

Propagazione del suono in ambienti chiusi

Indice:

[Metodo delle sorgenti immagine](#)

[Livello del campo riverberante e semi-riverberante](#)

[Coda sonora e tempo di riverberazione](#)

[Calcolo del T60](#)

Metodo delle sorgenti immagine

Supponiamo di avere una sorgente omnidirezionale che emette fronti d'onda sferici con uguale intensità in ogni direzione e supponiamo inoltre di collocarla in una stanza di forma perfettamente parallelepipedica (in modo da semplificarci i calcoli). All'interno di questa stanza disponiamo la sorgente S e il ricevitore R come in figura:

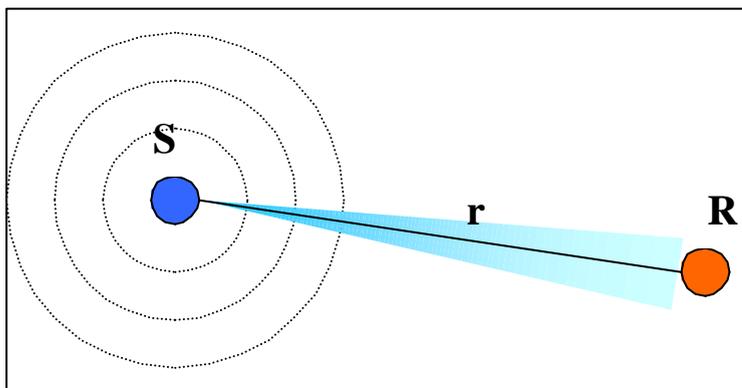


Figura 1 - Propagazione sonora in una stanza

All'istante $t_0=0$ la nostra sorgente emette un impulso. Prima però che il livello sonoro arrivi sul ricevitore deve percorrere la distanza r fra il ricevitore stesso e la sorgente. Quindi il primo fronte d'onda emesso arriverà dopo un tempo:

$$t_1 = \frac{r}{c} \quad (1)$$

dove $c = 343 \text{ m/s}$ è la velocità del suono nell'aria.

Il suono arriva al ricevitore R che per un attimo rivela un livello sonoro piuttosto elevato e poi ricade rapidamente a 0 a causa della breve durata dell'impulso.

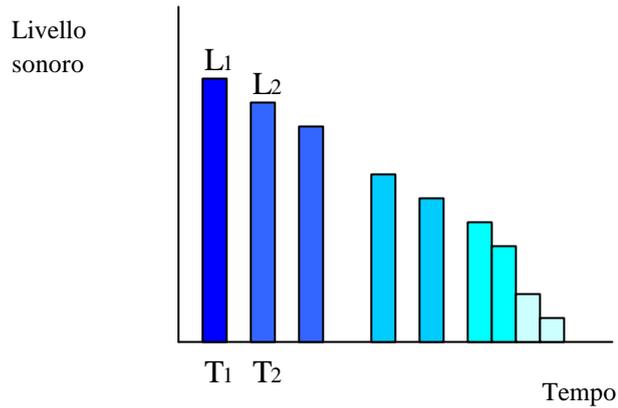


Figura 2 - Livelli sonori di una sorgente impulsiva. Con il passare del tempo compare una coda sonora continua

Questo livello chiamato L_1 è il livello del suono diretto, cioè del suono che ha percorso la minima distanza possibile tra sorgente e ricevitore senza aver subito alcun fenomeno di riflessione con le pareti. L_1 si determina con questa equazione:

$$L_1 = L_w + 10 \log \frac{Q}{p4r^2} \quad (2)$$

dove L_w è il livello di potenza della sorgente e prendiamo come valore $Q=1$. Nella sua espansione però il fronte d'onda sferico incontrerà prima o poi le pareti della sala e a quel punto verrà riflesso. Il suono riflesso raggiungerà a sua volta il ricevitore, ma avrà percorso una distanza maggiore, come se provenisse da una sorgente immaginaria S' posta al di fuori della stanza e a distanza $r_1 > r$ (figura 3). Il suono riflesso una volta arriverà quindi dopo un tempo:

$$t_2 = \frac{r_1}{c} \quad (3)$$

con $t_2 > t_1$ essendo $r_1 > r$.

