

## Corso di Elettroacustica e Sistemi Elettroacustici

### Lezione 1 - Acustica dei grandi ambienti e dei piccoli ambienti

#### Potenza, intensità e pressione sonora

La potenza di un segnale audio, espressa in Watt, è la grandezza necessaria a valutare la capacità di copertura ed efficienza di un impianto di amplificazione; essa è presente sia nelle specifiche tecniche degli amplificatori di potenza sia in quelle degli altoparlanti e delle casse acustiche, e rappresenta il principale parametro di valutazione di entrambe le categorie di componenti elettroacustici. La potenza è data dalla formula:

$$W = I \cdot V$$

ossia il prodotto della corrente per la tensione.

Richiamando la legge di Ohm, avremo anche che:

$$W = \frac{V^2}{R}$$

la potenza, cioè, è proporzionale al quadrato della tensione, e inversamente proporzionale alla resistenza (impedenza) del circuito. Anche per indicare un guadagno in potenza ricorriamo al decibel, ma possiamo notare come l'elevazione al quadrato cambi l'espressione logaritmica:

$$dB = 10 \cdot \log \frac{W_2}{W_1}$$

ossia, per indicare un guadagno in potenza il coefficiente del logaritmo non è più 20, ma 10. Questo ci permette di mantenere la medesima indicazione di guadagno in dB sia come valore di tensione che come valore di potenza, ossia 6 dB guadagnati nel mixer si traducono in 6 dB di potenza guadagnati sull'impianto di amplificazione.

È importante operare subito una distinzione tra le diverse indicazioni di potenza che possono essere fornite nelle specifiche degli altoparlanti, e precisamente:

- a) Potenza continua
- b) Potenza di picco
- c) Potenza musicale

Per potenza continua s'intende la potenza massima, misurata in regime sinusoidale, applicabile all'altoparlante con continuità, ed è in relazione con il calore che il componente è in grado di dissipare senza pause nell'erogazione di potenza. La potenza di picco è il valore relativo a transienti di breve periodo (< 1 secondo) che l'altoparlante

riesce a gestire, mentre la potenza musicale rappresenta un valore intermedio costituito dall'erogazione di potenza su segnali audio complessi (non sinusoidali) come possono essere i programmi musicali, e malgrado l'indicazione abbastanza generica, è un valore che tende a coincidere con il valore ideale di pilotaggio dell'altoparlante da parte dell'amplificatore.

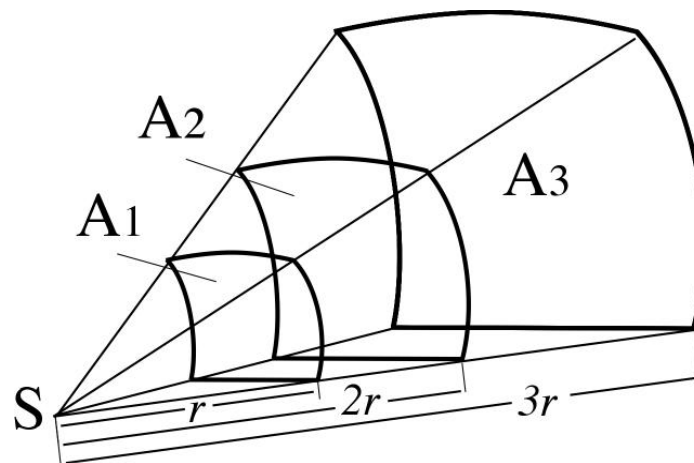
Il concetto di potenza, nell'audio, si riferisce alla capacità di diffusione del suono, in ogni direzione, ossia ad un irradiazione sferica da una sorgente.

Il concetto di "Intensità del suono" si riferisce invece al valore della potenza in relazione ad una superficie, quindi solo ad una parte di questa sfera, e precisamente:

$$I = \text{Watt} / m^2$$

Esiste una importante legge che quantifica la dispersione dell'intensità sonora al crescere della distanza dalla fonte sonora: la "legge quadratica inversa" (inverse square law).

Il suono si propaga nello spazio libero da ostacoli in onde sferiche che hanno il centro nel punto in cui si origina il suono stesso. Nella fig. 1 è evidenziato una porzione del propagamento sferico del suono che ha origine nel punto S: la stessa energia, mano a mano che si allontana dal punto d'inizio, va a interessare superfici di diffusione sempre più vaste, e precisamente le aree evidenziate con A<sub>1</sub>, A<sub>2</sub> e A<sub>3</sub>. La sua intensità diminuisce al crescere della distanza del punto d'ascolto.



*fig. 1: diminuzione dell'intensità all'aumentare della distanza: la legge quadratica inversa*

Poiché l'area in cui si propaga il suono aumenta in modo proporzionale al quadrato del raggio, l'intensità del suono, intesa come potenza acustica per unità di superficie, diminuisce della stessa proporzione. In pratica, il doppio della distanza porta ad una diminuzione di intensità pari a 1/4, il triplo a 1/9 e così via. Se consideriamo ad es. la fig. 1, avremo che:

$$I_2 = \frac{I_1}{4}$$

$$I_3 = \frac{I_1}{9}$$

dove

$I_2$  = intensità nell'area  $A_2$

$I_3$  = intensità nell'area  $A_3$

Passando alla notazione in decibel, e ricordando la formula relativa al rapporto di potenza:

$$dB = 10 \log \left( \frac{I_1}{I_n} \right)$$

calcoliamo che, raddoppiando la distanza, il valore in decibel sarà dato da:

$$dB = 10 \log \left( \frac{1}{4} \right) = -10 \log 4 = -6,02$$

Possiamo quindi affermare che la diminuzione d'intensità, e quindi di potenza acustica, è di 6 dB a ogni raddoppio della distanza.

