

**6**

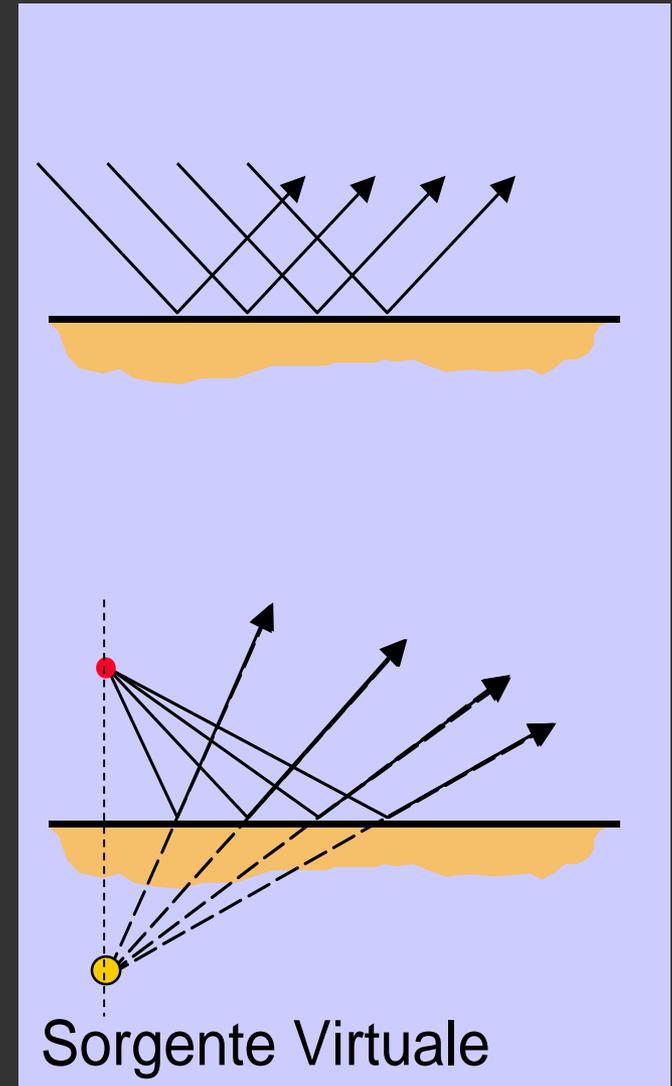
**Lezioni di acustica**

# **Acustica architettonica**

## Riflessione speculare

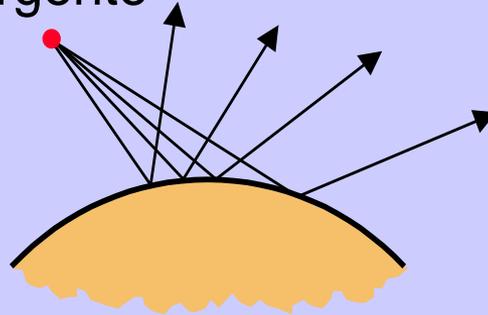
In prima approssimazione le onde sonore si possono considerare alla pari di raggi rettilinei fuoriuscenti dalla sorgente e si può ammettere una riflessione speculare ossia l'uguaglianza dell'angolo di incidenza e di quello di riflessione.

L'onda riflessa da una superficie si propaga come se avesse origine da una sorgente virtuale situata in posizione simmetrica alla sorgente reale rispetto alla superficie di riflessione.

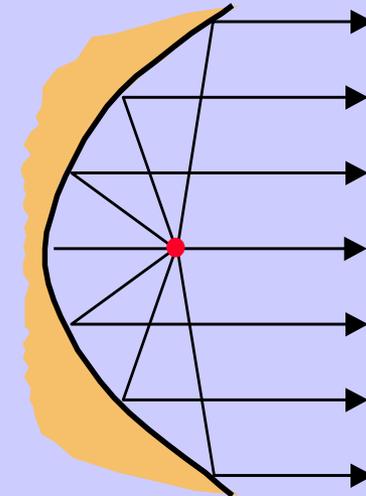
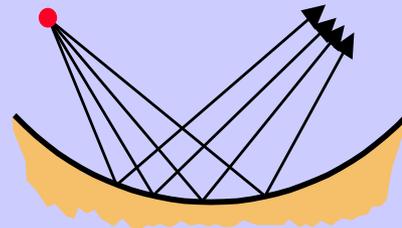


# Concentrazione e diffusione del suono

Sorgente



Sorgente

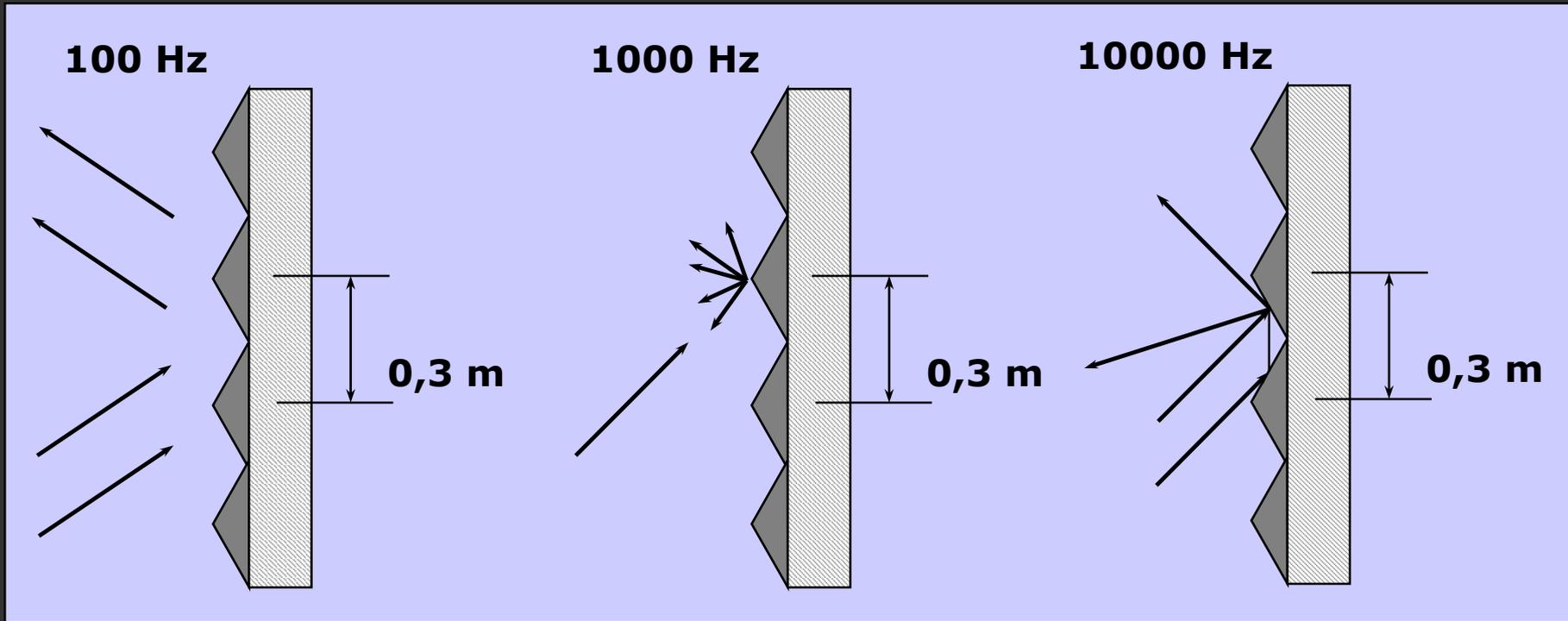


## Influenza della finitura superficiale

La superficie su cui si riflette l'onda raramente è perfettamente liscia ma più spesso è sagomata o semplicemente irregolare. La riflessione può allora risultare solo in parte speculare:

- se la lunghezza d'onda ( $\lambda$ ) del suono incidente risulta grande (almeno **4 volte**) rispetto alla dimensione media delle **irregolarità superficiali** e se i **lati** della superficie sono lunghi non meno di **4 volte** la  $\lambda$  sulla superficie si ha **riflessione speculare**
- se la lunghezza d'onda e le irregolarità superficiali hanno circa le **stesse dimensioni** si ha riflessione **diffusa** (le onde sonore interferiscono con le irregolarità e tendono ad essere sparpagliate in ogni direzione).
- se la lunghezza d'onda del suono considerato è **molto più piccola** delle dimensioni delle irregolarità superficiali si ha riflessione **speculare** e indipendente per ogni singola superficie che compone l'irregolarità.

