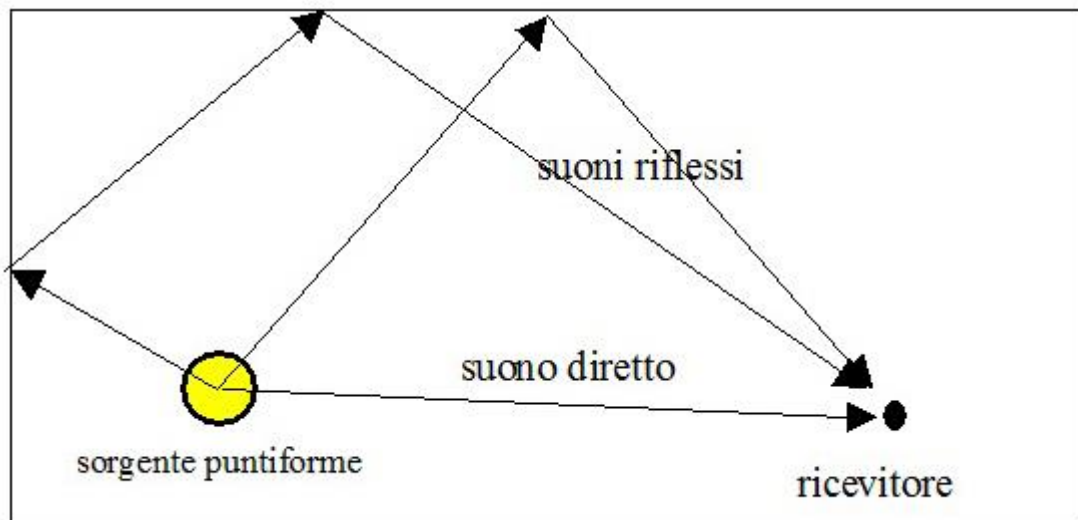


## ACUSTICA DEGLI AMBIENTI CHIUSI

All'interno di un ambiente chiuso il suono è il risultato della sovrapposizione delle onde dirette e delle onde riflesse.

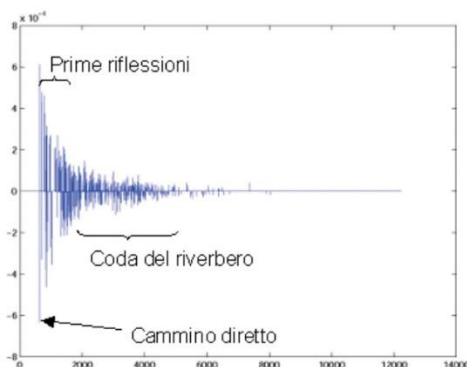
Nel **campo diretto**, le onde provengono dalla sorgente e raggiungono direttamente il ricevente, senza incontrare ostacoli.

Nel **campo riflesso** o riverberante invece, le onde riflesse rimbalzano sulle pareti che delimitano l'ambiente una o più volte e di conseguenza arrivano al ricevente con un maggiore ritardo e subendo delle alterazioni dello spettro. Tanto più il percorso delle onde riflesse è lungo, tanto più il tempo di volo del suono emesso dalla sorgente aumenta; il tempo di volo è dato dal rapporto tra la distanza della sorgente e la velocità del suono nel tempo ( $c$ ).



L'energia riflessa dalle superfici di confine dipende dai coefficienti di assorbimento, di riflessione e di trasmissione.

## SONOGRAMMA O RISPOSTA ALL'IMPULSO

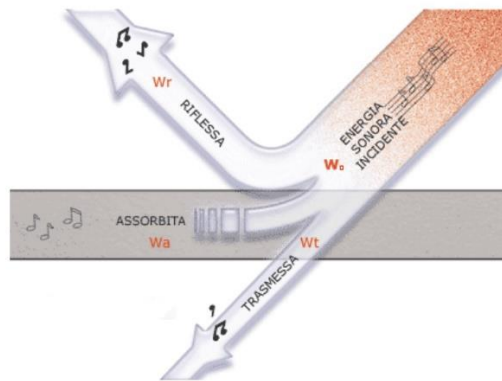


L'effetto delle riflessioni può essere graficamente riportato tramite un diagramma che riporta il suono in dB in funzione del tempo.

