

## INDICE della lezione del 16/05/2014

<i>Propagazione del suono in ambiente esterno</i>	
-Propagazione sferica.....	1
-Direttività in base alla posizione della sorgente.....	4
<i>Propagazione del suono in ambiente chiuso</i>	
-Onde dirette e riflesse.....	6
-Coefficienti acustici.....	7
<i>Livello di pressione sonora</i>	
-Campo libero.....	8
-Campo riverberante.....	8
-Campo semi-riverberante.....	9
-Distanza critica.....	10

## PROPAGAZIONE DEL SUONO IN AMBIENTE ESTERNO

### Propagazione sferica

Uno degli esempi più semplici di luogo in cui avviene la propagazione sonora è il campo libero, nonché una sorgente (“W” espressa in Watt), sospesa nell’aria che propaga il suono tutto intorno a sé.

Tale tipo di propagazione si chiama anche propagazione sferica o in campo libero e viene considerata puntiforme.

L’energia che si propaga resta in prima approssimazione costante (nessun assorbimento da parte dell’aria) ma l’intensità sonora diminuisce perché si distribuisce su una superficie sempre più grande.

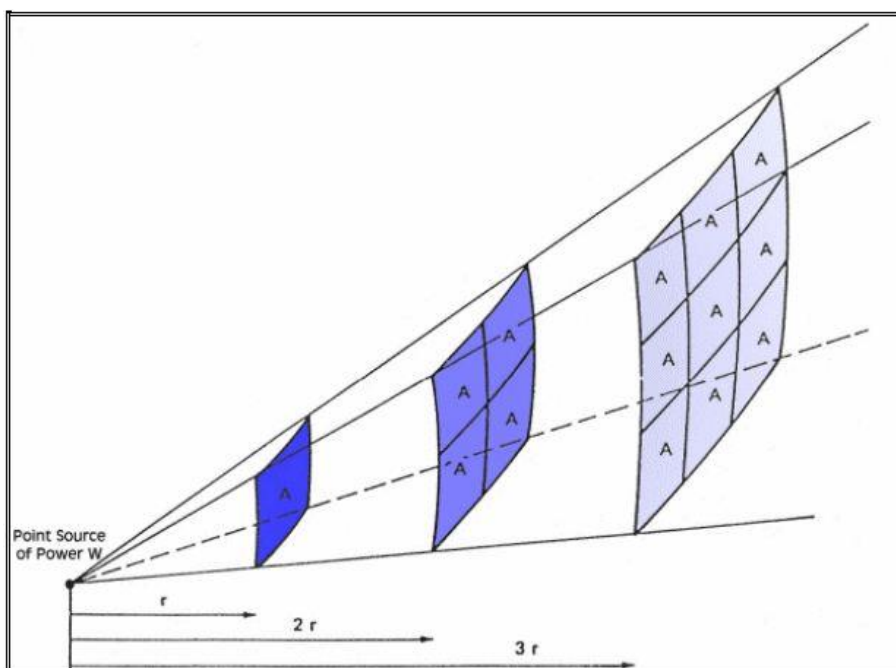


Figura 1 – Propagazione sferica del suono

Da tale grafico (Figura 1) è possibile dedurre che al raddoppiare del raggio (e quindi raddoppiata anche la distanza dalla sorgente al ricevitore) la superficie quadruplica.

Dato che la superficie sferica è pari a  $S=4\pi r^2$  [m<sup>2</sup>] e che il suono ha una propagazione sferica, la superficie cresce con il quadrato della distanza.

Per calcolare il livello d'intensità di un impulso sonoro, si ricorda la definizione di Intensità come rapporto fra Potenza W e Superficie S in campo sferico.

$$I = W/S = W/4\pi r^2 \quad [\text{Watt/m}^2]$$

Tale formula viene però trasformata dagli acustici in dB utilizzando i logaritmi. Per compiere tale modifica si ricorda la formula del Livello d'Intensità che è:

$$L_I = 10 \log \frac{I}{I_0} =$$

↓ Sostituisco  $W/4\pi r^2$  a  $I$

$$= 10 \log \left( \frac{W}{4\pi r^2 I_0} \right) = 10 \log \left( \frac{W}{4\pi r^2} \frac{1}{I_0} \right) = 10 \log \frac{W}{W_0} + 10 \log \frac{W_0}{I_0} + 10 \log \frac{1}{4\pi} + 10 \log r^{-2}$$