## Influenza della finitura superficiale



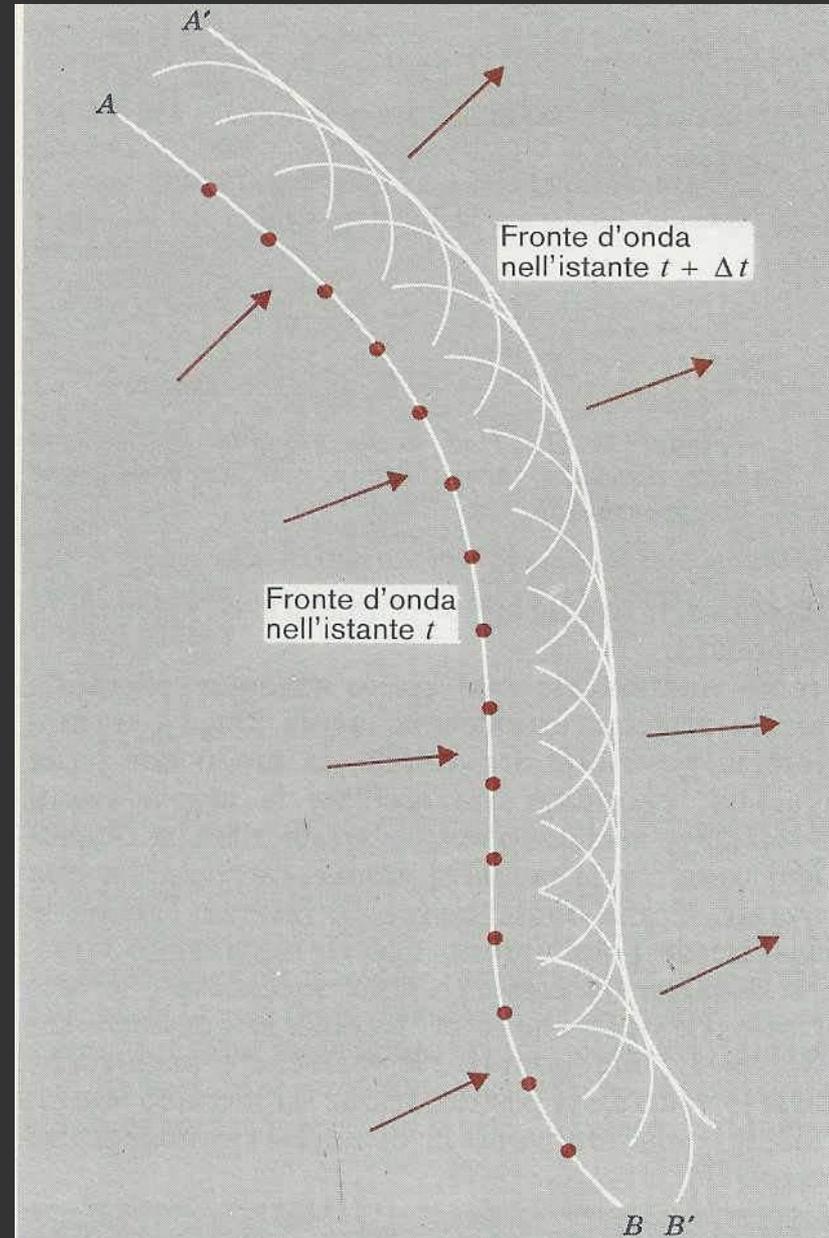
Ricordando che le lunghezze d'onda relative alle frequenze udibili variano da un minimo di circa 2 centimetri (16000 Hz) ad un massimo di circa 17 metri (20 Hz), si comprende che una stessa superficie può comportarsi in modo speculare nei confronti di certe frequenze e diffondente nei confronti di altre. Ecco un esempio delle tre situazioni considerando delle irregolarità superficiali di circa 0,3 m e onde sonore di lunghezza d'onda pari a 3,4m (100 Hz), 0,34m (1000 Hz) e 0,034 (10000 Hz).

## Principio di Huygens-Fresnel

Consiste in un'ingegnosa costruzione messa a punto dal fisico olandese Christian Huygens (1629-1695) e poi precisata dal francese Augustin Fresnel (1788-1827).

Nella propagazione delle onde l'avanzamento del fronte d'onda può essere ricostruito considerando ogni punto situato su un dato fronte come sorgente secondaria di onde sferiche (circolari sul piano).

“.. una qualsiasi superficie d'onda può pensarsi come involuppo risultante dalle infinite onde secondarie provenienti dai punti della superficie d'onda che immediatamente la precede”



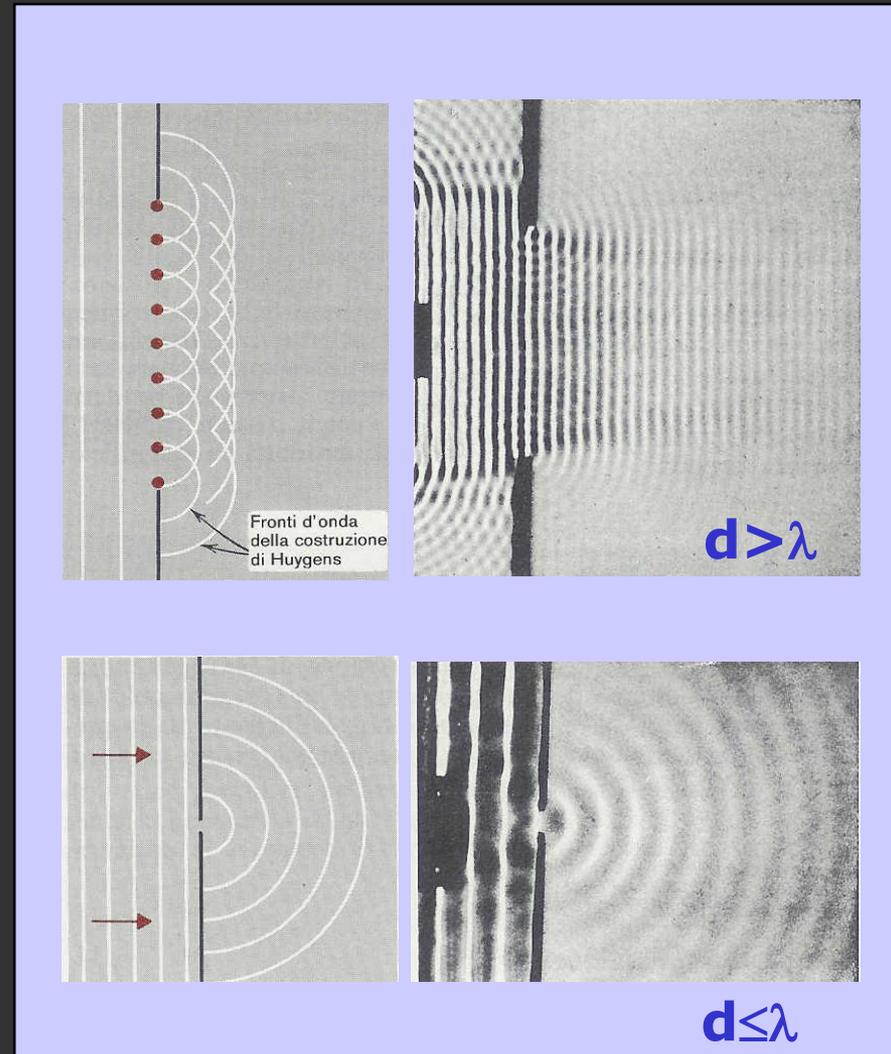
## Diffrazione

La direzione di propagazione e la forma del fronte d'onda viene modificata dagli ostacoli che l'onda incontra.

Utilizzando il principio di Huygens è possibile ricostruire il fronte d'onda prodotto da un'onda piana che incide su di una fenditura.

Se le dimensioni della fenditura sono inferiori o circa uguali alla lunghezza d'onda la fenditura si comporta come una sorgente puntiforme per cui oltre la parete si ha un'onda sferica.