Nell'uso pratico, per esprimere l'efficienza degli altoparlanti e il volume sonoro assoluto in un determinato ambiente, si ricorre ad un'altra grandezza: la pressione sonora, che ha come unità di misura il  $dB_{SPL}$  (Sound Pressure Level). Esso è definito dalla formula:

$$\varnothing dB_{SPL} = 2^{-5} N / m^2 = 2^{-5} Pa$$

dove

$N$  = Newton

$Pa$  = Pascal

Questa grandezza definisce la soglia dell'udibilità, e ogni valore superiore a questa soglia descrive una scala di percezione dei volumi sonori, di cui la tab. 1 è un'esemplificazione. Naturalmente questa tabella ha un valore puramente indicativo, considerando quanto diversa possa essere la percezione umana da soggetto a soggetto, e le differenze che possono sorgere ai livelli più bassi passando da una regione all'altra dello spettro. Ha un'importanza nel quantificare la "soglia del dolore" e tutta una serie di suoni che concorrono a formare il cosiddetto "inquinamento acustico", entrando a far parte anche di disposizioni di legge riguardanti la misura di tollerabilità dei rumori ambientali.

Fonte	mt	SPL
Esplosione nucleare	5	250
Motore di razzo	30	180
Motore di jet	30	150
Fucilata	1	140
Soglia del dolore		130
Sirena di nave	30	130
Motore a reazione	61	120
Martello pneumatico	2	100
Grosso autotreno	1	90
Aspirapolvere	1	80
Traffico pesante	5	70
Conversazione media	1	60
Traffico leggero		50
Quartiere residenziale di notte		40
Silenzio in teatro		30
Fruscio di foglie		20
Respiro umano	3	10
Soglia di udibilità		0

*tab. 1: scala dbSPL*

### Un esempio pratico

Facciamo ora un esempio pratico per mettere in relazione i valori di potenza e pressione sonora. Supponiamo di avere a disposizione un diffusore acustico fornito delle seguenti specifiche:

Livello d'uscita:  $124 \text{ dB}_{SPL}$  a 1 mt con potenza di 1 Watt

Potenza continua: 100 Watt

Potenza di picco: 400 Watt

E vogliamo calcolare fino a quale distanza questo componente potrà mantenere una pressione sonora di  $120 \text{ dB}_{SPL}$  in regime continuo. Per prima cosa calcoliamo la pressione sonora ad un metro in regime di potenza continuo:

$$124 + 10 \cdot \log \frac{100}{1} = 144 \text{ dB}_{SPL}$$

Sapendo che la potenza diminuisce di 6 dB ad ogni raddoppio di distanza, avremo:

$$\text{a } 2\text{mt} = 138 \text{ dB}_{SPL}$$

$$\text{a } 4\text{mt} = 132 \text{ dB}_{SPL}$$

$$\text{a } 8\text{mt} = 126 \text{ dB}_{SPL}$$

$$\text{a } 16\text{mt} = 120 \text{ dB}_{SPL}$$

Possiamo concludere che tale diffusore può mantenere la pressione sonora richiesta fino a 16 metri.

### La riverberazione e l'assorbimento acustico

Un'ambiente non riverberante, come potrebbe essere una camera anecoica, è un ambiente in cui il suono generato da una fonte sonora muore nel momento in cui termina la produzione di onde acustiche alla fonte (fig. 2).

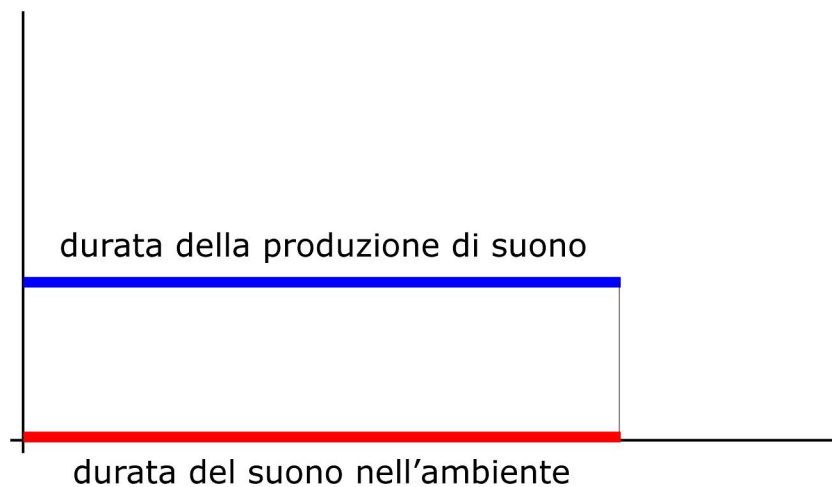


fig. 2: ambiente non riverberante

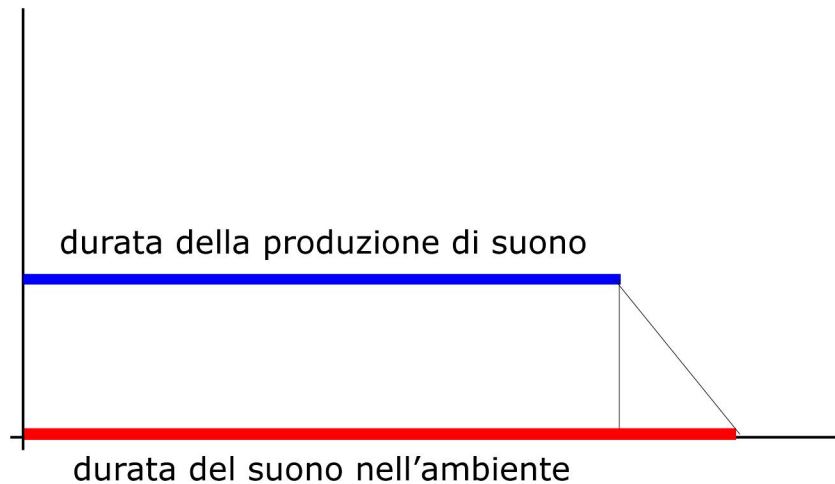
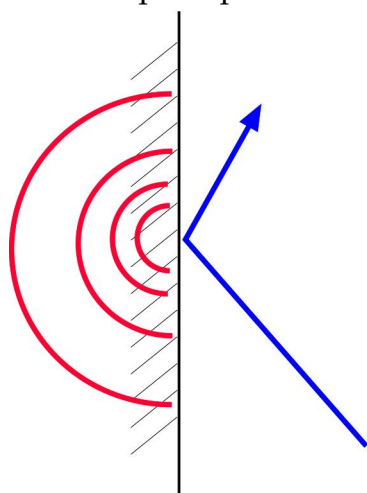


fig. 3: ambiente riverberante

Un ambiente riverberante (fig. 3) è quello in cui il suono continua a propagarsi nell'aria anche dopo la produzione di onde sonore, a causa delle riflessioni delle superfici. Ogni



onda sonora che colpisce una superficie (fig. 4) viene in parte assorbita dal materiale di rivestimento della superficie (in rosso), e in parte riflessa (in azzurro), contribuendo così al riverbero ambientale.