Calcoliamo ora l'energia che possiede dalla riflessione del pavimento:

$$L_1 = L_w + 10 \log \frac{1}{p4r_1^2} + 10 \log(1 - \alpha) \quad (4)$$

dove α è il coefficiente di riflessione del pavimento (perché la superficie non è completamente riflettente).

Se il raggio arriva dopo essere stato riflesso più volte si avranno sorgenti immaginari del secondo ordine, del terzo ordine e così via.

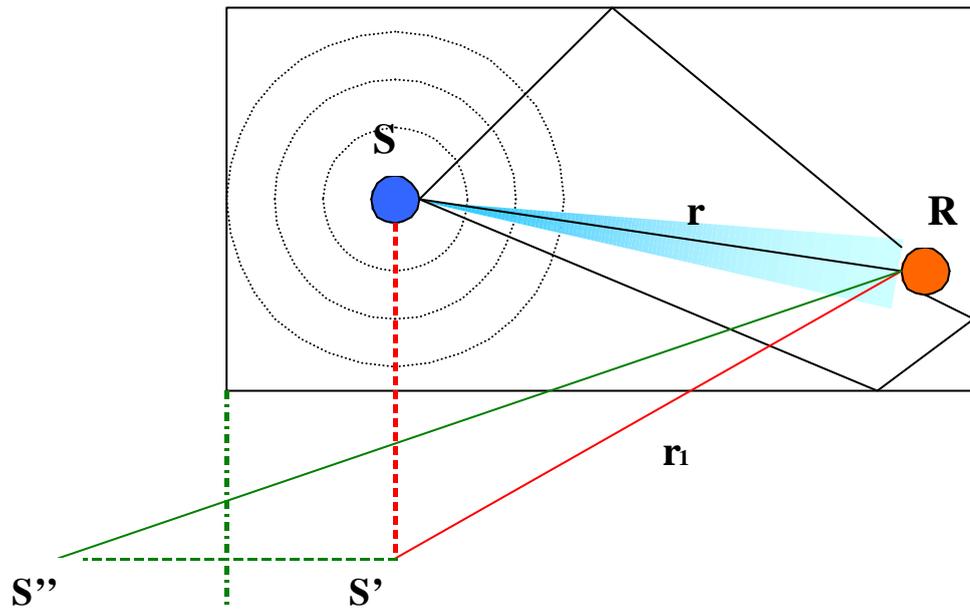


Figura 3 - Sorgenti immagine e riflessioni

Per trovare le sorgenti di 2^o ordine (segnate in verde in fig.3) specularizzo le sorgenti di 1^o ordine (segnate in rosso in fig.3). Se per esempio voglio calcolare L_6 userò l'equazione:

$$L_1 = L_w + 10 \log \frac{1}{p_4 r_6^2} + 10 \log (1 - \alpha_1) \cdot (1 - \alpha_2) \quad (5)$$

ho due differenti coefficienti di riflessione α_1 e α_2 perché si riflette su due pareti. Se ad esempio il soffitto è costituito da un materiale molto fonoassorbente con un coefficiente di assorbimento $\alpha_2 = 0,8$ allora $(1 - \alpha_2) = 0,2$ il che significa che solo il 20% dell'energia sonora incidente sul soffitto viene riflessa ed è anche per questo motivo che i raggi riflessi arrivano al ricevitore con una forte attenuazione.

Il numero dei cammini cresce in proporzione geometrica e l'energia che ognuno di essi trasporta diminuisce in maniera proporzionale alla corsa del raggio ed al numero di rimbalzi (ad ogni rimbalzo perde una quota di energia pari a $1 - \alpha$).

Nel caso di un parallelepipedo (6 facce) avremo quindi sei sorgenti immagine e sei cammini riflessi del primo ordine.

A sua volta, ognuna delle sei sorgenti immagine del primo ordine può essere specularizzata rispetto a una delle altre cinque pareti: quindi, possiamo costruire trenta sorgenti immagine e trenta cammini riflessi del secondo ordine.