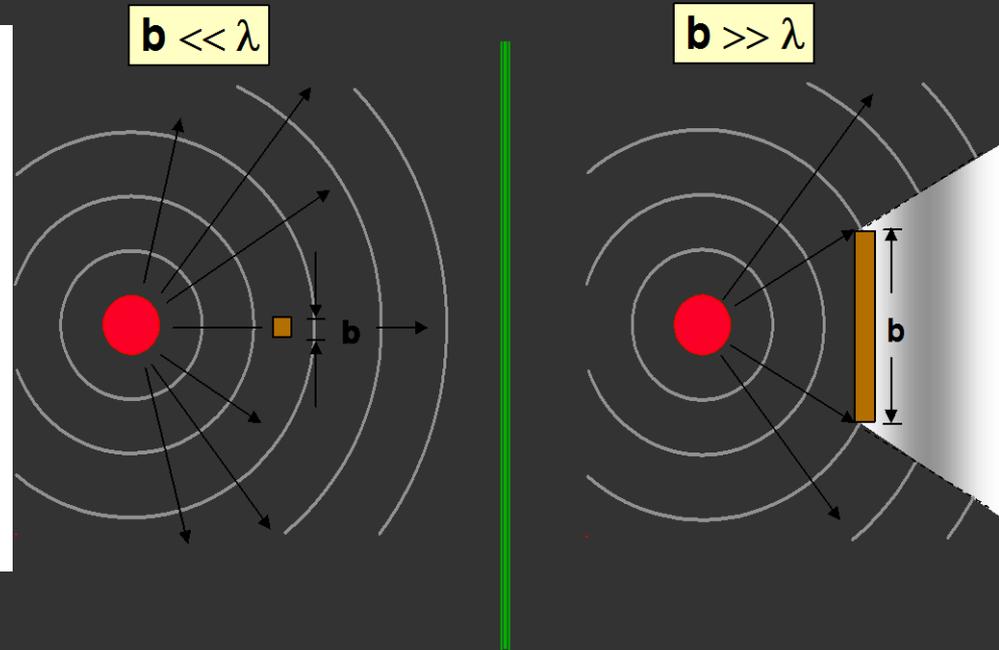
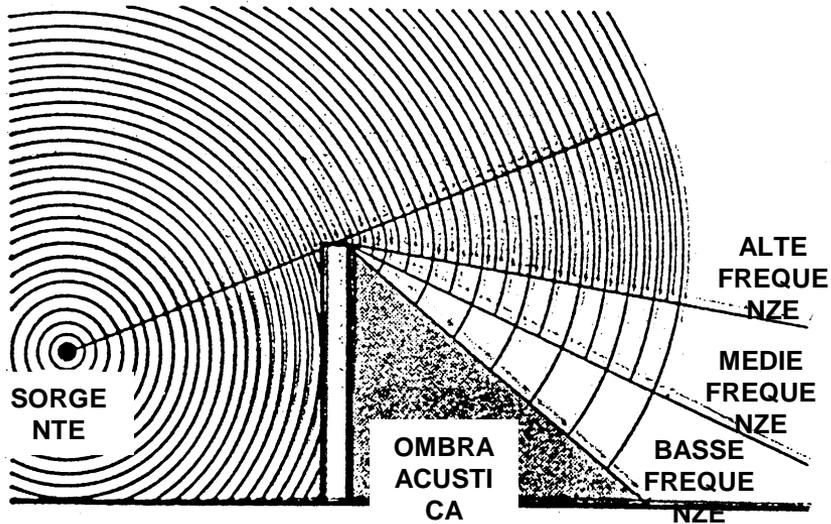
Se invece la dimensione della fenditura è notevole essa si comporta come una serie di sorgenti allineate ed il fronte d'onda è piano in corrispondenza della fenditura. Solo alle estremità si osserverà la diffrazione.



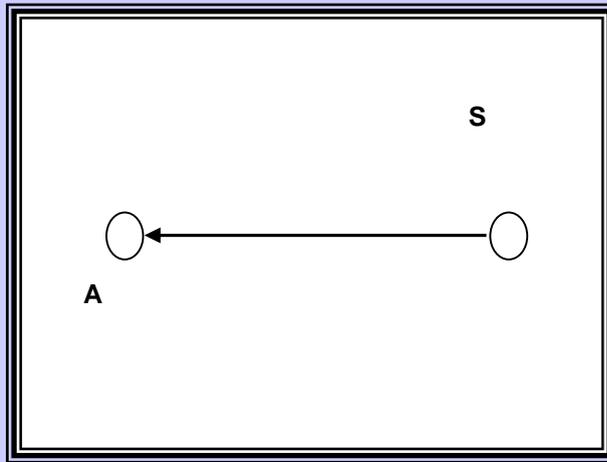
## La diffrazione e ombra acustica

Le ombre acustiche sono nette quando la lunghezza d'onda è piccola rispetto alla dimensione dell'ostacolo.

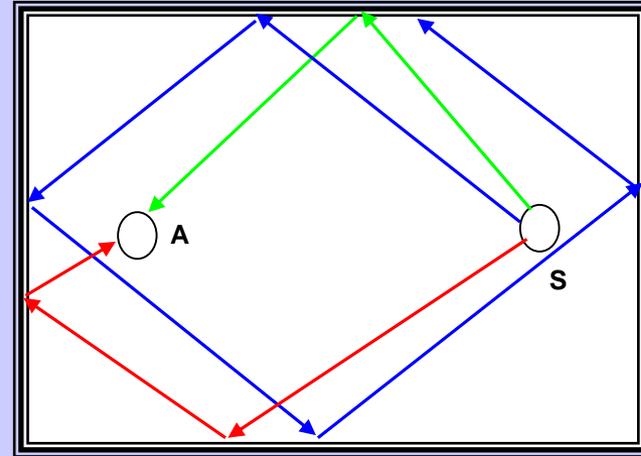
Quando la lunghezza d'onda è dello stesso ordine di grandezza della dimensione dell'ostacolo o è maggiore si ha diffrazione e l'ombra non è netta.