fig. 4: riflessione del suono su di una superficie

Ne consegue che maggiore è l'assorbimento delle superfici, minore è il riverbero, o anche che mentre un riverbero lungo implica un basso assorbimento, un riverbero corto implica un alto assorbimento. Il grado d'assorbimento di un particolare rivestimento di una superficie è espresso da una grandezza nota come "coefficiente d'assorbimento"

(absorption coefficient), ed è una grandezza compresa tra 0 e 1 definita da:

$$\alpha = \frac{I_a}{I}$$

dove

$I_a$  = intensità del suono assorbito

$I$  = intensità del suono incidente sulla superficie

Da questa formula deriva che l'intensità del suono riflesso  $I_R$  è data da:

$$I_R = I(1 - \alpha)$$

Ne consegue che il coefficiente di assorbimento è strettamente legato alla natura del materiale di cui è rivestita la superficie, e che, conoscendo tale materiale, è possibile determinare il grado di assorbimento acustico che esso potrà fornire. Su molte fonti è possibile reperire tabelle come quella esemplificata qui di seguito, nella quale sono indicati i coefficienti di assorbimento dei più comuni materiali.

TAVOLA DEI COEFFICIENTI DI ASSORBIMENTO							
NATURA DELLA SUPERFICIE	COEFFICIENTI DI ASSORBIMENTO PER FREQUENZA						
	125	250	500	1000	2000	4000	NRC
Pannello acustico, a parete	0.2	0.4	0.7	0.8	0.6	0.4	0.51
Pannello acustico, sospeso	0.5	0.7	0.6	0.7	0.7	0.5	0.61
Intonaco acustico	0.1	0.2	0.5	0.6	0.7	0.7	0.46
Intonaco comune, su canniccio	0.2	0.15	0.1	0.05	0.04	0.05	0.09
Cartongesso da 1/2"	0.3	0.1	0.05	0.04	0.07	0.1	0.11
Foglio di compensato da 1/4"	0.6	0.3	0.1	0.1	0.1	0.1	0.43
Mattone in cemento, grezzo	0.4	0.4	0.3	0.3	0.4	0.3	0.70
Cemento colato	0.01	0.01	0.02	0.02	0.02	0.03	0.03
Mattone	0.03	0.03	0.03	0.04	0.05	0.07	0.08
Piatrelle in vinile su cemento	0.02	0.03	0.03	0.03	0.03	0.02	0.02
Moquette su cemento	0.02	0.06	0.15	0.4	0.6	0.6	0.30
Moquette con retro in feltro	0.1	0.3	0.4	0.5	0.6	0.7	0.43
Pavimento in legno	0.4	0.3	0.2	0.2	0.15	0.1	0.22
Vetro comune	0.3	0.2	0.2	0.1	0.07	0.04	0.15
Vetro pesante	0.2	0.06	0.04	0.03	0.02	0.02	0.06
Tendaggi in velluto medio	0.07	0.3	0.5	0.7	0.7	0.6	0.47
Sedile tappezzato, vuoto	0.2	0.4	0.6	0.7	0.6	0.6	0.51
Sedile tappezzato, occupato	0.4	0.6	0.8	0.9	0.9	0.9	0.75
Sedile in legno, vuoto	0.02	0.03	0.03	0.06	0.06	0.05	0.04
Panca in legno, occupata	0.4	0.4	0.7	0.7	0.8	0.7	0.61

tab. 2: i coefficienti di assorbimento

L'ultima colonna della tabella riporta il coefficiente di riduzione del rumore (Noise Reduction Coefficient), ossia il valore che descrive le incidenze casuali dei coefficienti di assorbimento acustico, ed è definito come media aritmetica, arrotondata al più vicino multiplo di 0,05, dei coefficienti di assorbimento acustico misurati alle 4 bande di un terzo di ottava delle frequenze di 250, 500, 1000 e 2000 Hertz.

Dalla formula del coefficiente di assorbimento, conoscendo le dimensioni fisiche dell'ambiente, è possibile ricavare una grandezza nota "costante della stanza", data da:

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

dove

S = superfice totale dell'ambiente

Nello studio dell'acustica in ambienti chiusi occorre fare una distinzione fondamentale, e precisamente tra "Acustica dei grandi ambienti" (Large-room acoustics) e "Acustica dei piccoli ambienti" (Small-room acoustics). La differenza dello studio dell'acustica nei grandi e nei piccoli ambienti risiede nel fatto che i primi si riferiscono ad una propagazione del suono "diffusa" (diffuse field), dove il comportamento delle onde sonore non è trattato in base ai valori delle frequenze, in quanto il grande numero delle riflessioni fa sì che il suono sia il risultato di una somma statistica del totale delle frequenze, mentre per i secondi il comportamento è strettamente collegato ai valori di frequenza e alle risonanze che essi provocano nella stanza, considerando anche che nei piccoli ambienti vi è meno dispersione di suono, dovendo le onde acustiche riflettersi più volte sulle superfici prima di estinguersi.

Per ragioni che esamineremo meglio più oltre, possiamo stabilire che la categoria dei grandi ambienti riguarda convenzionalmente ambienti superiori a  $1.000 \text{ m}^3$  per il parlato, e a  $7.000 \text{ m}^3$  per la musica<sup>1</sup>.

### Acustica dei grandi ambienti

Nella fig. 5 è rappresentata, nell'asse del tempo, la sequenza di eventi occorrenti in un dato ambiente in cui venga generato un suono a carattere impulsivo.