↓

Si può trascurare in quanto la potenza ed intensità di riferimento valgono  $10^{-12}$

**QUINDI**

$$L_I = L_W - 20 \log r - 11$$

Questo termine sta a significare che al crescere della distanza "r", il livello sonoro va calando

Tale numero equivale a 10 volte  $\log 1/4\pi r^2$  ed essendo negativo davanti al risultato si pone il segno "-"

Si deduce che quando il raggio "r" raddoppia ( $r=2$ ) la superficie quadruplica.

$$- 20 \log r = - 20 \log 2 = 6 \text{ dB}$$

Quindi ogni volta che la distanza raddoppia, il livello sonoro cala di **6 dB**. Questo numero viene chiamato  $\Delta L_2$ , ed è un indicatore del campo sonoro.

Nella realtà però, le sorgenti non emettono con uguale intensità in tutte le direzioni, infatti, il campo potrebbe non presentarsi come una superficie sferica.

$$L_I = L_P = L_W - 20 \log r - 11 + 10 \log Q \quad [\text{dB}]$$

$L_I$  = Livello d'Intensità Sonora

$L_P$  = Pressione Sonora

$L_W$  = Livello di Potenza Sonora

$Q$  = Fattore di direttività

Direttività

### Direttività

Rappresenta il rapporto tra l'intensità emessa verso una certa direzione  $\theta$  e l'intensità media che la sorgente avrebbe se fosse omnidirezionale emettendo la stessa potenza.

$$Q = I_\theta / I_0$$

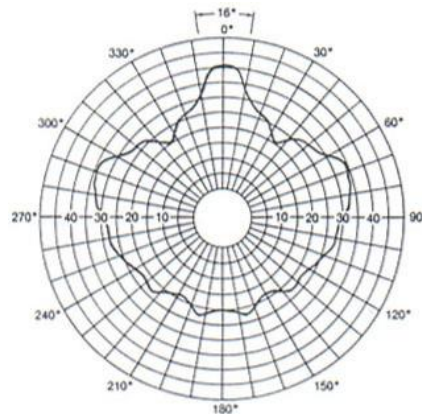


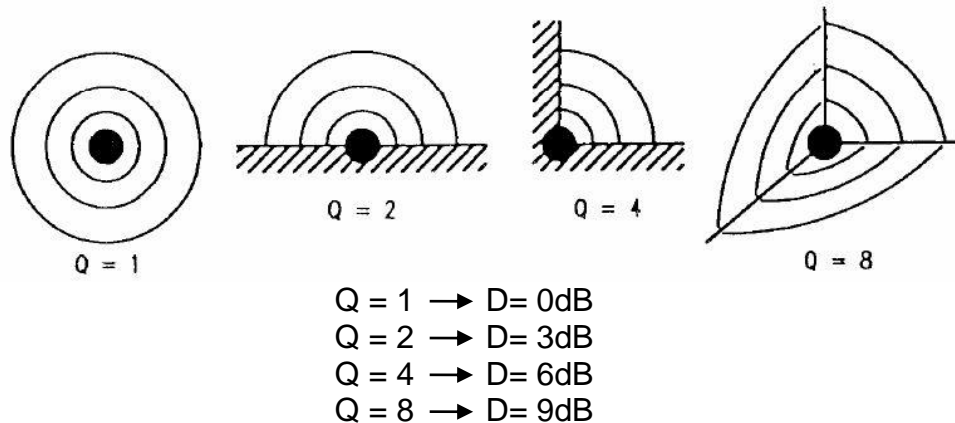
Figura 2 – Curve di Direttività di un altoparlante reale

Quindi l'altoparlante non emette uguale intensità sonora in tutte le direzioni, ma emette maggior potenza nella direzione frontale e meno in quella posteriore (Figura 2).