# Riverberazione

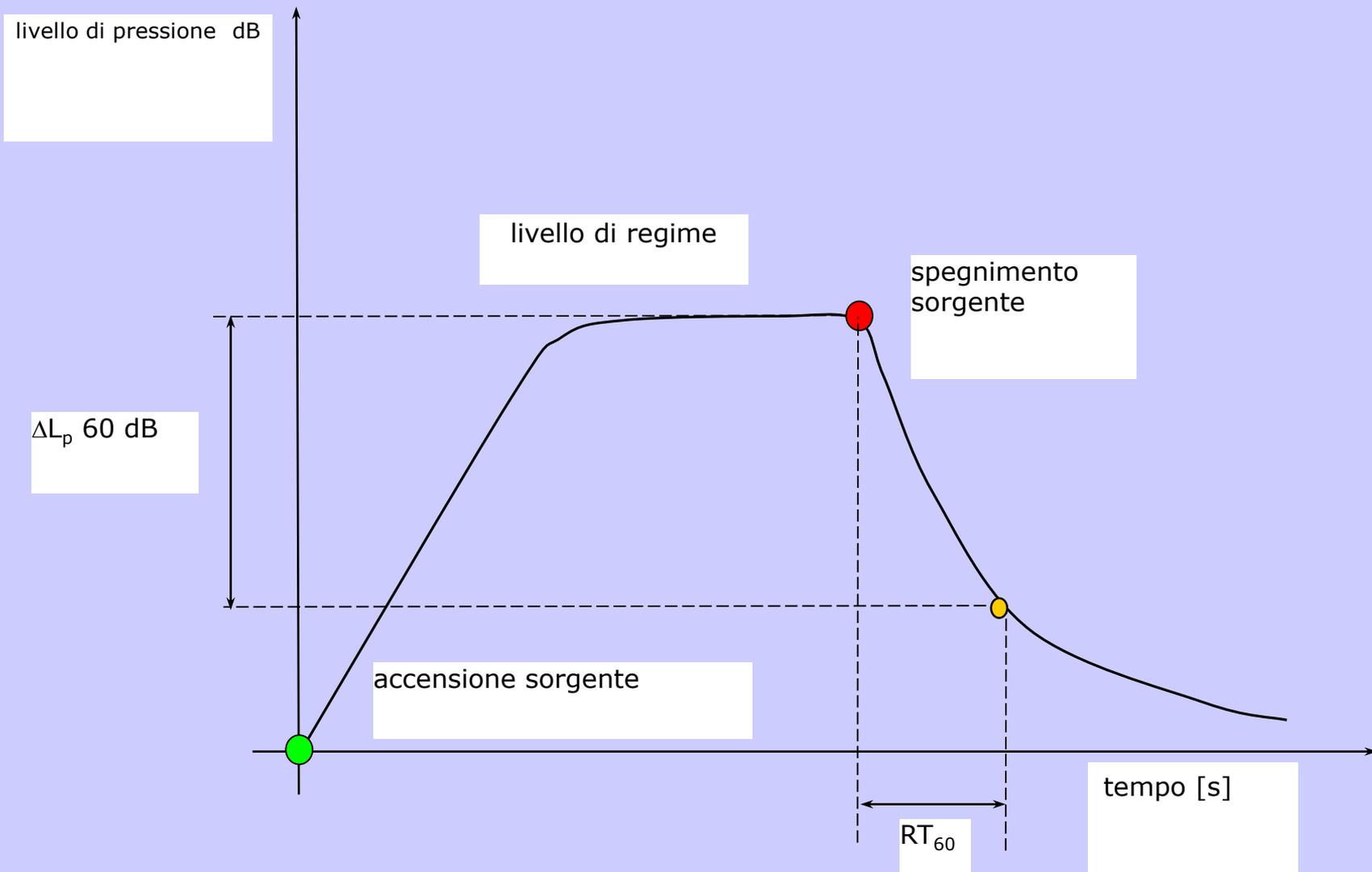


**Suono diretto**



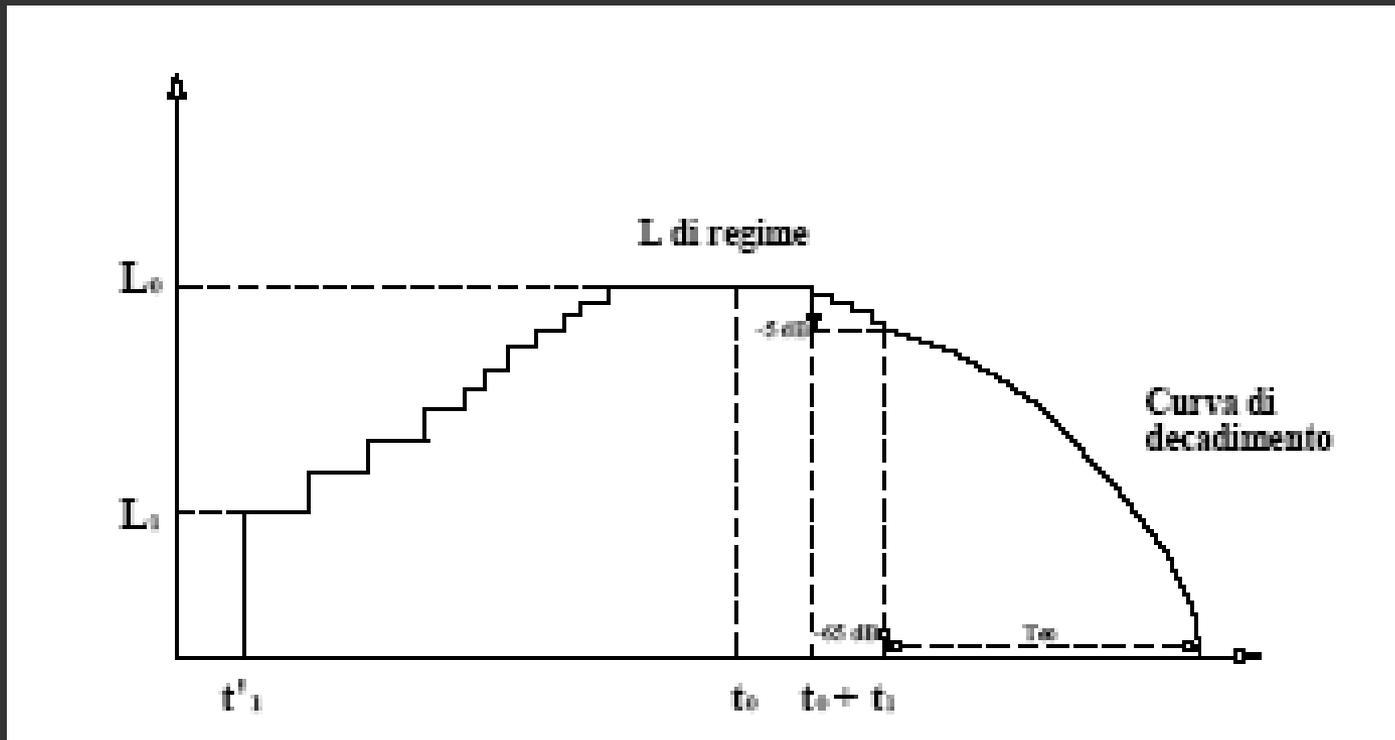
**Riflessioni multiple**

Un fenomeno molto importante che caratterizza l'acustica degli ambienti interni è quello della **riverberazione**. Esso consiste nella permanenza del suono all'interno degli ambienti anche dopo che la sorgente origine del fenomeno sonoro ha cessato di emettere.



# Tempo di riverberazione

- Supponiamo di accendere una sorgente sonora stazionaria all'interno di un ambiente chiuso e di lasciarla accesa finché non si è raggiunto il livello di regime di pressione sonora  $L_0$ .
- All'istante  $t_0$  quindi spegniamo la sorgente che stava emettendo un suono stazionario.
- Ipotizziamo la presenza di un ascoltatore posto alla distanza  $d$  dalla sorgente.



## Tempo di riverberazione convenzionale $RT_{60}$

E' possibile prevederlo utilizzando la relazione semiempirica di **Sabine** in cui  $V$ , volume del locale [ $m^3$ ];  $S$ , superficie complessiva del locale [ $m^2$ ];  $\alpha_m$ , coefficiente di assorbimento medio.

$$RT_{60} = \frac{0.161V}{S\alpha_m} \quad [s]$$

Valida con le seguenti ipotesi:

- ambiente di forma abbastanza regolare (no partizioni);
- tre dimensioni principali della sala non molto diverse tra loro;
- sorgente in posizione baricentrica;
- coefficienti di assorbimento delle diverse superfici non molto diversi tra loro e non molto elevati;
- basso assorbimento di energia da parte dell'aria.

## Tempo di riverberazione convenzionale $RT_{60}$

La relazione di Sabine è stata modificata da **Norris e Eyring** in modo che per pareti di un ambiente completamente assorbenti ( $\alpha_m=1$ ) il tempo di riverberazione risulti pari a zero (il logaritmo di zero che si avrebbe al denominatore tenderebbe a meno infinito, dunque il valore di TR tenderebbe a zero).

$$RT_{60} = \frac{0.161V}{-\text{Sln}(1 - \alpha_m)} \quad [\text{s}]$$

In ambienti di notevoli dimensioni dove è necessario tenere conto dell'**assorbimento dell'aria**. Indicando con  $a$  il coefficiente di assorbimento dell'aria [ $\text{m}^{-1}$ ] si può utilizzare la relazione:

$$RT_{60} = \frac{0.161V}{-\text{Sln}(1 - \alpha_m) + 4aV} \quad [\text{s}]$$

Le formule più utilizzate per il calcolo del RT sono quella di Sabine e quella di Eyring:

Formula di Sabine,

formula di Eyring

$$RT_{60} = 0,161 \frac{V}{S \cdot \alpha_m} \text{ [s]} \quad RT_{60} = 0,161 \frac{V}{-S \cdot \ln(1 - \alpha_m)} \text{ [s]}$$

In entrambe le formule  $\alpha_m$  è il coefficiente medio di assorbimento delle superfici interne,  $V$  è il volume della sala ed  $S$  l'area totale delle superfici interne.

La relazione di Sabine è stata modificata da **Norris e Eyring** in modo che per pareti di un ambiente completamente assorbenti ( $\alpha_m=1$ ) il tempo di riverberazione risulti pari a zero (il logaritmo di zero è  $-\infty$ ).

Inoltre se il volume della sala supera certe dimensioni bisogna tener conto anche dell'assorbimento dell'aria:

$$A_{aria} = 4 \cdot \beta \cdot V$$

dove  $\beta$  è un coefficiente di assorbimento dell'aria connesso all'umidità relativa ed alla frequenza (espresso in %/m, diventa unità assorbenti, cioè  $m^2$ , se lo moltiplico per  $4V$ , diventa % (adimensionale come  $\alpha$ ) se lo moltiplico per il libero cammino medio =  $4V/S$ ).

Coefficiente di attenuazione atmosferica  $\alpha$  in bande di 1/3 ottava, in funzione della percentuale di umidità relativa, a 15°C. [4]

Freq. (Hz)	Umidità relativa (%)										
	10	15	20	30	40	50	60	70	80	90	100
50	0,268	0,224	0,189	0,141	0,111	0,0914	0,0774	0,670	0,591	0,528	0,477
63	0,353	0,310	0,272	0,212	0,171	0,142	0,121	0,105	0,0927	0,0831	0,0752
80	0,454	0,413	0,378	0,311	0,257	0,217	0,187	0,163	0,145	0,113	0,118
100	0,577	0,531	0,504	0,441	0,378	0,326	0,285	0,251	0,224	0,202	0,184
125	0,735	0,667	0,647	0,601	0,539	0,479	0,426	0,381	0,343	0,312	0,285
160	0,956	0,828	0,806	0,786	0,740	0,681	0,621	0,565	0,516	0,473	0,436
200	1,28	1,04	0,991	0,989	0,973	0,930	0,874	0,815	0,757	0,704	0,655
250	1,78	1,33	1,22	1,21	1,23	1,22	1,18	1,13	1,07	1,02	0,959
315	2,55	1,77	1,54	1,47	1,50	1,53	1,53	1,51	1,47	1,41	1,36
400	3,74	2,44	2,00	1,79	1,81	1,87	1,91	1,92	1,91	1,89	1,85
500	5,58	3,49	2,70	2,23	2,18	2,24	2,31	2,36	2,40	2,41	2,41
630	8,36	5,11	3,80	2,89	2,68	2,69	2,75	2,84	2,91	2,97	3,01
800	12,5	7,63	5,50	3,89	3,41	3,29	3,31	3,38	3,48	3,57	3,65
1000	18,4	11,5	8,17	5,45	4,51	4,16	4,06	4,08	4,15	4,25	4,35
1250	26,5	17,4	12,3	7,90	6,22	5,49	5,17	5,05	5,05	5,11	5,20
1600	36,9	26,0	18,6	11,7	8,90	7,55	6,86	6,51	6,35	6,30	6,32
2000	49,3	38,3	28,2	17,7	13,1	10,8	9,50	8,75	7,31	8,07	7,95
2500	62,5	54,8	42,2	26,9	19,7	15,9	13,6	12,2	11,4	10,8	10,4
3150	75,5	75,7	62,1	41,0	29,9	23,8	20,1	17,7	16,1	15,0	14,3
4000	87,3	99,9	88,8	62,0	45,7	36,2	30,3	26,4	23,7	21,7	20,3
5000	97,4	123	122	92,4	69,7	55,4	46,2	39,9	35,5	32,2	29,8
6300	106	151	161	135	105	84,7	70,8	61,1	54,0	48,7	44,7
8000	114	174	202	190	156	129	108	93,7	82,8	74,6	68,1
10000	123	195	242	257	226	192	265	144	127	115	105

# Riverberazione

A questo punto sorgono alcuni interrogativi:

- la riverberazione è un fenomeno positivo o negativo da un punto di vista acustico?
- il tempo di riverberazione deve essere breve o lungo ?
- esiste un tempo di riverberazione ottimale?