In ambiente aperto il grafico riporterebbe solo il primo picco, cioè il suono diretto; al contrario, in un ambiente chiuso, dopo l'arrivo del suono

diretto si evidenziano successivi impulsi con tempi progressivamente crescenti.

## COEFFICIENTI DI RIFLESSIONE, ASSORBIMENTO E TRASMISSIONE



L'equazione di bilancio energetico per un'onda che incide su una parete:

- $W_0 = W_r + W_a + W_t$

Dove:

$W_0$  = potenza sonora incidente

$W_r$  = potenza sonora riflessa

$W_a$  = potenza sonora assorbita che si dissipa in calore

$W_t$  = potenza sonora di trasmissione che attraversa la parete

Dividendo l'equazione di bilancio per  $W_0$  si ottiene:

$$\frac{W_0}{W_0} = \frac{W_r}{W_0} + \frac{W_a}{W_0} + \frac{W_t}{W_0} \rightarrow 1 = r + a + t$$

Dove:

$$r = \frac{W_r}{W_0} \text{ coefficiente di riflessione}$$

$$a = \frac{W_a}{W_0} \text{ coefficiente di assorbimento}$$

$$t = \frac{W_t}{W_0} \text{ coefficiente di trasmissione}$$

**Il valore dei coefficienti  $r$ ,  $a$ ,  $t$  è compreso tra 0 e 1:  $0 \leq r, a, t \leq 1$**

Tali valori dipendono dal materiale della parete, dalla frequenza, dall'angolo d'incidenza e dall'onda della pressione sonora.

## COEFFICIENTE DI ASSORBIMENTO ACUSTICO

Il coefficiente di assorbimento viene sostituito dal **coefficiente di assorbimento acustico apparente  $\alpha$** :

$$\alpha = 1 - r = a + t$$

Dove:

a = energia assorbita e trasformata in calore

t = energia trasmessa

Per il coefficiente di trasmissione si è soliti utilizzare il valore espresso in dB, indicato con R, chiamato **potere fonoisolante**.

$$R = 10 \log \frac{1}{t}$$

Tramite il coefficiente di assorbimento acustico apparente si può ricavare il suono che rimbalza nell'ambiente:

$$r = 1 - \alpha$$

Nel caso di una parete aperta il coefficiente di trasmissione di quell'apertura è  $t = 1$ , mentre il coefficiente di assorbimento è  $a = 0$ , di conseguenza il coefficiente di assorbimento  $\alpha = 1$

## **CAMPO LIBERO, RIVERBERANTE E SEMIRIVERBERANTE**

All'interno di un ambiente chiuso il campo acustico può essere di tre tipi:

- **Campo libero**
- **Campo riverberante**
- **Campo semiriverberante**

### CAMPO LIBERO:

Un campo si dice libero quando si trova in prossimità della sorgente, in una zona in cui prevale il contributo dell'energia diretta, rispetto a quello dell'energia riflessa che risulta trascurabile.

### LIVELLO DI PRESSIONE SONORA

$$L_p = L_w + 10 \log \left( \frac{Q}{4\pi d^2} \right)$$

Dove:

$L_w$  = livello di potenza sonora di una sorgente

Q = direttività della sorgente

d = distanza tra la sorgente e il ricevitore

In campo libero il livello sonoro decresce di 6 dB per ogni raddoppio della distanza d.

## CAMPO RIVERBERANTE

Un campo si dice riverberante quando il numero delle riflessioni prodotte dalle pareti laterali è tanto elevato da formare un campo acustico uniforme in tutto l'ambiente.