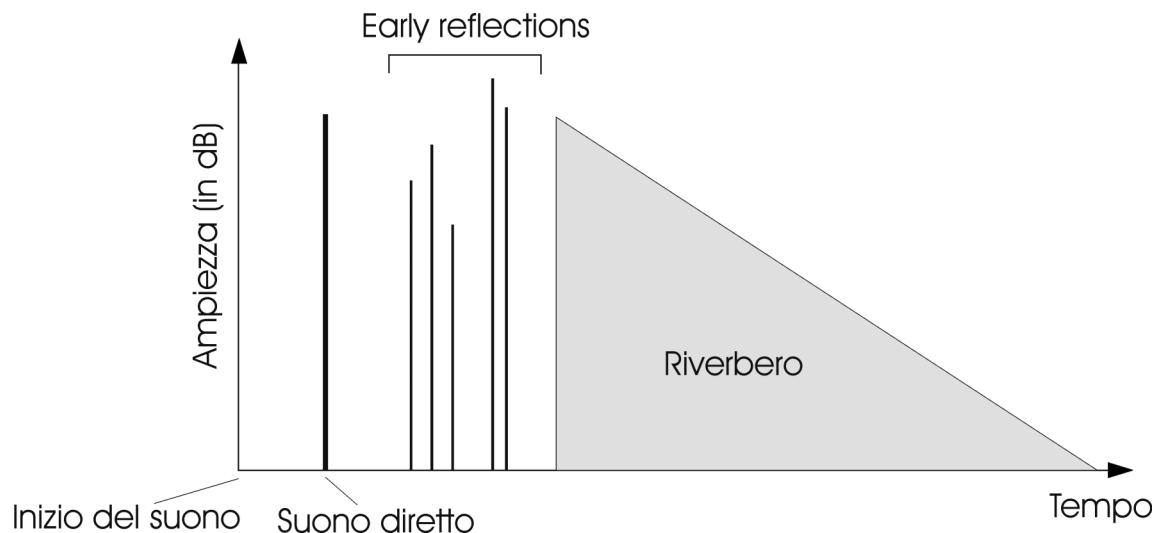
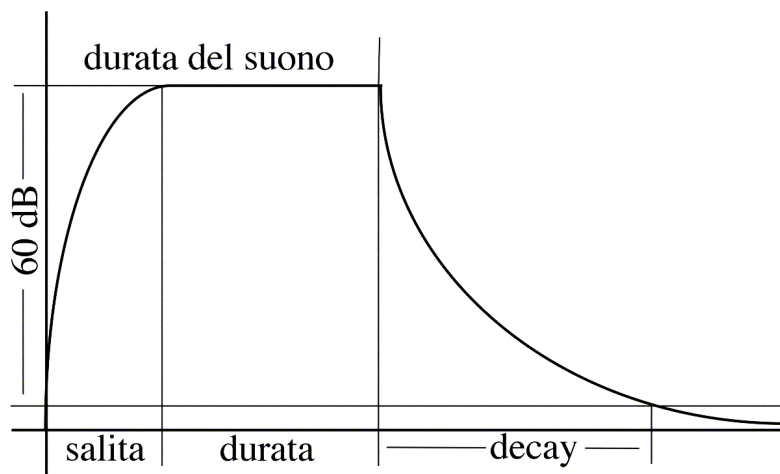


fig. 5: il riverbero

<sup>1</sup> Queste cifre derivano dal calcolo della minima frequenza (frequenza critica) al di sopra della quale il numero delle riflessioni fa sì che il comportamento del riverbero sia sufficientemente omogeneo tra le frequenze (diffuse field), e corrispondono alle frequenze rispettivamente di 80 Hz e 30 Hz, secondo l'equazione di Schroeder di cui parleremo più avanti.



Un suono prodotto in un ambiente raggiunge un punto d'ascolto in un intervallo di tempo: l'ascolto del suono diretto è la prima percezione del suono. Successivamente, il suono raggiunge il punto di ascolto attraverso le prime riflessioni (early reflections) prodotte dalle pareti, dal soffitto e dal pavimento: gli intervalli di tempo, in questo caso, dipendono dalle distanze percorse dal suono dal punto di origine al punto di ascolto passando per la riflessione con queste superfici. Dopo un ulteriore intervallo di tempo, inizia la coda del riverbero, che è quel momento in cui le riflessioni si moltiplicano tra di loro e diventano indistinguibili le une dalle altre. Possiamo dire che mentre le early reflections forniscono le informazioni relative al collocamento del suono nello spazio e alle dimensioni dell'ambiente riverberante, la coda di riverbero, essendo inversamente correlata al coefficiente di assorbimento, fornisce informazioni sulla qualità e la ricchezza timbrica della sala, completando anche la percezione delle dimensioni. Nel momento in cui una sorgente sonora all'interno di uno spazio chiuso cessa di produrre onde acustiche, il suono continua a riflettersi sulle superfici all'interno dell'ambiente, perdendo energia ad ogni riflessione, per un certo periodo di tempo. Questo tempo è noto come "tempo di riverberazione" dell'ambiente, e dipende da una serie di fattori tra cui i più importanti sono le dimensioni dell'ambiente ed il suo coefficiente d'assorbimento, ossia la capacità delle pareti di riflettere oppure assorbire il suono. Il riverbero possiede un inviluppo, dato da un tempo di salita, un tempo di durata, e un tempo di decadimento o "decay", come illustrato in fig. 6.



*fig. 6: il decay del riverbero*

La salita è data dal tempo occorrente al suono presente nella stanza ad accumulare il suono diretto e tutte le riflessioni prodotte dalle superfici, e raggiungere un punto di stabilizzazione in cui il livello rimane costante.