Proseguendo in questo ragionamento, abbiamo:

Ordine	Numero sorgenti immagine
0	1
1	6
2	30
3	150
...	...
n-esimo	$6 \cdot 5^{n-1}$

Tabella 1 - Ordine e numero delle sorgenti immagine

All'aumentare dell'ordine della sorgente immagine, avvengono due fatti importanti:

- a) aumenta la distanza della sorgente dal ricevitore e, di conseguenza, diminuisce il contributo energetico del singolo raggio riflesso
- b) il numero totale di raggi riflessi cresce in modo esponenziale.

A causa dell'aumento esponenziale del numero di raggi, anche se l'energia trasportata da ciascun raggio riflesso tende a diminuire, complessivamente non è trascurabile nemmeno l'energia dei cammini di ordine elevato.

Nello studio della propagazione del suono, di conseguenza, se si considerano soltanto gli ordini di riflessione più bassi, si trascura una parte ancora importante dell'energia e la descrizione dell'evento non è corretta.

Per rappresentare in modo efficace il fenomeno sonoro, occorre studiare un numero elevatissimo di sorgenti immagine.

[top](#)

Livello del campo riverberante e semi-riverberante

Consideriamo una sorgente stazionaria in un ambiente chiuso.

A breve distanza dalla sorgente vale la legge del campo libero, secondo la quale il livello sonoro diretto vale:

$$L_{dir} = L_w + 10 \log \frac{Q}{4r^2} \quad (6)$$

dove:

- Q è il fattore di direttività della sorgente;
- r è la distanza tra sorgente e ricevitore.

All'aumentare della distanza dalla sorgente, il livello di intensità devia da questa legge e si fa riferimento al livello sonoro riflesso (o riverberante) che per gli ambienti chiusi è considerato uguale dappertutto e si ricava dalla formula:

$$L_{rif} = L_w + 10 \log \left[\frac{4}{\sum \mathbf{a}_i \cdot S_i} \right] \quad (7)$$

dove la sommatoria $\sum \alpha_i S_i$ è data dal prodotto dei coefficienti α delle pareti della stanza per la superficie calcolate in m².

Nel calcolo vanno considerati anche gli oggetti e le persone (per le persone solitamente si considera 1 m²) presenti nell'ambiente.

Tra la regione di campo libero e la regione di campo riverberante, si trova una regione intermedia detta di campo semi-riverberante, nella quale non sono trascurabili né il contributo dovuto al suono diretto (livello diretto), né il contributo dovuto al suono riverberante (livello suono riflesso).

La legge che descrive l'andamento del livello sonoro in funzione della distanza si ottiene sommando questi due contributi:

$$L_{tot} = L_{dir} + L_{rif} = 10 \log \left[10^{\frac{L_{dir}}{10}} + 10^{\frac{L_{rif}}{10}} \right] = L_w + 10 \log \left[\frac{Q}{4 \cdot p \cdot r^2} + \frac{4}{\sum \alpha_i \cdot S_i} \right] \quad (8)$$

questa equazione viene anche detta **formula del campo semi-riverberante** ed è in grado di definire il livello sonoro in una stanza.

Nel grafico di figura 4 è riportato l'andamento del livello sonoro in dB in funzione della distanza dalla sorgente.

La linea tratteggiata mostra il decadimento perfettamente rettilineo che si avrebbe considerando solo il suono diretto.

La somma dei contributi, diretto e riverberante, tende invece a stabilizzarsi ad un livello che dipende dalla superficie complessiva dell'ambiente e dal suo coefficiente di assorbimento medio.