### LIVELLO DI PRESSIONE SONORA

$$L_p = L_w + 10 \log \left( \frac{4}{A} \right)$$

Dove:

Il numero 4 deriva dalla definizione di **libero cammino medio** ( $L_{CM}$ ), che è la distanza media che il suono ha tra un rimbalzo e quello successivo.

$$L_{CM} = 4 \frac{V}{S_{tot}}$$

$L_w$  = livello di potenza sonora di una sorgente

$A$  = area equivalente di assorbimento acustico, detta anche "unità assorbente del locale" o "assorbimento totale".

$$A = \alpha \cdot S = \sum_i \alpha_i \cdot S_i \quad [m^2]$$

L'eguaglianza è data dal prodotto degli  $\alpha$  del locale sulle singole superfici moltiplicata per le  $S$  di ciascuna superficie.

## CAMPO SEMIRIVERBERANTE

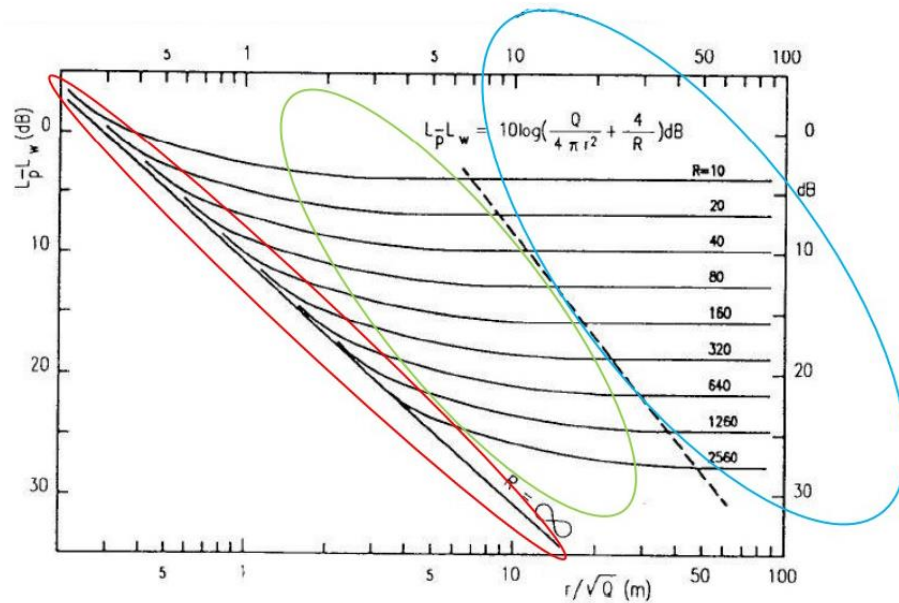
Un campo si dice semiriverberante quando al suo interno esistono contemporaneamente zone di campo libero e zone di campo riverberante.

### LIVELLO DI PRESSIONE SONORA

$$L_p = L_w + 10 \log \left( \frac{Q}{4\pi d^2} + \frac{4}{A} \right)$$

Il livello di pressione sonora di un campo semiriverberante è dato dalla somma energetica tra il campo riverberante e quello libero.

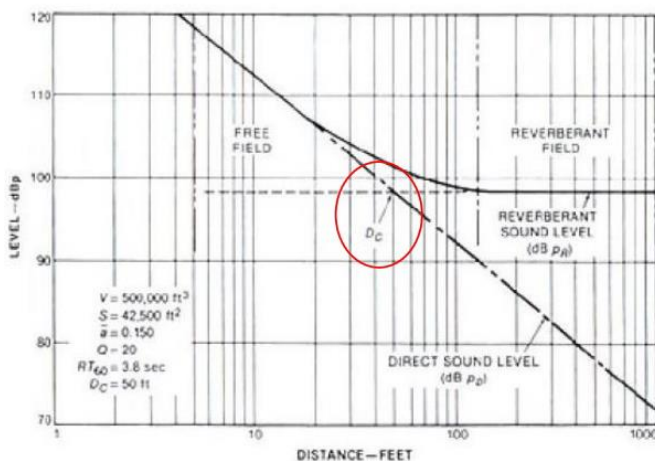
Allontanandosi dalla sorgente, il contributo del suono diretto è trascurabile rispetto al suono riverberante, mentre avvicinandosi alla sorgente il contributo del suono riflesso perde valore.



Nel grafico sono rappresentate nell'ordinata il livello sonoro e in ascissa la distanza.