## Direttività in base alla posizione della sorgente

### A) Sorgente puntiforme

In base al posizionamento delle sorgenti puntiformi si hanno differenti effetti:



La direttività quindi, dipende non solo dalla sorgente ma anche dal posizionamento.

### B) Sorgenti Lineari

Le sorgenti lineari si differenziano da quelle puntiformi per la propagazione dell'energia su superfici cilindriche.

Riprendendo la formula dell'Intensità sonora come rapporto tra Potenza e Superficie (già precedentemente enunciata a pag.2) e inserendo la superficie di un cilindro  $S=2\pi rL$  [m<sup>2</sup>] otteniamo:

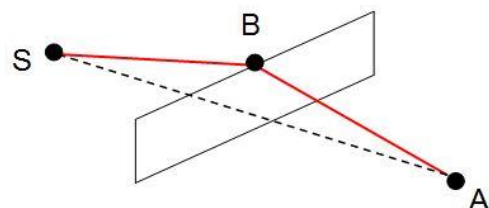
$$I = W/S = W/2\pi rL \quad [\text{Watt/m}^2]$$

Trasformandola in dB mediante i logaritmi, il risultato finale è il seguente:

$$L_I = L_W - 8 - 10 \log r \quad \text{e} \quad \Delta L_2 = 3\text{dB}$$

Le sorgenti lineari a differenza di quelle puntiformi hanno un impatto maggiore; infatti, al raddoppiare della distanza l'intensità sonora cala di 3dB anziché di 6dB; per questo motivo nel caso di una sorgente lineare, il metodo di allontanamento per diminuire il rumore non è sempre una soluzione adeguata.

Come soluzione a questo problema vengono installate delle barriere acustiche (B) tra la sorgente (S) e il ricevente (A), in modo tale che il suono non sia diretto ma venga deviato, aumentando il suo percorso e diminuendo così il suo livello sonoro.



L'attenuazione ottenibile mediante il posizionamento di queste barriere può essere calcolata tramite la relazione di Maekawa.

Definiamo anzitutto la differenza di cammino  $\delta = (SB + BA) - SA$

al crescere di  $\delta$  cresce l'attenuazione sonora.

Il valore dell'abbattimento acustico di una barriera non dipende però solo dal fattore geometrico  $\delta$ , dipende anche dalla frequenza del suono emesso dalla sorgente; infatti, minore è la frequenza, minore sarà l'abbattimento acustico ottenibile.

Per tenere conto di tale effetti, si "adimensionalizza" il valore di  $\delta$ , rapportandolo alla lunghezza d'onda  $\lambda=c/f$ , definendo un numero puro chiamato Numero di Fresnel.

$$N = 2 \delta / \lambda = 2 \delta f / c$$

L'attenuazione prodotta da una barriera,  $\Delta L$ , può poi essere calcolata in funzione di  $N$  con le formule di Maekawa:

$$\Delta L = 10 \log(3+20N) \quad (\text{sorgente puntiforme, campo sferico})$$

$$\Delta L = 10 \log(2+5.5N) \quad (\text{sorgente lineare, campo cilindrico})$$

Per poter stimare l'attenuazione sonora  $\Delta L$  di una barriera acustica si può anche utilizzare il grafico sperimentale di Maekawa.

Dopo aver effettuato il calcolo di  $N$ , ci si sposta sul grafico e in base alla tipologia di sorgente si sceglie la curva da utilizzare.

Cercando il valore di  $N$  sull'ascissa (x) si potrà trovare il corrispettivo valore di  $\Delta L$  sulle ordinate (y) che equivale all'attenuazione sonora della barriera.