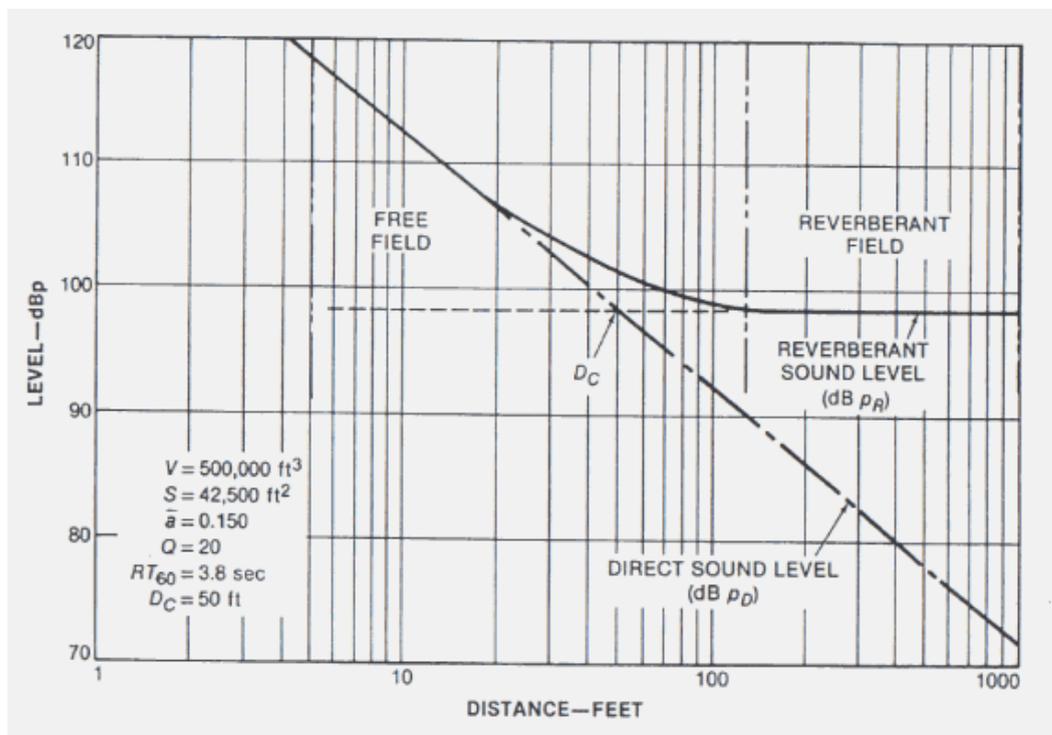


Figura 4 - Andamento del livello del suono diretto e del campo riverberante

In cui:

- il L_{riv} è considerato costante
- il L_{dir} scende di 6dB per ogni raddoppio di distanza
- nel caso di distanze < 10 dB si considera solo suono diretto (L_{dir})
- le rette L_{riv} e L_{dir} si intersecano nel punto D_c chiamato distanza critica ed è il punto in cui $L_{riv} = L_{dir}$.

Nel caso di una registrazione, per esempio, il microfono deve rientrare nella distanza critica D_c per captare un buon suono diretto.

Eguagliando L_{riv} e L_{dir}

$$L_w + 10 \log \frac{Q}{4 \cdot p \cdot r^2} = L_w + 10 \log \frac{4}{\sum \alpha_i \cdot S_i} \quad (9)$$

ricavo l'espressione per trovare la distanza critica

$$D_c = \sqrt{\left(\frac{Q}{16} \cdot \sum \alpha_i \cdot S_i \right)} \quad (10)$$

Per esempio se considero

$$\sum \alpha_i S_i = 20 \text{ m}^2$$

$$Q=1$$

$$\text{Trovo } D_c = \sqrt{\left(\frac{1}{16} \cdot 20 \right)} \cong 1.1 \text{ m}$$

La distanza critica è estremamente importante in termini di qualità e comprensione del messaggio che viene riprodotto.

Infatti se ci si trova entro tale distanza dalla sorgente, mi trovo in una situazione dove il suono diretto è predominante sul campo riverberante. Il suono diretto è chiaro, è nitido e porta un'informazione perfettamente intellegibile, viceversa il suono riverberante è confuso.

Quindi soprattutto per quanto riguarda la comprensione della parola è importante che l'ascoltatore venga a trovarsi sempre entro la distanza critica dalla sorgente.

Per l'ascolto normale i suoni riflessi aiutano l'ascolto perché apportano un livello sonoro più alto, però è importante non solo la quantità di suono che arriva al ricevitore, ma va tenuto in considerazione anche l'aspetto qualitativo.

[top](#)

Coda sonora e tempo di riverberazione

Utilizzo ora un parametro che non guarda solo l'analisi energetica, uso un'analisi temporale (suono non impulsivo).

Le unità fondamentali sono i FONEMI per la voce e le NOTE per la musica.