Il **campo rosso** delimita la zona in cui è posizionata la retta del campo libero, nella quale  $A = \infty$ , la **retta** rappresenta il caso limite di campo libero, (6dB per il raddoppio della distanza  $d$ ), quindi un ambiente privo di riflessioni. Il **campo azzurro** è puramente riverberante. Il **campo verde** è la zona semiriverberante.

## DISTANZA CRITICA



La **distanza critica** è quella distanza dalla sorgente dove il suono riflesso assume lo stesso valore del suono diretto.

Per percepire una buona acustica all'interno di un locale chiuso è necessario essere all'interno della distanza critica.

$$L_p(d) = L_w + 10 \log \left( \frac{Q}{4\pi d^2} + \frac{4}{\sum_i \alpha_i \cdot S_i} \right)$$

$$\frac{Q}{4\pi d^2} = \frac{4}{\sum_i \alpha_i \cdot S_i} \quad \text{da cui} \quad d_{cr} = \sqrt{\frac{Q \cdot \alpha \cdot S}{16 \cdot \pi}}$$

Dove:

$$A = \sum_i \alpha_i \cdot S_i$$

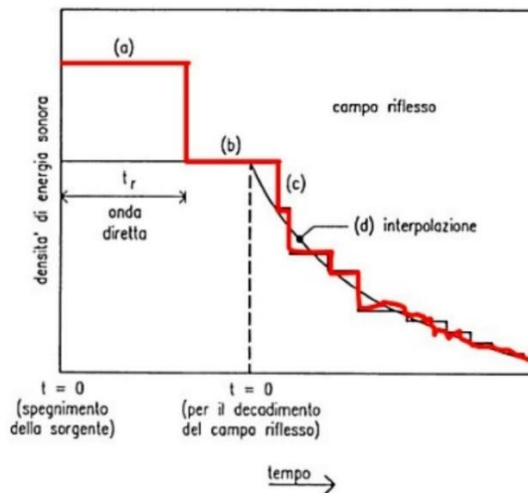
Q = direttività

$\alpha \cdot S$  = assorbimento

16 $\pi$  = costante geometrica

## TEMPO DI RIVERBERO

Per tempo di riverbero si intende il tempo necessario in cui una volta spenta la sorgente il livello sonoro scende di 60 dB.



- $TR = 0.16 \cdot \frac{V}{\sum_i \alpha_i \cdot S_i}$  (s) → **FORMULA DI SABINE**

Dove V è il volume dell'ambiente.

- $A = \sum_i \alpha_i \cdot S_i$  → area equivalente di assorbimento acustico

Per calcolare A servono i coefficienti di assorbimento di tutti i materiali.

## Coefficienti di assorbimento dei materiali

| Tipo di materiale/elemento                                 | Spessore [mm] | Coefficiente di assorbimento per bande d'ottava |      |      |      |      |      |      |      | $\alpha_w$ |         |
|--|---------------|---|------|------|------|------|------|------|------|------------|---------|
|  |               | 63  | 125  | 250  | 500  | 1000 | 2000 | 4000 | 8000 |            |         |
| <i>Superfici interne normali</i>                           |               |   |      |      |      |      |      |      |      |            |         |
| Muratura in mattoni  | -             | 0,05  | 0,05 | 0,04 | 0,02 | 0,04 | 0,05 | 0,05 | 0,05 | 0,05       | 0,05    |
| Calcestruzzo   | -             | 0,01  | 0,01 | 0,01 | 0,02 | 0,02 | 0,02 | 0,03 | 0,03 | 0,03       | 0       |
| Lastra di vetro di 1 m <sup>2</sup> (spessore fino a 4 mm) | 4             | 0,25  | 0,35 | 0,25 | 0,20 | 0,10 | 0,05 | 0,05 | 0,05 | 0,05       | 0,1 (L) |
| Lastra di vetro di 1 m <sup>2</sup> (spessore 6 mm)        | 6             | 0,08  | 0,15 | 0,06 | 0,04 | 0,03 | 0,02 | 0,02 | 0,02 | 0,02       | 0,05    |
| Marmo o piastrelle vetrificate                             | -             | 0,05  | 0,05 | 0,05 | 0,05 | 0,05 | 0,05 | 0,05 | 0,05 | 0,05       | 0,05    |
| Intonaco su muro pieno                                     | 12            | 0,04  | 0,04 | 0,05 | 0,06 | 0,08 | 0,04 | 0,06 | 0,05 | 0,05       | 0,1     |
| Acqua (superficie di una piscina)                          | -             | 0,01  | 0,01 | 0,01 | 0,01 | 0,01 | 0,02 | 0,02 | 0,02 | 0,02       | 0       |