## Grafico relazione di Maekawa

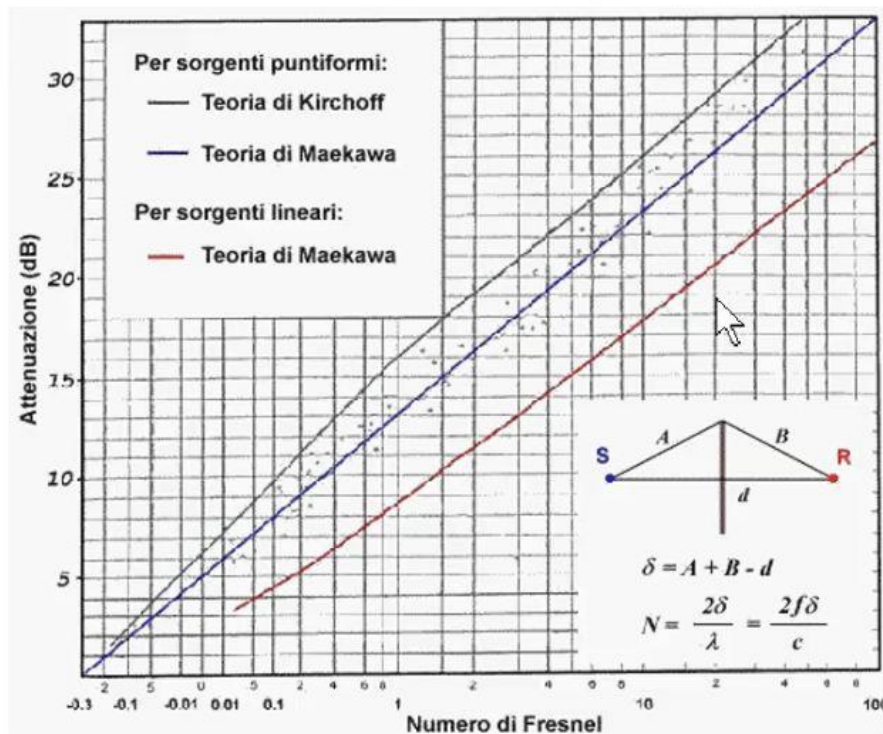


Figura 5 – Grafico di Maekawa

## PROPAGAZIONE DEL SUONO IN AMBIENTE CHIUSO

### Onde dirette e riflesse

*Acustica architettonica*: studio della propagazione del suono dentro un ambiente chiuso.

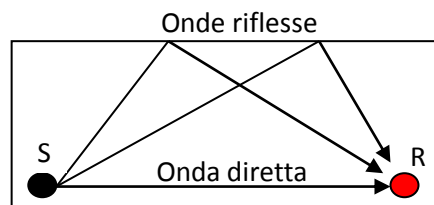
All'interno di un luogo chiuso il suono si propaga non solo in modo diretto, cioè dalla sorgente al ricevente, ma anche attraverso le onde riflesse.

### ONDE DIRETTE

Le onde dirette provengono dalla sorgente e raggiungono direttamente l'ascoltatore.

### ONDE RIFLESSE

Sono emesse dalla sorgente, ma non raggiungo direttamente l'ascoltatore, infatti sono prodotte da tutte le riflessioni sulle pareti che delimitano l'ambiente chiuso.



Più il percorso delle onde riflesse è lungo, più il tempo di volo del suono emesso dalla sorgente aumenta; infatti, si viene a creare un eco che si sovrappone a suoni che sono stati emessi successivamente e che hanno un cammino più breve.

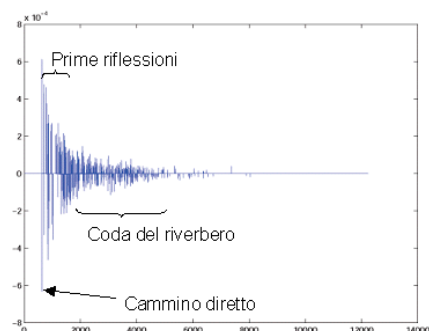
Tali onde riflesse possono creare un ambiente acustico poco confortevole. Inoltre il fenomeno delle riflessioni è governato dalle proprietà acustiche delle superfici utilizzate per rivestire il locale, infatti, si possono distinguere superfici acusticamente riflettenti e superfici acusticamente assorbenti.

### SONOGRAMMA o RISPOSTA ALL'IMPULSO

L'effetto delle riflessioni già precedentemente enunciate, possono essere graficamente riportate mediante un diagramma che corrisponde alla visualizzazione grafica del suono in dB in funzione del tempo, dopo aver eccitato l'ambiente con un suono di tipo impulsivo.

Tale grafico in ambiente all'aperto (campo libero), riporterebbe solo il primo picco, cioè il suono diretto, e poi finirebbe.