### **Il tempo di riverbero**

Il tempo di riverberazione, ovverossia la durata del decay, può essere determinato, oltre che empiricamente con l'ausilio di apposite tecniche di rilevamento, attraverso una serie

di formule, conoscendo i parametri fondamentali della stanza, e stabilendo innanzitutto, come evidenziato dalla figura, che convenzionalmente il tempo di riverberazione è quello che intercorrere dall'istante in cui cessa il suono alla sorgente all'istante in cui il suono totale nell'ambiente si riduce di 60 dB, e viene indicato con l'espressione  $RT_{60}$ . La formula più comune per il calcolo del tempo di riverberazione è l'equazione di Sabine:

$$RT_{60} = \frac{0,161V}{S\alpha}$$

dove

0,161 = costante (derivata dalla velocità del suono)<sup>2</sup>

$V$  = volume dell'ambiente (in  $mt^3$ )

$S$  = superficie totale dell'ambiente (in  $mt^2$ )

$\alpha$  = coefficiente medio di assorbimento

Il coefficiente d'assorbimento dipende dal materiale di rivestimento delle superfici, ed è ricavabile da apposite tabelle come quella illustrata in precedenza. Nell'eventualità che le superfici siano composte da materiali differenti, occorre calcolare il coefficiente medio di assorbimento, applicando la formula:

$$\alpha = \frac{S_1\alpha_1 + S_2\alpha_2 + \dots + S_n\alpha_n}{S}$$

dove

$S_1, S_2, \dots, S_n$  = superfici dell'ambiente

$\alpha_1, \alpha_2, \dots, \alpha_n$  = rispettivi coefficienti d'assorbimento

### La frequenza critica

Se poniamo in relazione le dimensioni di un ambiente con un dato tempo di riverbero che garantisca l'intelligibilità dei suoni prodotti nell'ambiente, possiamo ricavarci la "frequenza critica" al di sopra della quale il comportamento segue le regole della diffusione (equazione di Schroeder):

$$f_c = 2.000 \sqrt{\frac{RT_{60}}{V}}$$

dove

---

<sup>2</sup> Nel caso in cui i valori di volume e superficie siano espressi in  $ft^3$  e  $ft^2$  rispettivamente, la costante assume il valore 0,049.

$f_c$  = frequenza critica

2.000 = costante di tempo<sup>3</sup>

$RT_{60}$  = tempo di riverbero

$V$  = volume (in  $mt^3$ )

Questa equazione, attraverso la sua inversa:

$$V = RT_{60} \left( \frac{2.000}{f_c} \right)^2$$

stabilisce i volumi minimi degli ambienti per permettere l'intelligibilità del parlato e della musica, ossia le dimensioni di 1.000 e 7.000  $mt^3$ , calcolate convenzionalmente in base ad un tempo di riverbero pari a 1,6 sec e per valori di frequenza critica pari a rispettivamente 80 e 30 Hz.

### La distanza critica

Un'altra relazione importante è data dal rapporto tra suono diretto e riverbero.

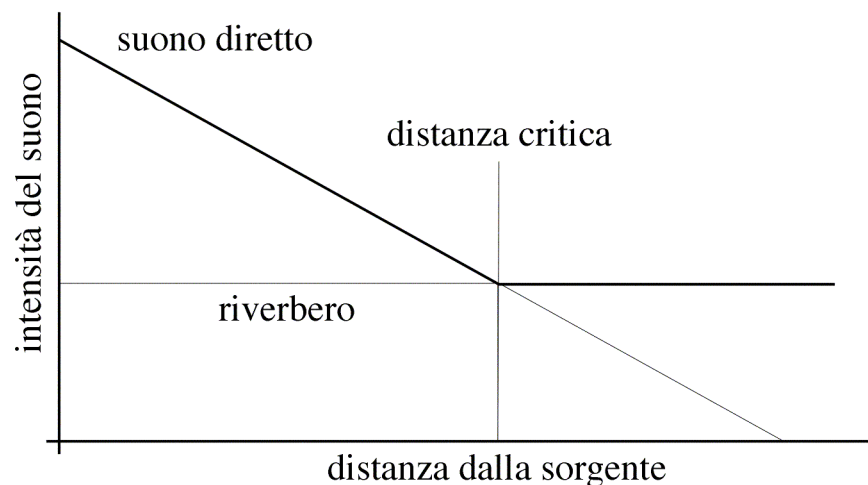


fig. 7: distanza critica

Nella fig. 7 vediamo come, al crescere della distanza dalla sorgente, aumenta il rapporto tra riverbero e suono diretto, fino a raggiungere un punto, chiamato "distanza critica", dove i due livelli si equivalgono: allontanandosi ulteriormente dalla sorgente, il suono riverberante diventa predominante rispetto al suono diretto. La distanza critica si può calcolare con la formula:

---

<sup>3</sup> Per misurazioni di cubatura in  $ft^3$  la costante è 11.885.

$$r = 0,141\sqrt{RQ}$$

dove

$r$  = distanza critica

0,141 = costante

$R$  = costante della stanza

$Q$  = direttività della sorgente (in rapporto ad una sfera)

La direttività della sorgente  $Q$  è la grandezza che indica quanto la diffusione del suono, teoricamente sferica, è limitata da barriere.

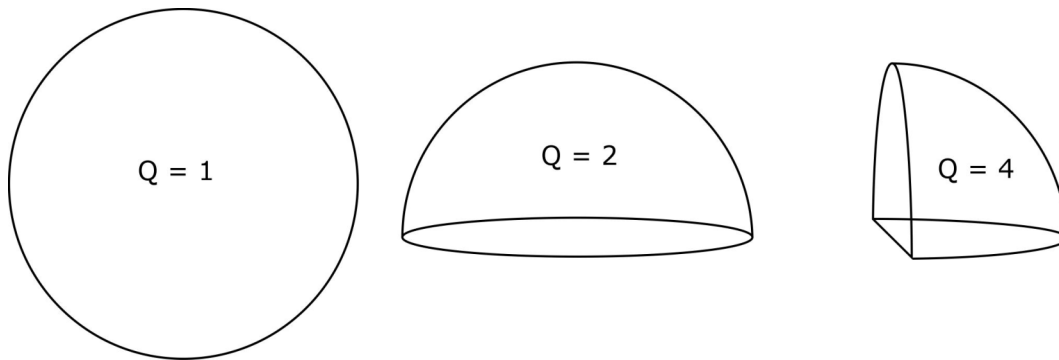


fig. 8: direttività in rapporto ad una sfera

Per una diffusione del suono perfettamente sferica, la costante  $Q = 1$ , mentre se la diffusione è limitata dalle superfici della stanza, la costante assume un valore pari all'inverso della frazione di sfera interessata dalla diffusione. Ad es., se la sorgente del suono si trova al livello del pavimento, o lungo una parete, la diffusione diventa emisferica, e  $Q = 2$ , se si trova nell'angolo tra il pavimento e una parete, la diffusione è su un quarto di sfera e  $Q = 4$ , ecc. La fig. 8 semplifica questa classificazione.