| <i>Rivestimenti di pareti e soffitti</i>  | Spessore [mm] | 63   | 125  | 250  | 500  | 1000 | 2000 | 4000 | 8000 | $\alpha_w$ |
|---|---------------|------|------|------|------|------|------|------|------|------------|
| Tende appese a pieghe contro un muro pieno  | -             | 0,05 | 0,05 | 0,15 | 0,35 | 0,40 | 0,50 | 0,50 | 0,40 | 0,4        |
| Intonaco "acustico" (valori tipici)   | 12            | 0,05 | 0,10 | 0,15 | 0,20 | 0,25 | 0,30 | 0,35 | 0,35 | 0,25       |
| Materassini di lana di vetro o di roccia (valori tipici per materiali di media densità)   | 25            | 0,05 | 0,10 | 0,30 | 0,65 | 0,85 | 0,85 | 0,80 | 0,75 | 0,6 (MH)   |
| Materassini di lana di vetro o di roccia (valori tipici per materiali di media densità)   | 50            | 0,10 | 0,20 | 0,45 | 0,65 | 0,75 | 0,80 | 0,80 | 0,80 | 0,7        |
| Materassini di lana di vetro o di roccia (valori tipici per materiali di media densità)   | 100           | 0,25 | 0,45 | 0,75 | 0,80 | 0,85 | 0,85 | 0,90 | 0,85 | 0,85       |
| Materassini di lana di vetro o di roccia (valori tipici per materiali di media densità)   | 150           | 0,35 | 0,55 | 0,90 | 0,90 | 0,85 | 0,90 | 0,95 | 0,95 | 0,9        |
| Schiuma di poliuretano espanso a cellule aperte   | 25            | 0,10 | 0,15 | 0,30 | 0,60 | 0,75 | 0,85 | 0,90 | 0,90 | 0,6 (H)    |
| Schiuma di poliuretano espanso a cellule aperte   | 50            | 0,15 | 0,25 | 0,50 | 0,85 | 0,95 | 0,90 | 0,90 | 0,90 | 0,8        |
| Schiuma di poliuretano espanso a cellule aperte   | 100           | 0,30 | 0,50 | 0,70 | 0,95 | 1    | 1    | 1    | 1    | 0,95       |
| Lastra di gesso, di 9 mm di spessore, fissata su listelli di legno con interasse di 0,5 m; intercapedine d'aria di 18 mm riempita con lana di vetro | 27            | 0,25 | 0,30 | 0,20 | 0,15 | 0,05 | 0,05 | 0,05 | 0,05 | 0,1 (L)    |
| Legno compensato, di 5 mm di spessore, fissata su listelli di legno con interasse di 1 m; intercapedine d'aria di 50 mm riempita con lana di vetro  | 55            | 0,30 | 0,40 | 0,35 | 0,20 | 0,15 | 0,05 | 0,05 | 0,05 | 0,15 (L)   |
| Legno compensato, di 12 mm di spessore, fissata su listelli di legno con interasse di 1 m; intercapedine d'aria di 59 mm riempita con lana di vetro | 71            | 0,25 | 0,30 | 0,20 | 0,15 | 0,10 | 0,15 | 0,10 | 0,05 | 0,15 (L)   |
| Masonite, di 3 mm di spessore, con rivestimento in feltro di 50 mm  | 53            | 0,50 | 0,90 | 0,45 | 0,25 | 0,15 | 0,10 | 0,10 | 0,05 | 0,15 (L)   |
| Pannelli di gesso per rivestimenti murali e controsoffittature con grandi intercapedini d'aria  | -             | 0,20 | 0,20 | 0,15 | 0,10 | 0,05 | 0,05 | 0,05 | 0,05 | 0,1 (L)    |
| Cartone di fibra su supporto rigido   | 12            | 0,05 | 0,05 | 0,10 | 0,15 | 0,25 | 0,30 | 0,30 | 0,25 | 0,25       |