Dentro ad un locale chiuso invece, dopo aver emanato un impulso sonoro, il grafico si presenta diversamente; infatti dopo l'arrivo del suono diretto, vengono evidenziati successivi impulsi con tempi via via crescenti, che hanno rimbalzato su diverse superfici. E' importante evidenziare che più un cammino geometrico è lungo, più il suono



perde di intensità e diminuisce il valore in decibel.

Questo avviene perché ad ogni rimbalzo una parte di energia si trasforma in calore portando all'estinzione del suono, ma soprattutto perché il fronte d'onda sferico sta divergendo secondo la legge del campo libero, con  $\Delta L_2=6\text{dB}$ , e quindi è come se la sorgente si allontanasse via via..

### CODA SONORA o RIVERBERO

La coda sonora (o riverbero) è la conseguenza della riflessione sonora all'interno di locali chiusi e può essere più o meno lunga.

Tale fenomeno ha due effetti principali:

- 1) **ENERGETICO**: induce un aumento del livello sonoro, cioè l'energia riflessa si somma a quella del suono diretto, facendo sì che il livello sonoro risulti più forte al ricevitore, rispetto ad una stessa situazione in campo aperto.
- 2) **QUALITÀ SONORA**: è comune pensare che il riverbero influisca negativamente sulla qualità del suono.

Tale affermazione non è del tutto vera, infatti, in base ai gusti individuali e alle condizioni culturali, la coda sonora è più o meno accettata.

In base quindi, alla tipologia d'uso di un ambiente chiuso (es. sala concerti, sala cinematografica, aula scolastica ecc.), è stato stabilito un riverbero ottimale.

### Coefficienti acustici

Un flusso di energia  $W_i$ , che incide su una superficie si suddivide in tre differenti componenti: una riflessa  $W_r$ , una assorbita dalla parete  $W_a$  e una trasmessa all'ambiente esterno  $W_t$ .

$$W_0 = W_r + W_a + W_t$$

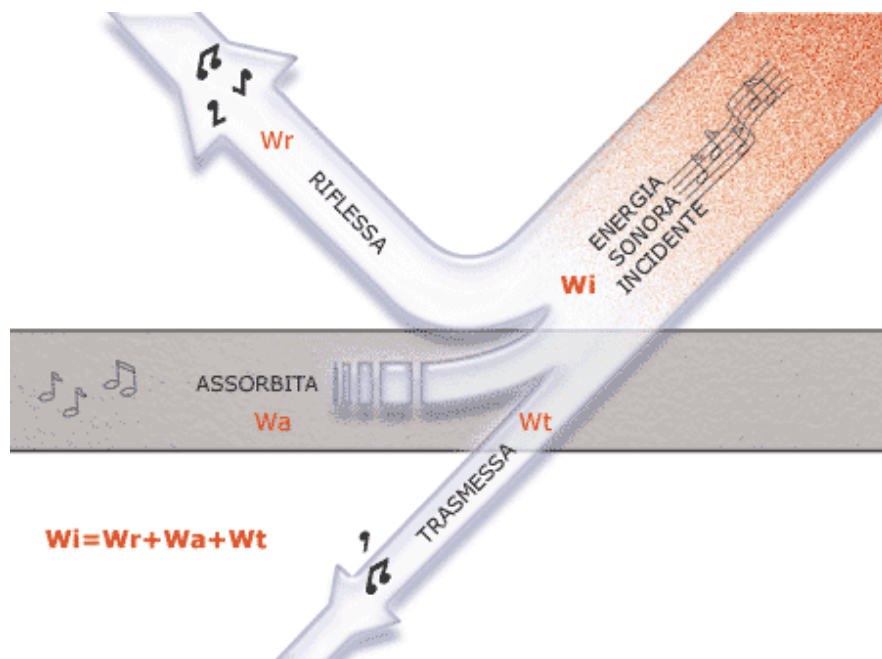


Figura 6 – Scomposizione del flusso di energia sonora

Se all'interno dell'equazione del bilancio energetico si pone al denominatore delle due identità l'energia incidente  $W_0$  ottengo la reazione:

$$1 = r + a + t$$

$r$  → Coefficiente di Riflessione  $W_r / W_i$   
 $a$  → Coefficiente di Assorbimento  $W_a / W_i$   
 $t$  → Coefficiente di Trasmissione  $W_t / W_i$