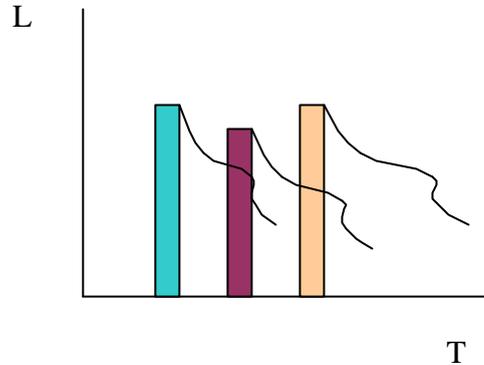


Figura 5 - Fonemi e code sonore

Nello schema di fig.5 si mostra il caso in cui il fonema viene 'sporcat' dal fonema precedente e dalla sua coda sonora. Nel caso in cui le code sonore sono più lunghe perché l'ambiente è riverberante il fonema viene 'sporcat' ancora di più.

Introduciamo il concetto di durata convenzionale di coda sonora, o tempo di riverberazione.

Il persistere per un certo tempo del suono nell'ambiente, dopo che l'evento sonoro è terminato, viene chiamato fenomeno della coda sonora o riverberazione.

Nel 1902, W. C. Sabine diede la seguente definizione il tempo di riverberazione: data una sorgente stazionaria interrotta, il tempo di riverberazione è il tempo che intercorre tra l'istante in cui si esaurisce il suono diretto e l'istante in cui il livello sonoro è sceso di 60 dB; esso viene indicato con T_{60} .

Prendiamo in esame una sorgente stazionaria

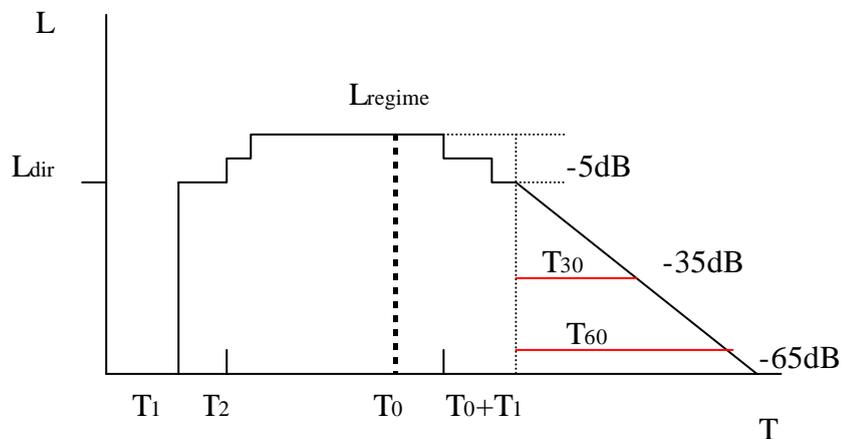


Figura 6 - Spegnimento di una sorgente stazionaria

Giunti a regime, spegniamo la sorgente. La prima energia che viene a mancare è quella del suono diretto. Mentre in accensione rispetto al silenzio quest'ultima aveva causato un brusco aumento del livello sonoro, ora rispetto al livello di regime alimentato dalla moltitudine di raggi riflessi, l'abbassamento che ne consegue è di entità più modesta. Ancora meno rilevante è l'abbassamento dovuto al venir meno del primo raggio riflesso. Il livello tende dunque a decadere a zero con un andamento come in figura 6.

Dopo un primo tratto scalinato la curva di decadimento diviene "liscia" e rettilinea.

Per valutare il tempo di riverberazione seguendo le disposizioni della normativa ISO3382 del 1997 si fa partire il cronometro dopo che il livello è sceso di 5 dB dal livello di regime in modo da evitare il primo tratto "scalinato" e si ferma dunque quando quest'ultimo è sceso complessivamente di 65 dB e lo indico con T_{60} .

Solitamente non si misura mai il T_{60} , ma si misura a -35 dB il T_{30} e a volte a -25 dB misuro il T_{20} .

E' sbagliato pensare che se $T_{60} = 1.2$ s allora $T_{30} = 0.6$ s (NO!!) infatti $T_{30} = 1.2$ s perché il tempo di riverbero che misuro è sempre per T_{60} !