### Acustica dei piccoli ambienti

Il comportamento acustico di un ambiente così come lo abbiamo descritto fin qui, con gli strumenti matematici illustrati per definirne i parametri e le caratteristiche di risposta riguarda sale di grandi dimensioni, dove la dinamica delle onde acustiche avviene a prescindere, almeno in larga parte, dalla frequenza. La definizione prima data di *frequenza critica* ci conduce all'esaminare più in dettaglio quello che avviene al di sotto di tale soglia, ossia la risposta di ambienti dipendenti dalla frequenza, quando tale frequenza critica sia al di sopra dei limiti convenzionali esposti in precedenza (80 e 30 Hz).

La prima differenza da evidenziare rispetto all'acustica dei grandi ambienti è la virtuale assenza di riverbero, ossia, ricordandosi la definizione precedentemente fornita, la prevalenza delle prime riflessioni rispetto alla coda di decadimento (decay).

## Le onde stazionarie

Un suono che si diffonde in una stanza viene in parte assorbito e in parte riflesso dalle pareti. Quando un suono riflesso va a coincidere con la fase e la direzionalità del suono originale esso ne accresce l'intensità e la sua frequenza prende il nome di "onda stazionaria". Ad ogni piccolo ambiente è associata una serie di onde stazionarie, dette "frequenze modali" o "modi" ("eigenmodes"), dipendenti dalle dimensioni dell'ambiente e dalla sua conformazione. Nella fig. 9 si può osservare come due onde di uguale frequenza ed ampiezza e moto contrario (in verde e in azzurro), come potrebbero essere un suono e la sua riflessione su di una parete, generano un'onda di uguale frequenza ed ampiezza variabile (in nero) i cui picchi massimi coincidono con i momenti in cui le creste e le valli delle due onde danno una somma a fase uguale, ed i cui nodi corrispondono ad una somma delle due onde a fase opposta. L'onda generata non avrà propagazione (i nodi saranno situati sempre nel medesimo punto dello spazio, come evidenziano le righe verticali), da cui il nome di onda stazionaria.

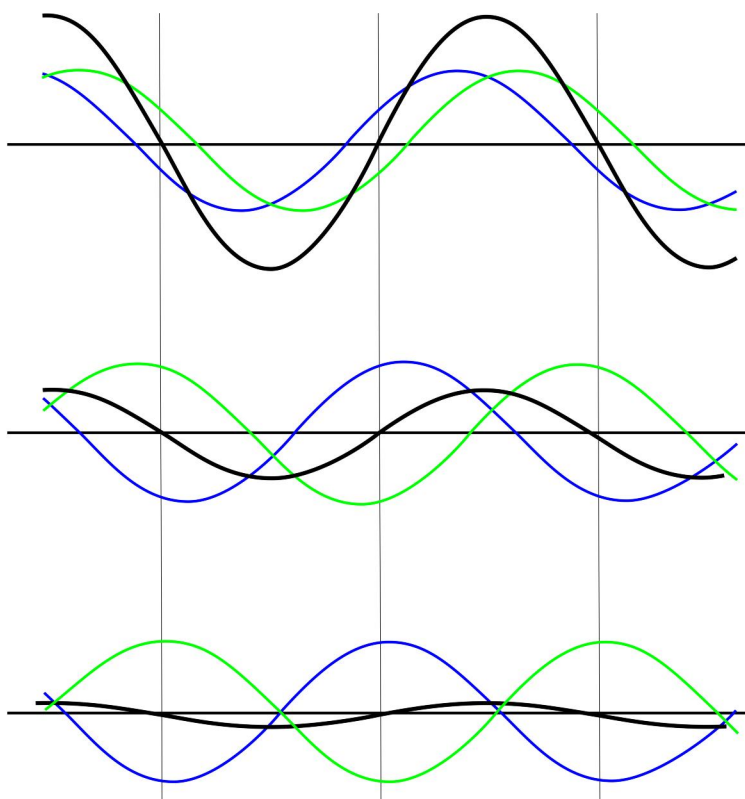


fig. 9: onda stazionaria

Se esaminiamo il grafico illustrato in fig. 10, rappresentante la risposta in frequenza di un ambiente chiuso, notiamo la suddivisione in quattro zone sul dominio della frequenza. La prima (zona di pressione) è l'ambito di frequenza dove un suono non può

generare onde acustiche, in quanto nessuna delle dimensioni della stanza è almeno uguale a metà della lunghezza d'onda, e genera solo variazioni di pressione dell'aria.

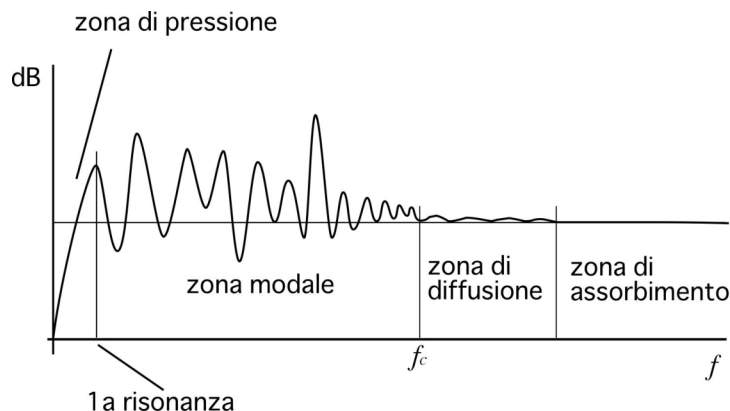


fig. 10: misurazione delle frequenze modali

La seconda zona di frequenza è quella relativa alla generazione di onde stazionarie, le cui risonanze generano i picchi indicati dal grafico. Segue la zona di diffusione, ossia il riverbero vero e proprio, ed infine la zona morta dovuta all'assorbimento acustico. Il punto indicato come  $f_c$  indica il valore di frequenza (frequenza critica) al di sopra del quale il riverbero ambientale segue criteri statistici non dipendenti dalle singole frequenze, e ricade nell'ambito dell'acustica dei grandi ambienti. Tale frequenza, ad es., corrisponde ai valori di 80 Hz e 30 Hz indicati rispettivamente per il parlato e la musica nell'acustica dei grandi ambienti (vedi sopra l'equazione di Schroeder). Esaminiamo più in dettaglio il comportamento acustico nella zona modale.