In realtà nessuno dei tre coefficienti suddetti viene solitamente impiegato. Per quanto riguarda il coefficiente "a", viene impiegato al suo posto il **coefficiente di assorbimento acustico apparente  $\alpha$** :

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

Da tale uguaglianza si deduce che il coefficiente di assorbimento acustico apparente  $\alpha$  non è altro che il rapporto fra la somma tra l'energia assorbita e trasformata in calore, e l'energia che viene trasmessa dall'altra parte, divisa per l'energia incidente.

Nel caso di una parete aperta (es. porta o finestra), il coefficiente di trasmissione di quell'apertura è  $t = 1$ , mentre non essendoci dissipazione di energia in calore, il coefficiente di assorbimento è  $a = 0$ ; di conseguenza l'uguaglianza  $\alpha = a + t$  equivale ad  $\alpha = 1$ .

Per conoscere  $\alpha$  di un materiale è necessario essere in possesso delle tabelle e delle schede dei produttori.

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

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

## LIVELLO DI PRESSIONE SONORA

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

- Campo libero
- Campo riverberante
- Campo semi-riverberante (combinazione tra campo libero e riverberante).

### Campo libero

Si chiama campo libero una zona in cui prevale il contributo dell'energia diretta, rispetto a quello dell'energia riflessa, che risulta trascurabile.

## LIVELLO DI PRESSIONE SONORA

$$L_p = L_w + 10 \log ( Q / 4\pi d^2 )$$

$L_w$  → Livello di Potenza sonora della 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

Si chiama campo riverberante se 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

$$L_p = L_w + 10 \log (4 / A)$$

Il numero 4 deriva dalla definizione di **libero cammino medio (L<sub>CM</sub>)**, che è la distanza media che il suono ha tra un rimbalzo e quello successivo.

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

Il "4" quindi, dopo una serie di semplificazioni, resta nella formula del livello di pressione sonora.

- L<sub>w</sub> → Livello di Potenza sonora della sorgente  
A → Area equivalente di assorbimento acustico detta anche unità assorbenti 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.

La formula sopraelencata si trova attraverso un calcolo di tipo statistico, proprio perché non si sa calcolare deterministicamente il livello sonoro dentro l'ambiente.

Quindi si va a fare un bilancio tra la potenza immessa e ciò che ne esce e che viene assorbito dalle superfici.

### Campo semi-riverberante

Il campo libero e il campo riverberante sono però casi estremi, in realtà, vi è in generale la combinazione tra i due, costituendo il campo semi-riverberante.

#### LIVELLO DI PRESSIONE SONORA

$$L_p = L_w + 10 \log [( Q / 4\pi d^2 ) + ( 4 / A )]$$

Il livello di pressione sonora nel caso di un campo semi-riverberante risulta la somma energetica tra il campo riverberante e quello libero. E' importante però affermare che allontanandosi dalla sorgente, il contributo del suono diretto è trascurabile rispetto a quello riverberante, mentre avvicinandosi alla sorgente, il contributo del suono riflesso perde valore. Per comprendere maggiormente questo fenomeno si fa dunque ricorso ad un grafico con ordinata il livello sonoro e in ascissa la distanza.