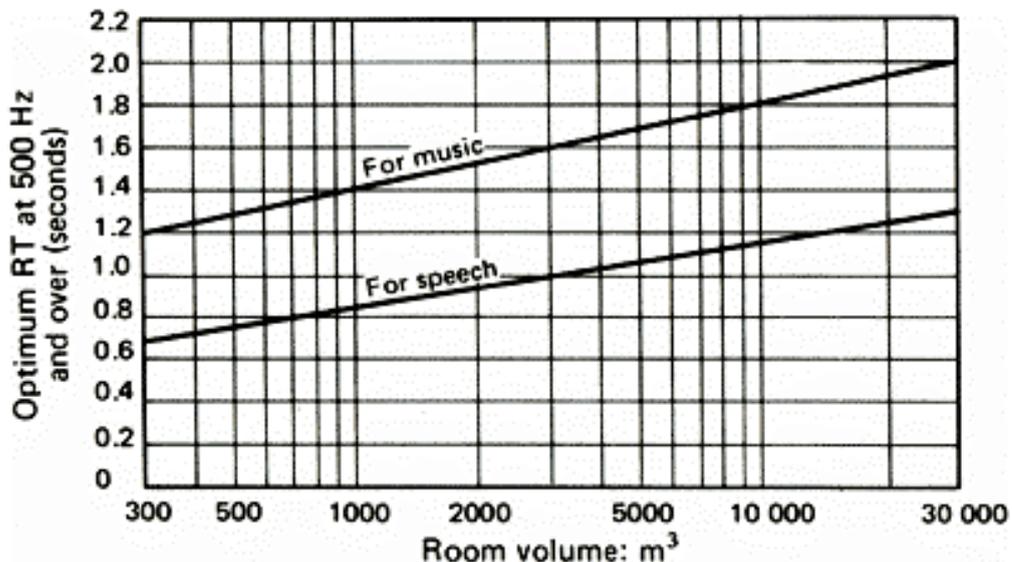
Se non riesco a misurare T_{60} misuro T_{30} e poi lo raddoppio o T_{20} e poi lo triplico.

Come il livello riverberante è statisticamente dimostrato uguale negli ambiente comuni, così anche per la durata della coda sonora ci si avvale della statistica.

La relazione che lega il T_{60} alle caratteristiche dell'ambiente è stata trovata sperimentalmente da Sabine e solo successivamente fu dimostrata e prende il nome di **formula di Sabine** :

$$T_{60} = 0.16 \cdot \frac{V}{\sum a_i \cdot S_i} \quad (11)$$

Questa formula è alla base dell'acustica architettonica. Esistono curve che danno T_{60} ottimali in funzione del volume di una stanza.