Di per se la riverberazione ha sia aspetti positivi che negativi:

- è utile al fine dell'ascolto in quanto innalza la densità di energia sonora a disposizione
- fornisce inoltre "condizioni naturali" di ascolto
- un valore eccessivo del T60 peggiora la qualità dell'ascolto con perdita di intelligibilità e "impastamento" del segnale sonoro.

## Tempo di riverberazione ottimale

Il tempo di riverberazione **RT60** deve assumere a seconda delle condizioni di ascolto un valore di compromesso tra l'esigenza di rinforzare il suono e mantenerne una buona intelligibilità.

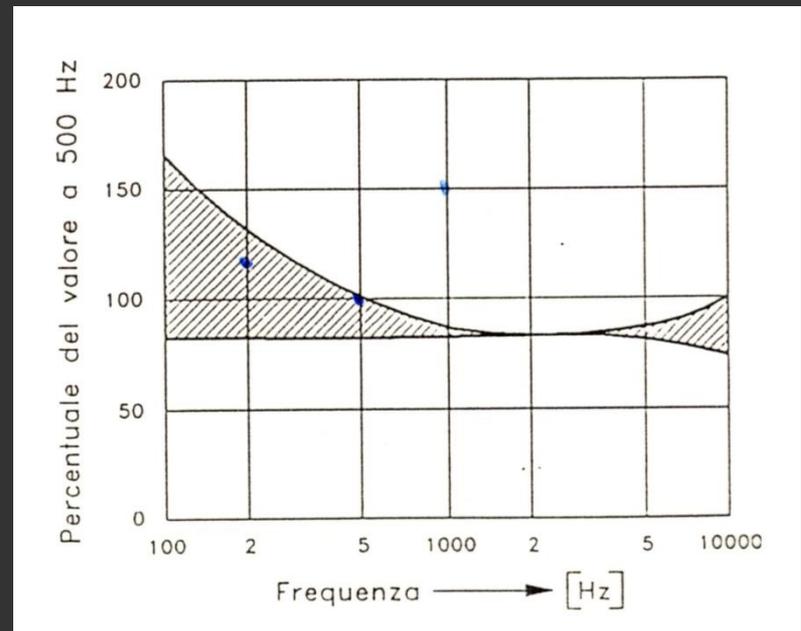
E' possibile individuare un **tempo di riverberazione ottimale** per un locale in funzione del suo **volume** e della sua **destinazione d'uso** sulla base di indagini statistiche sull'effetto riscontrato sperimentalmente.

Parlato, 500Hz

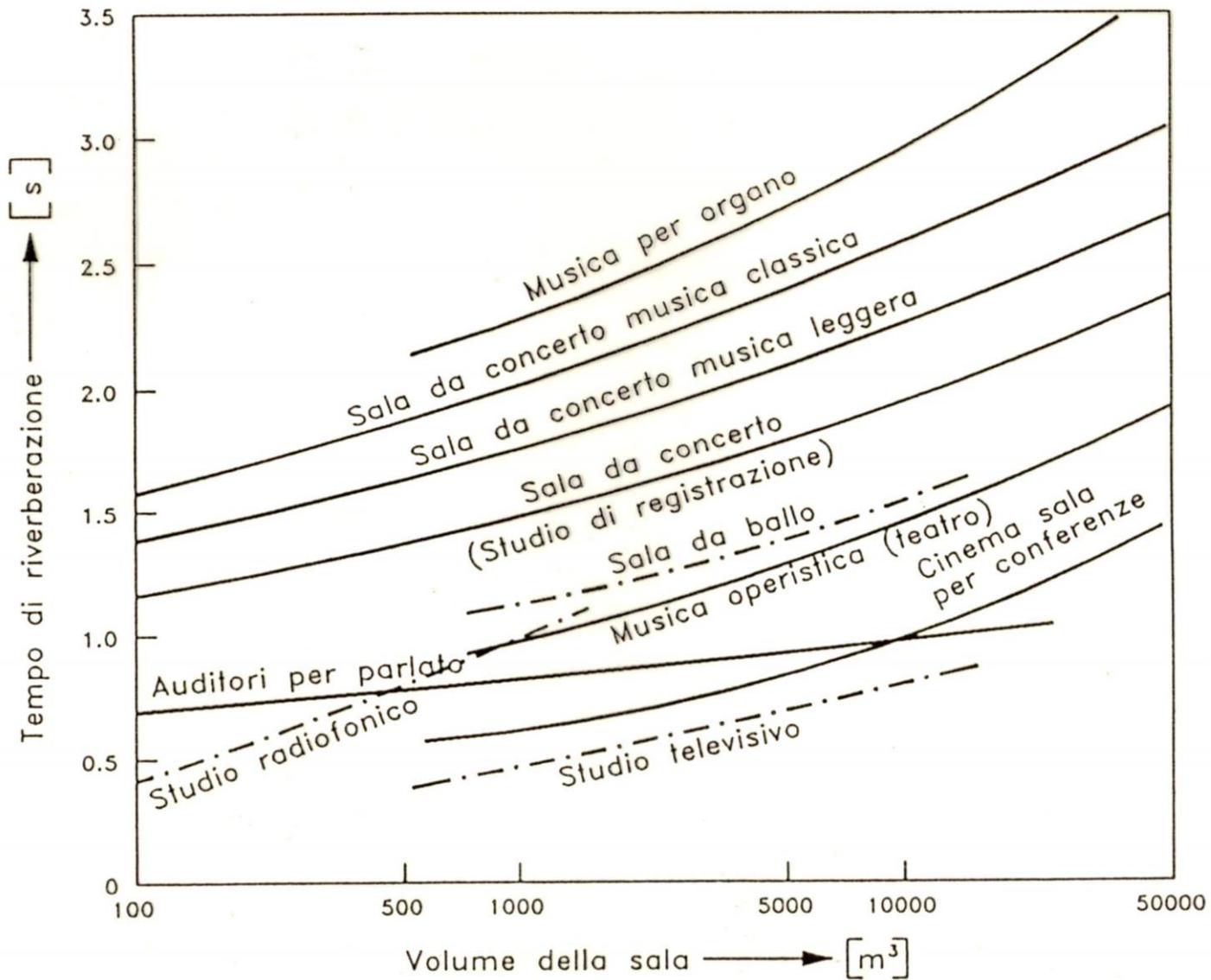
$$RT_{60ott} = 0.1\sqrt[3]{V}$$

Musica, 500 Hz

$$RT_{60ott} = 0.5 + 10^{-4}V$$



# Tempo di riverberazione ottimale



## Altri effetti della riflessione negli ambienti

Le riflessioni che arrivano all'orecchio **fino a 20-25 millisecondi** dopo il suono diretto potenziano il segnale.