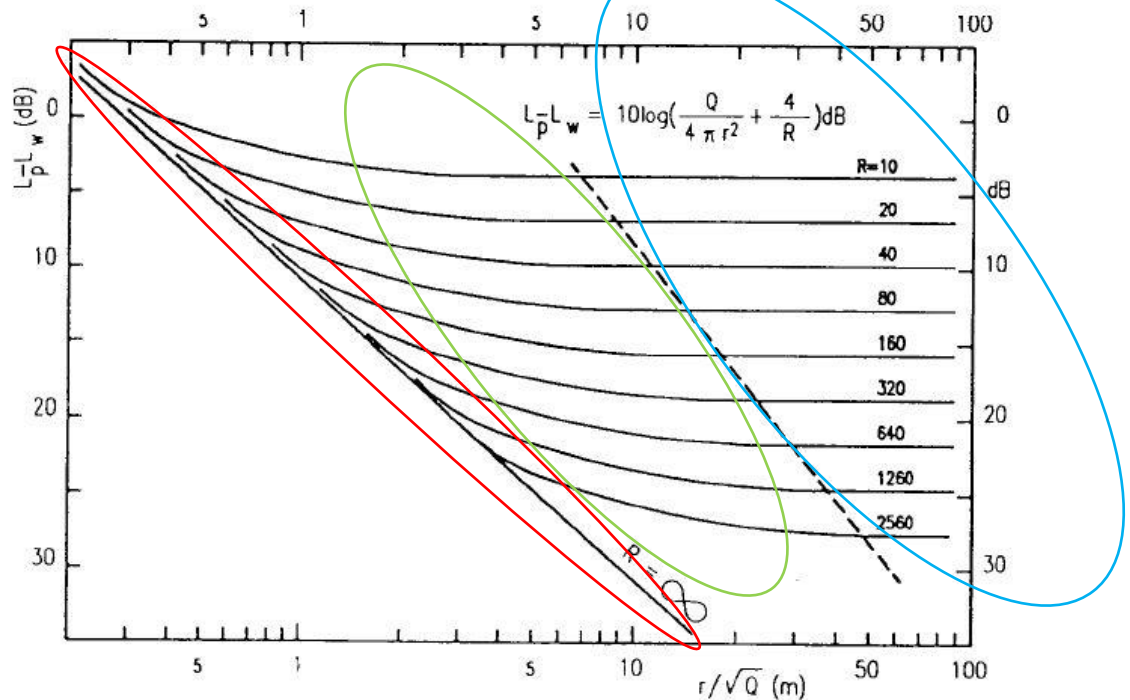


Figura 7 – Rappresentazione grafica della relazione valida per campo acustico semi-riverbetante

Il **campo rosso** delimita la zona in cui è posizionata la retta del campo libero, con  $A = \infty$ , quindi un ambiente privo di riflessioni. La pendenza della retta è determinata dalla relazione che impone una riduzione di 6dB ad ogni raddoppio della distanza  $d$ . Di **azzurro** è stato evidenziato il campo puramente riverberante. Infine in **verde** è stato evidenziato la zona caratterizzata dal campo semi-riverberante.

## Distanza critica

La distanza critica che è quella distanza dalla sorgente, alla quale il campo sonoro diretto e quello riverberante assumono lo stesso valore.

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

Perciò nel caso in cui il suono risulti troppo riverberante bisogna installare degli altoparlanti molto direttivi e posti a breve distanza dagli ascoltatori, in modo tale da riportare l'ascoltatore all'interno della distanza critica.

$$d_{cr} = \sqrt{\frac{Q\alpha S}{16\pi}}$$

cioè

$$Q / 4\pi d^2 = 4 / \alpha S$$

Q → Direttività

$\alpha S$  → Assorbimento

16 $\pi$  → Costante geometrica

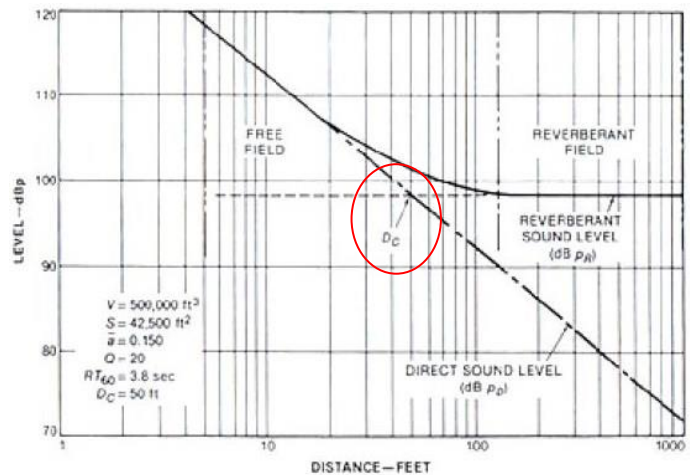


Figura 8 – Rappresentazione grafica della distanza critica