| Tipo di materiale/elemento  | Spessore [mm] | Coefficiente di assorbimento per bande d'ottava |      |      |      |      |      |      |      | $\alpha_w$ |          |
|---|---------------|---|------|------|------|------|------|------|------|------------|----------|
|   |               | 63  | 125  | 250  | 500  | 1000 | 2000 | 4000 | 8000 |            |          |
| <i>Pavimentazioni</i>   |               |   |      |      |      |      |      |      |      |            |          |
| Battuto di cemento  | -             | 0,05  | 0,05 | 0,05 | 0,05 | 0,05 | 0,05 | 0,05 | 0,05 | 0,05       | 0,05     |
| Moquette a pelo raso, su substrato di feltro  | 6             | 0,05  | 0,05 | 0,05 | 0,10 | 0,20 | 0,45 | 0,65 | 0,65 | 0,65       | 0,2 (H)  |
| Moquette a pelo medio, su substrato di gommapiuma   | 10            | 0,05  | 0,05 | 0,10 | 0,30 | 0,50 | 0,65 | 0,70 | 0,65 | 0,65       | 0,35 (H) |
| Moquette a pelo alto, su substrato di gommapiuma  | 15            | 0,05  | 0,15 | 0,25 | 0,50 | 0,60 | 0,70 | 0,70 | 0,65 | 0,65       | 0,5 (H)  |
| Piastrelle di gomma   | 6             | 0,05  | 0,05 | 0,05 | 0,10 | 0,10 | 0,05 | 0,05 | 0,05 | 0,05       | 0,1      |
| <i>Pannelli per rivestimenti acustici</i>   |               |   |      |      |      |      |      |      |      |            |          |
| Fissati direttamente a parete o a soffitto, con piccola intercapedine d'aria (valori minimi)  | 12-75         | 0,05  | 0,10 | 0,25 | 0,50 | 0,60 | 0,60 | 0,45 | 0,45 | 0,45       | 0,5      |
| Fissati direttamente a parete o a soffitto, con piccola intercapedine d'aria (valori massimi) | 12-75         | 0,15  | 0,20 | 0,60 | 0,80 | 0,85 | 0,80 | 0,75 | 0,75 | 0,75       | 0,8      |
| Montati come soffitti sospesi (valori minimi)   | -             | 0,15  | 0,30 | 0,40 | 0,50 | 0,65 | 0,75 | 0,70 | 0,65 | 0,65       | 0,6      |
| Montati come soffitti sospesi (valori massimi)  | -             | 0,30  | 0,50 | 0,60 | 0,90 | 0,90 | 0,85 | 0,80 | 0,75 | 0,75       | 0,85     |
| <i>Arredi</i>   |               |   |      |      |      |      |      |      |      |            |          |
| Assorbimento totale equivalente in m <sup>2</sup>   |               |   |      |      |      |      |      |      |      |            |          |
| Poltrona imbottita, occupata  | -             | 0,15  | 0,20 | 0,40 | 0,45 | 0,45 | 0,50 | 0,45 | 0,40 | 0,40       | 0,5      |
| Sedia in legno o parzialmente imbottita, occupata   | -             | 0,10  | 0,15 | 0,25 | 0,40 | 0,40 | 0,45 | 0,40 | 0,35 | 0,35       | 0,45     |
| Poltrona imbottita, non occupata  | -             | 0,05  | 0,10 | 0,20 | 0,30 | 0,30 | 0,30 | 0,35 | 0,30 | 0,30       | 0,3      |
| Sedia in legno o parzialmente imbottita, non occupata   | -             | 0,02  | 0,03 | 0,05 | 0,05 | 0,10 | 0,15 | 0,10 | 0,10 | 0,10       | 0,1      |