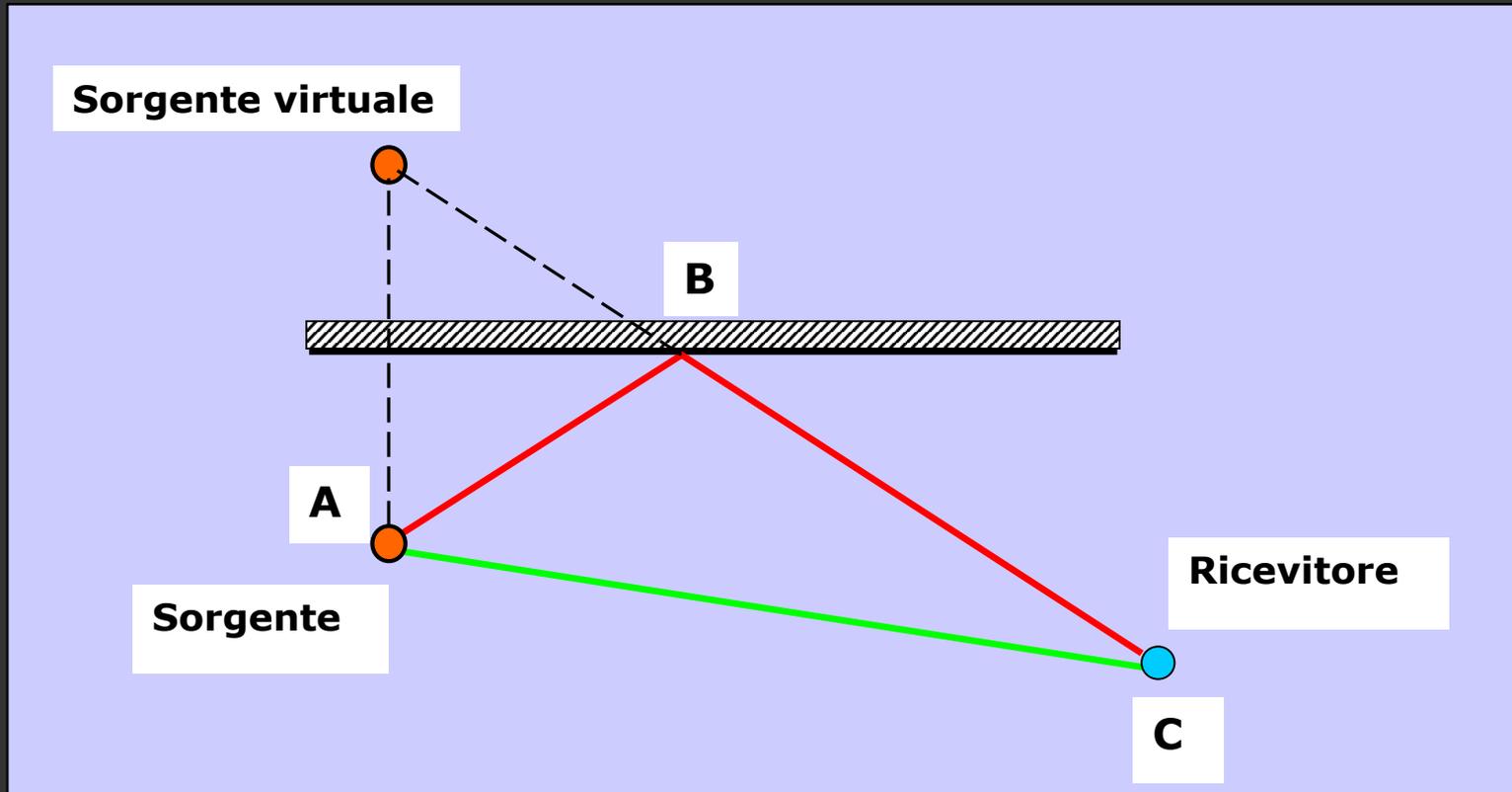
Le riflessioni che arrivano all'orecchio intorno ai **25-30 millisecondi** dopo il suono diretto sono responsabili del cosiddetto **effetto Haas**. Si avverte un unico suono e si ha l'impressione che la direzione della sorgente sia quella da cui arriva il suono riflesso.

**Tra i 50 e 100 ms** di ritardo si parla di **near-eco**, ossia i due suoni si sovrappongono, ma si percepisce una coda sonora quasi separata.

Per ritardi **oltre i 100 ms** si parla di **eco**. Si tratta di una riflessione molto ritardata di sufficiente intensità tale da disturbare l'ascoltatore, si avvertono in questo caso almeno **due suoni separati**.

## Eco

Per ritardi oltre i 100 ms si parla di **eco**. Si tratta di una riflessione molto ritardata di sufficiente intensità tale da disturbare l'ascoltatore, si avvertono in questo caso almeno due suoni separati.



## Eco

In altri termini, data la velocità del suono di circa 340 m/s, quando i due percorsi differiscono di una lunghezza tale che il tempo impiegato per arrivare all'ascoltatore differisce di **0,1 s** si ha la percezione dell'eco.

$$t_{dir} = \frac{L_{AC}}{c}$$

$$t_{rifl} = \frac{L_{ABC}}{c}$$

$$t_{rifl} - t_{dir} \geq 0,1s$$

$$\frac{L_{AC}}{c} - \frac{L_{ABC}}{c} = 0,1s$$

$$L_{AC} - L_{ABC} = 0,1 \cdot c = 0,1s \cdot 340 m/s = 34 m$$

Quando i percorsi differiscono di una lunghezza compresa **tra 17 e 34 m** il tempo impiegato per arrivare all'ascoltatore differisce di un tempo compreso **tra 0,05 e 0,1 s** e si ha **near-eco**.

## Intelligibilità del parlato

Il metodo di **Peutz** valuta analiticamente l'intelligibilità mediante la percentuale di perdita di consonanti durante l'articolazione del parlato,  $\%AP_{cons}$ .

Tale metodo ha il suo fondamento nell'analisi della potenza sonora diretta rispetto a quella riverberata. Vale la seguente relazione almeno fino a che il rapporto segnale-rumore risulta maggiore di 25 dB.

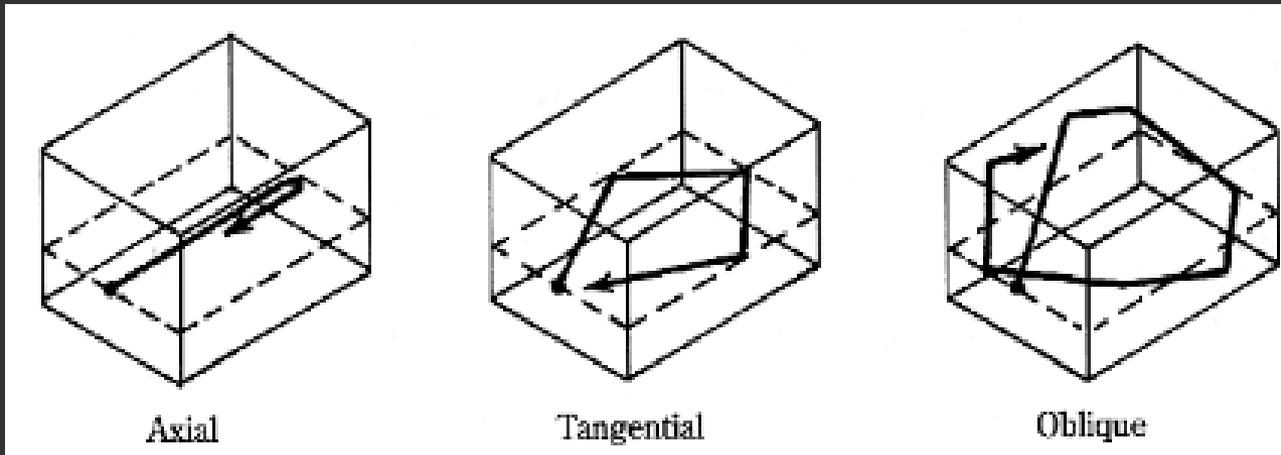
$$\%AP_{cons} = \frac{200d^2 RT_{60}}{VQ}$$

con  $d$ , distanza sorgente-ricevitore [m];  $V$ , volume dell'ambiente [ $m^3$ ];  $Q$ , fattore di direttività della sorgente.

## Risonanza

In presenza di pareti solide, riflettenti, parallele tra loro che producono sorgenti secondarie emittenti sulle stesse frequenze d'onda esistono particolari frequenze per le quali l'onda riflessa da una delle pareti si somma esattamente in fase a quella riflessa dall'altra.

L'effetto macroscopico è quello di avere una grande difformità del campo sonoro con punti con elevato livello sonoro e punti con basso livello corrispondenti alle interferenze costruttive e distruttive.



## Frequenze di risonanza

Risonanza assiale:

$$f_j = \frac{c}{2} \sqrt{\left(\frac{j}{L_x}\right)^2}$$

Risonanza  
tangenziale:

$$f_j = \frac{c}{2} \sqrt{\left(\frac{j_x}{L_x}\right)^2 + \left(\frac{j_y}{L_y}\right)^2}$$

Risonanza obliqua:

$$f_j = \frac{c}{2} \sqrt{\left(\frac{j_x}{L_x}\right)^2 + \left(\frac{j_y}{L_y}\right)^2 + \left(\frac{j_z}{L_z}\right)^2} \text{ [Hz]}$$

## Livello di pressione sonora negli ambienti interni (NO)

Negli ambienti chiusi un ascoltatore riceve oltre al suono che proviene direttamente dalla sorgente anche il suono riflesso dalle pareti.

Il campo sonoro presente è la somma dei due e in generale si ha prevalenza del campo sonoro diretto nelle immediate vicinanze della sorgente e del campo sonoro riverberato nelle zone più lontane.

$$L_D = L_W + 10 \log \frac{Q}{4\pi d^2} + 0.2 \text{ [dB]}$$

$$L_R = L_W + 10 \log \frac{4}{S'} + 0.2 \text{ [dB]}$$

$$R = \frac{(1 - \alpha_m) S}{\alpha_m}$$

$$L_{TOT} = L_W + 10 \log \left( \frac{Q}{4\pi d^2} + \frac{4}{R} \right) + 0.2 \text{ [dB]}$$

## Livello di pressione sonora negli ambienti interni

Negli ambienti chiusi un ascoltatore riceve oltre al suono che proviene direttamente dalla sorgente anche il suono riflesso dalle pareti.

Il campo sonoro presente è la somma dei due e in generale si ha prevalenza del campo sonoro diretto nelle immediate vicinanze della sorgente e del campo sonoro riverberato nelle zone più lontane.