### Modi di risonanza

Richiamiamo brevemente qui la formula che mette in relazione lunghezza d'onda e frequenza:

$$\lambda = \frac{c}{f}$$

dove

$\lambda$  = lunghezza d'onda (in mt)

$c$  = velocità del suono (in mt/sec)

$f$  = frequenza (in Hz)

I primi modi che esaminiamo sono quelli relativi alle riflessioni tra due superfici contrapposte, simili al comportamento delle onde sonore nei tubi.

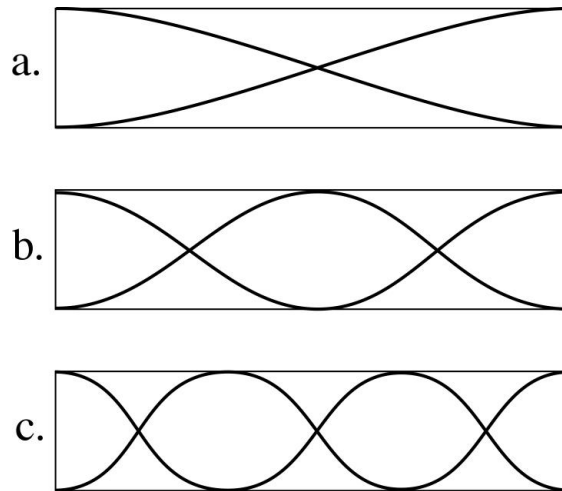


fig. 11: i modi assiali

Il primo modo di risonanza, evidenziato nella fig. 11a, si verifica nel caso della frequenza in cui la metà della lunghezza d'onda equivale alla distanza tra le due superfici, cioè:

$$f = \frac{344}{2L}$$

dove

$f$  = frequenza

$L$  = distanza tra le pareti

Il secondo modo (fig. 11b) quando la frequenza è il doppio di  $f$ , il terzo (fig. 11c) quando è il triplo di  $f$ , e così via.

I modi che riguardano le riflessioni tra due pareti contrapposte sono detti modi "assiali" (fig. 12a) per il fatto che le onde si riflettono in asse attraverso la stanza, i modi che riguardano quattro pareti sono detti "tangenziali" (fig. 12b), i modi che riguardano tutte le sei pareti sono detti "obliqui" (fig. 12c).

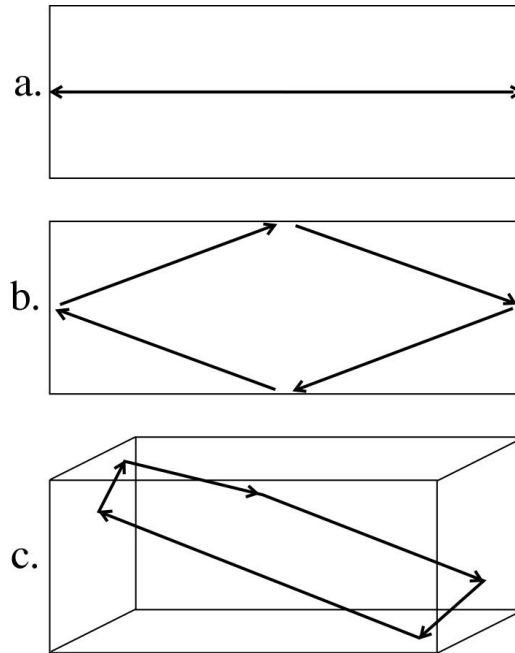


fig. 12: modi assiali, tangenziali e obliqui

Per ogni ambiente dotato di tre dimensioni (larghezza, profondità, altezza, ovvero  $L$ ,  $W$ ,  $H$ ) è possibile calcolare tutte le onde stazionarie, o “frequenze modali”, attraverso la formula:

$$F = \frac{c}{2} \sqrt{\frac{p^2}{L^2} + \frac{q^2}{W^2} + \frac{r^2}{H^2}}$$

dove

$c$  = velocità del suono

$L$ ,  $W$ ,  $H$  = dimensioni della stanza

$p$ ,  $q$ ,  $r$  = numeri interi

le costanti  $p$ ,  $q$ ,  $r$  definiscono l'ordine e il tipo di frequenze modali. Ad es. la terna 1,0,0 definisce il primo modo assiale sull'asse  $L$ , la terna 0,0,1 il primo modo assiale dell'asse  $H$ , la terna 2,1,0 il modo tangenziale dato dal secondo modo dell'asse  $L$  e dal primo modo dell'asse  $W$ , ecc.

Nella tabella 3 sono esemplificati i valori delle prime 30 frequenze modali di un ambiente dotato delle seguenti dimensioni:

$L = 12$  mt

$W = 5$  mt

$H = 8$  mt



modes	freq	L 12,00	W 5,00	H 8,00	axial	tangential	oblique
1	14,3	1	0	0	X		
2	21,5	0	0	1	X		
3	25,8	1	0	1		X	
4	28,7	2	0	0	X		
5	34,4	0	1	0	X		
6	35,8	2	0	1		X	
7	37,3	1	1	0		X	
8	40,6	0	1	1		X	
9	43,0	1	1	1			X
10	43,0	0	0	2	X		
11	43,0	3	0	0	X		
12	44,8	2	1	0		X	
13	45,3	1	0	2		X	
14	48,1	3	0	1		X	
15	49,7	2	1	1			X
16	51,7	2	0	2		X	
17	55,1	0	1	2		X	
18	55,1	3	1	0		X	
19	56,9	1	1	2			X
20	57,3	4	0	0	X		
21	59,1	3	1	1			X
22	60,8	3	0	2		X	
23	61,2	4	0	1		X	
24	62,1	2	1	2			X
25	64,5	0	0	3	X		
26	66,1	1	0	3		X	
27	66,9	4	1	0		X	

tab. 3: frequenze modali per dimensioni fisiche definite

## Le dimensioni ideali

Osservando l'ultima equazione è facile osservare come i problemi di risonanza nella zona modale si possano moltiplicare facilmente nel momento in cui due o più dimensioni siano in rapporto esatto tra di loro, ossia quando uno sia multiplo dell'altro. Questo ci porta a considerare quali potrebbero essere i rapporti ideali tra le tre dimensioni al fine di poter ottenere un campo acustico il più possibile diffuso. La tabella 4 ci mostra, a livello esemplificativo e non vincolante, tre possibili soluzioni derivate dal calcolo e dall'esperienza.

	H	W	L
A	1.00	1.14	1.39
B	1.00	1.28	1.54
C	1.00	1.60	2.33

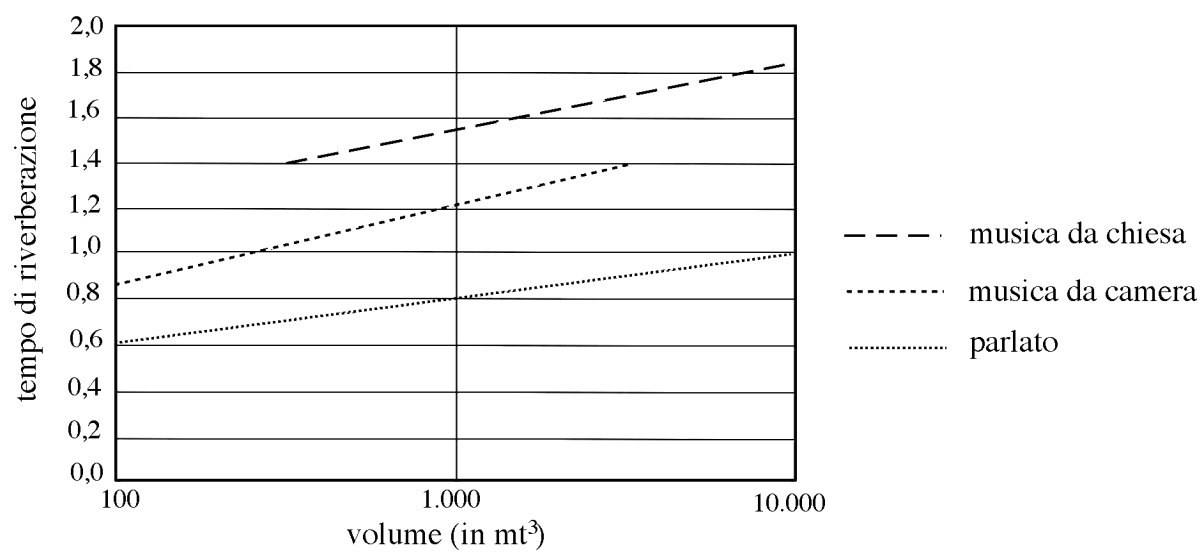
tab. 4: rapporti dimensionali ideali

## Tempi ideali di riverberazione

A conclusione di questa lezione, rimarchiamo che l'approccio alla comprensione dell'acustica nei piccoli ambienti è fondamentale per tutte le problematiche relative alla costruzione e all'utilizzo delle sale di registrazione, sia per la progettazione delle sale di ripresa che delle control room, nonché per la realizzazione ottimale di registrazioni live in ambienti a dimensione limitata. Anche l'installazione e la taratura di un sistema di amplificazione per tali sale dovrà tenere conto della fisica delle onde sonore e dei modi di risonanza.

Le sale di grandi dimensioni sono in ogni caso da preferirsi sia per l'ascolto naturale della musica eseguita che per la ripresa audio della stessa: le proporzioni ideali di una sala da concerto sono quelle a parallelepipedo dette anche "shoe box" ("scatola di scarpa"), e secondo alcune fonti un criterio pratico consiste nell'attribuire al valore di 100:1 il rapporto tra la cubatura della stanza (in  $mt^3$ ) e numero di esecutori, come dire che, ad esempio, una sala di  $5.000\text{ }mt^3$  è considerata adatta per la registrazione di 50 elementi d'orchestra.

Una domanda a cui è difficile dare risposta è quale sia il tempo di riverberazione ideale, soprattutto in funzione di una ripresa audio. Il più delle volte dipende dalle situazioni e soprattutto dal tipo di musica che si sta ascoltando, o registrando. Un canto gregoriano richiederà un tempo di riverbero sicuramente superiore rispetto ad una musica che abbia una stretta articolazione delle note. Esistono anche esempi nella musica contemporanea (ad es. le composizioni di Arvo Pärt) dove la scrittura musicale, soprattutto nella strutturazione delle pause, prevede, come dato di partenza, l'esecuzione in ambienti con lunghi tempi di riverberazione. Pur con questa premessa, esistono valori "ideali" di riverberazione, sintetizzati in fig. 13, che possono dare indicazioni di massima, non vincolanti, sulle scale di valori in gioco. Un altro aspetto da considerare è che il valore di 60 dB che si usa per calcolare il tempo di riverbero è un valore più che altro teorico, in quanto il rumore di fondo (background noise) presente in tutti gli ambienti che non siano sale di registrazione perfettamente isolate tende ad accorciare, nella percezione uditiva, il tempo di riverbero (un suono sembra smorzato prima di arrivare a -60 dB, in quanto "annega" nel rumore di fondo).



*fig. 13: tempi di riverbero ideali*

## Bibliografia

- D. Davis – C. Davis: *Sound System Engineering* – Focal Press  
F. Alton Everest: *Master Handbook of Acoustics* – Mc Graw Hill  
P. Newell: *Recording Studio Design* – Focal Press  
D. M. Howard – J. Angus: *Acoustics and Psychoacoustics* – Focal Press