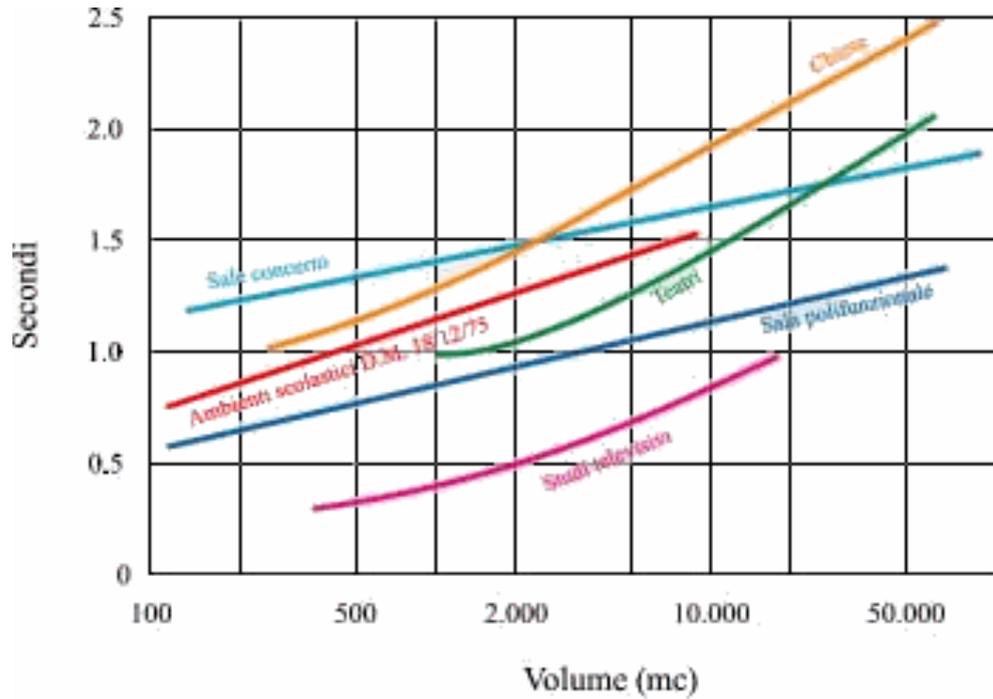


Figura 7 - Tempi di riverberazione ottimali a seconda del volume e dell'utilizzo di una stanza

Il T_{60} ci dà direttamente l'effetto percepibile dall'uomo della durata della coda sonora: noi sentiamo un ambiente molto riverberante quando $T_{60} > 2$ sec. e molto asciutto quando $T_{60} < 1$ sec.

Quindi la regolazione del tempo di riverberazione di un ambiente è uno dei principali parametri di progettazione acustica di una sala.

Secondo il Decreto Ministeriale del 18/12/1975 la curva ottimale nelle aule scolastiche con un $V=500\text{m}^3$ è $T_{60}=0.8$ s.

Riporto di seguito i tempi di riverbero ottimali di una stanza a seconda dell'utilizzo.

Ambiente	Tottimale (s)
Aula piccola	0.5
Aula grande	1.0
Cinema	0.7 – 0.8
Teatro dell'opera	1.3 – 1.5
Concert Hall	1.7 – 2.3
Chiesa	2.5 - 5

Tabella 2 - Tempi di riverbero ottimali nelle sale

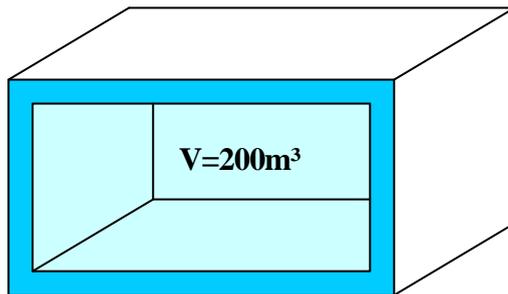
Si hanno casi in cui il tempo di riverberazione è molto più alto dell'ottimale, un esempio è la Chiesa di San Petronio a Bologna che ha un T_{60} pari a 10 s. I palazzetti dello sport possono avere un tempo di riverbero di anche 12 s.

[top](#)

Calcolo del T_{60}

Ecco come si calcola il T_{60} :

1) Se ho una stanza vuota

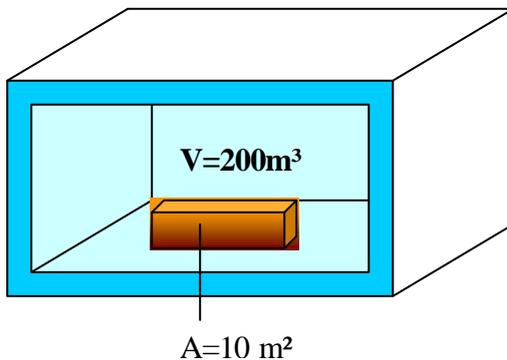


uso la formula (11) e calcolo:

$$T_{60_1} = 0.16 \cdot \frac{200}{\left(\sum \mathbf{a}_i \cdot S_i\right)_1} = 6 \text{ s}$$

2) Ora metto nella stanza 10 m² di un certo materiale.

Alla formula (11) ora devo aggiungere anche il coefficiente di assorbimento α del materiale e l'area A (in questo caso $A=10 \text{ m}^2$) che esso ricopre.



$$T_{60_2} = 0.16 \cdot \frac{200}{\left(\sum \mathbf{a}_i \cdot S_i\right)_1 + \mathbf{a} \cdot A} = 3 \text{ s}$$

[top](#)