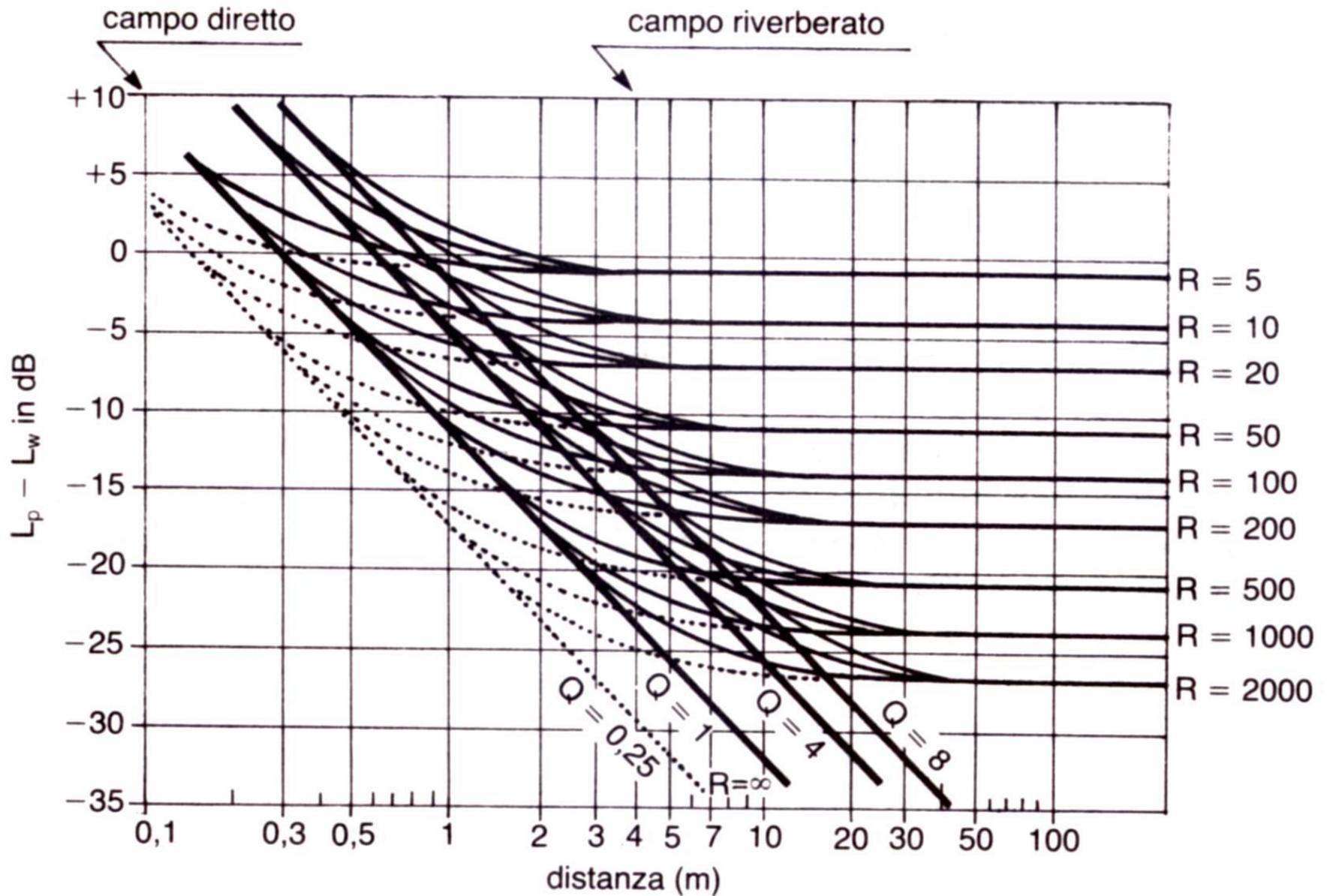
$$L_D = L_W + 10 \log \frac{Q}{4\pi d^2} [dB]$$

$$L_R = L_W + 10 \log \frac{4}{R} [dB]$$

$$R = \frac{\alpha_m S}{1 - \alpha_m}$$

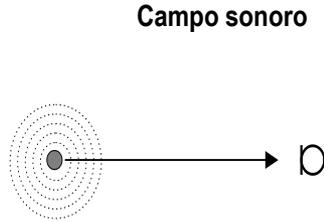
$$L_{TOT} = L_W + 10 \log \left( \frac{Q}{4\pi d^2} + \frac{4}{R} \right) [dB]$$

# Livello di pressione sonora negli ambienti interni

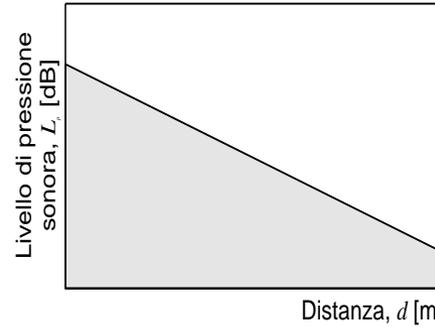


# Tipologie di campi sonori

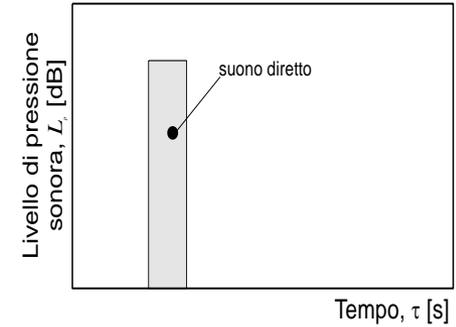
**Campo libero o anecoico**



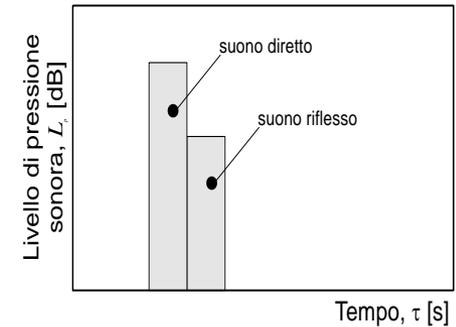
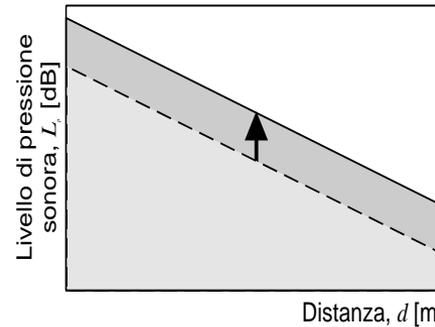
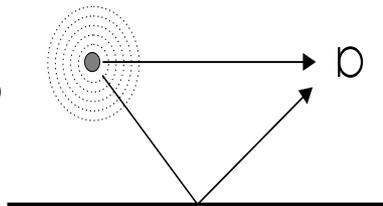
Andamento della pressione sonora in funzione della distanza



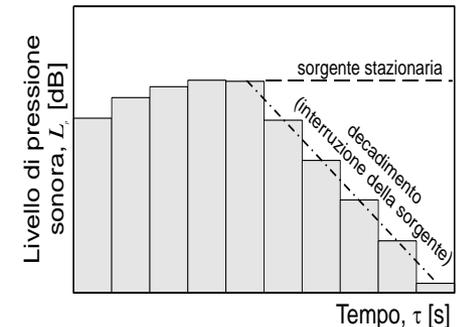
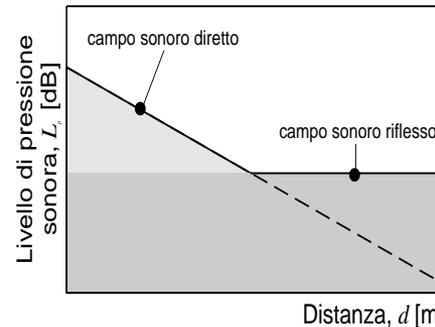
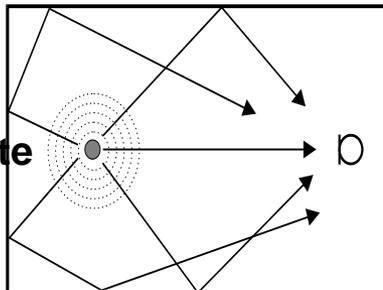
Andamento della pressione sonora in funzione del tempo



**Campo semianecoico**



**Campo riflesso o riverberante**



## Campi sonori

Quando le sole onde sonore presenti sono quelle direttamente irradiate dalla sorgente si parla di *campo sonoro libero*; esso è comunque un'astrazione, anche all'aperto infatti sono presenti fenomeni di riflessione legati se non altro alla presenza del suolo.

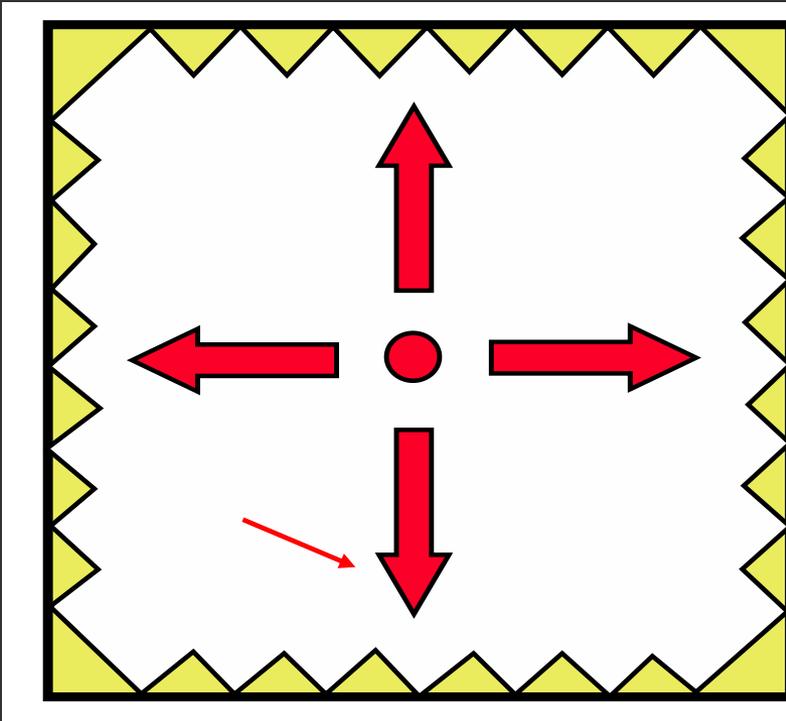
Il campo sonoro conseguente alla presenza delle sole onde sonore direttamente irradiate dalla sorgente è detto *campo sonoro diretto*.

In un ambiente chiuso oltre al contributo delle onde sonore dirette, per la presenza di fenomeni di riflessione, diffrazione e interferenza si stabilisce il cosiddetto *campo sonoro riverberato*.

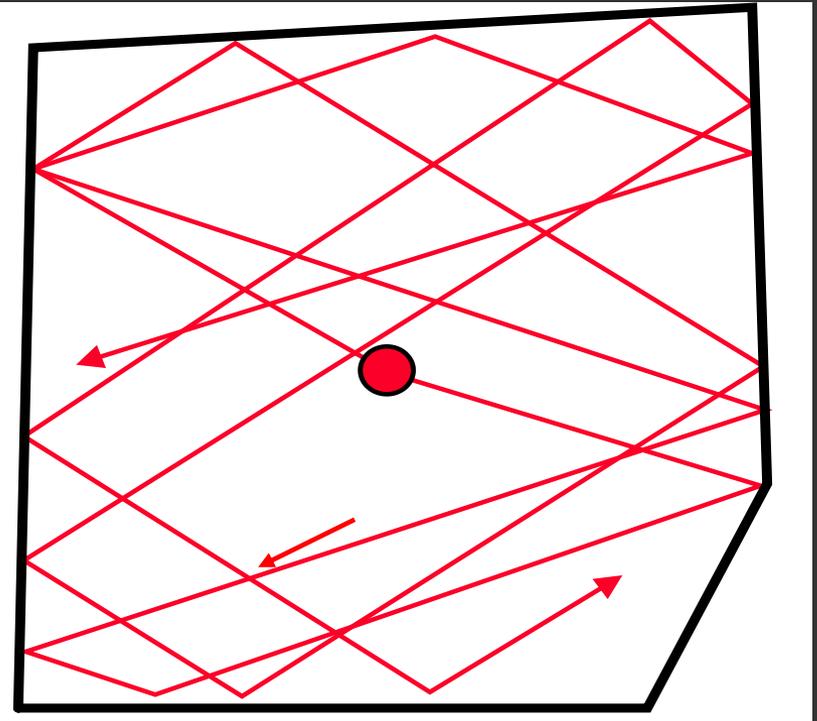
Quando la densità di energia in un tale campo assume in regime di emissione stazionario un valore costante in tutto lo spazio si parla di *campo diffuso*, anche questa condizione è a rigore un'astrazione.

I campi sonori libero e riverberato sono astrazioni ideali che possono essere riprodotti in modo soddisfacente in apposite camere di prova.

Si parla di **camere anecoiche** per il campo libero e di **camere riverberanti** per il campo riverberato.



campo sonoro libero  $\Rightarrow$  camera anecoica:  
coefficiente di assorbimento pareti tendente a 1



campo sonoro diffuso  $\Rightarrow$  camera riverberante:  
coefficiente di riflessione pareti tendente a 0

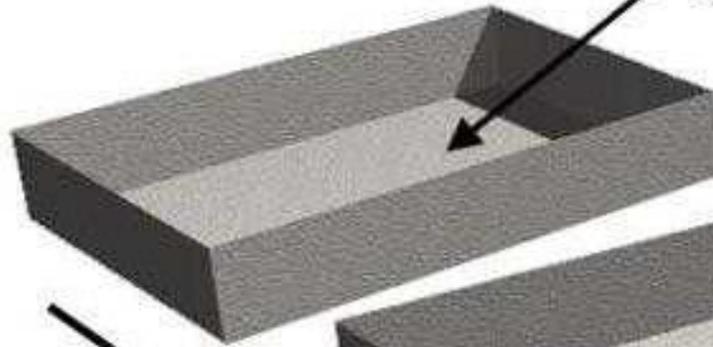
## Requisiti acustici fondamentali

Requisiti essenziali di un ambiente destinato all'ascolto di parole o musica sono i seguenti:

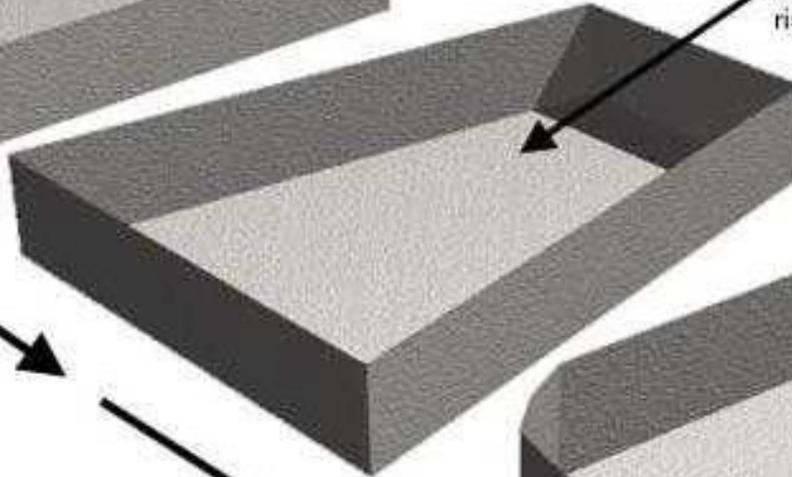
- buon livello sonoro: almeno 45 dB;
- presenza dell'effetto Haas (prime riflessioni percepite entro 35 ms dal suono diretto);
- assenza di difetti acustici (eco, flutter, ecc.);
- assenza di distorsione o sbilanciamento tonale (causato da assorbimenti di entità diversa nelle diverse bande dello spettro sonoro);
- omogenea distribuzione spaziale del suono;
- tempo di riverberazione vicino a quello ottimale per la specifica destinazione d'uso del locale o in ogni caso inferiore ad esso;
- limitato rumore di fondo.

## Requisiti acustici fondamentali

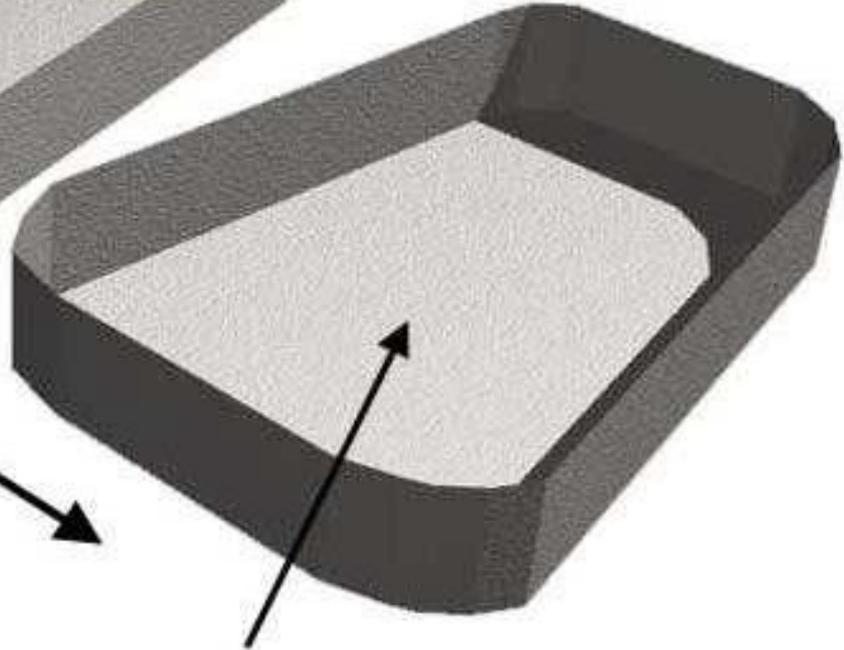
Auditorium a pianta rettangolare sono da preferirsi rispetto a piante circolari



L'inclinazione delle pareti laterali e quindi la pianta trapezoidale è da preferirsi rispetto alla pianta rettangolare



L'arrotondamento degli spigoli offre un ulteriore vantaggio



# Requisiti acustici fondamentali

