L'acustica architettonica
Aspetti fisici

Parte I

Leonardo **Scopece**
Alberto **Ciprian***

Sommario
L'acustica architettonica è il campo di studio che si deve affrontare nel momento in cui c'è la necessità di realizzare un ambiente adatto a un particolare tipo di ascolto come, ad esempio, concerti e conferenze. Questo è il primo di tre articoli nei quali si cerca di offrire una panoramica il più completa possibile sul tema della progettazione acustica degli ambienti chiusi, che va necessariamente distinta da quella degli spazi aperti, nei quali i fenomeni fisici sono differenti. Nello specifico si vuole trattare l'aspetto fisico dell'acustica, ripercorrendo i più importanti principi da tenere in considerazione nel momento in cui si decide di realizzare un trattamento acustico di un ambiente. Molti ritengono che per ottenere un ascolto perfetto in una sala basti spendere molto per un sistema di altoparlanti, ma questo è proprio uno dei maggiori errori che si può commettere. Tutto ciò perché non si conoscono i principi fondamentali dell'acustica e non si tengono in considerazione tutti i fenomeni che si possono generare dall'interazione di un'onda sonora con l'ambiente e tra le onde stesse.
Ci si pone l'obiettivo di fornire, nel modo più chiaro e completo possibile, le basi per comprendere i fenomeni legati all'acustica fisica in modo da poter valutare al meglio che tipo di progettazione sonora si deve utilizzare per soddisfare alle proprie necessità.

1. Introduzione

Per definizione, l'acustica architettonica è quella disciplina che tratta della produzione, propagazione e ricezione del suono all'interno di ambienti chiusi. La progettazione acustica degli ambienti deve, quindi, tenere in considerazione una grande quantità di elementi come le caratteristiche fisiologiche dell'apparato uditivo umano, gli aspetti "naturali" delle onde, la modalità di propagazione nell'aria, gli aspetti "artificiali" come le varie tipologie di arredamento e strumentazione interna.

Questo è il primo di tre articoli dove si vogliono analizzare i vari aspetti atti a valutare quale può essere la progettazione di un ambiente per l'ascolto, partendo da considerazioni quali i parametri fisici e le tecniche per stimare i comportamenti delle onde sonore, fino all'analisi delle tipologie di materiale e delle diverse tipologie di componenti che contribuiscono alla correzione acustica della sala.

* L'articolo è parte delle attività realizzate per la tesi proposta per la laurea specialistica in ingegneria di Alberto Ciprian: "Analisi e studio della diffusione sonora multicanale in ambienti chiusi. Studio e realizzazione di una stanza per l'ascolto surround". Tesi di Laurea Politecnico di Torino, 2010, sviluppata presso Centro Ricerche della Rai. Tutor Rai: dott. Leonardo Scopece.

2. Parametri fisici

2.1 Propagazione dell'onda sonora

Ogni suono ha origine dalla vibrazione di un corpo elastico. Questa ha un andamento ondulatorio, descrivendo quindi nel tempo una traiettoria che si può rappresentare graficamente, nel modo più semplice, come una sinusoide. Esistono diverse componenti che caratterizzano un'onda, tra cui la più importante è la frequenza. Questo parametro fisico permette di definire un parametro sensoriale: l'***altezza del suono***, ossia se aumenta la frequenza un suono tende a diventare più acuto, mentre se diminuisce diventa più grave.

Un secondo parametro fisico è l'ampiezza dell'oscillazione, che permette di determinare un altro parametro sensoriale: l'***intensità del suono***.

Per capire come avviene la propagazione è necessario prima capire come è fatta a livello strutturale l'aria. É formata da una grande quantità di molecole "unite" tra loro da legami elastici; ad esempio, si può affermare che quando un corpo vibra comunica il suo movimento alla prima molecola d'aria "confinante", la quale, spostandosi, spinge la molecola successiva, e così via. Un attimo dopo, i legami elastici (che possono essere immaginati come molle), richiamano indietro la molecola nella sua posizione iniziale di equilibrio. Per effetto di questi movimenti ci saranno delle zone di compressione e rarefazione dell'aria. Queste si ripetono dalla sorgente nel verso di propagazione dell'onda sonora. Considerando una generica sorgente sonora, il suono tende a propagarsi allo stesso modo in tutte le direzioni (cioè secondo fronti d'onda sferici, figura 1). La superficie del fronte d'onda aumenta in modo proporzionale con il quadrato della distanza dalla sorgente.

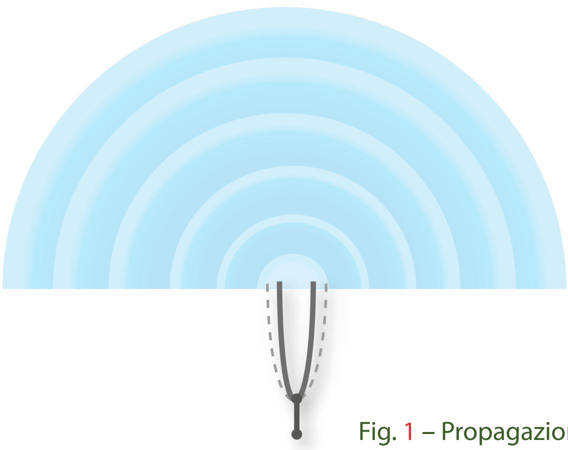


Fig. 1 – Propagazione.

Di conseguenza, l'energia che possiede il fronte d'onda si distribuisce su tutta la superficie, per cui su una singola unità di superficie si ha che l'energia decresce con il quadrato della distanza.

Siccome l'energia è proporzionale all'intensità sonora, si può affermare che l'intensità sonora decresce con il quadrato della distanza, quindi:

- raddoppiando la distanza, l'intensità sonora decresce di 6 dB
- decuplicando la distanza, l'intensità sonora decresce di 20 dB

É, inoltre, da sottolineare il fatto che il suono si propaga a una velocità che dipende principalmente dalla natura del mezzo elastico in cui si diffonde, ma anche dalla temperatura, dalla pressione e dall'umidità. Di seguito vengono riportati alcuni valori della velocità di propagazione in diversi materiali a 20°C e al livello del mare:

Materiale	*Velocità [m/s]*
Aria	343
Acqua	1480
Ghiaccio	3200
Vetro	5300
Piombo	1200

Un'altra grandezza fondamentale legata alla propagazione del suono è la lunghezza d'onda λ, cioè la distanza fra due punti consecutivi dell'onda che vibrano in concordanza di ampiezza e fase. La lunghezza d'onda si misura in metri ed è in funzione della frequenza e della velocità di propagazione secondo la seguente relazione:

$$\lambda = v / f$$

dove v è la velocità di propagazione e f è la frequenza.

Questa grandezza ha un ruolo importante soprattutto quando ha una misura paragonabile a quella delle dimensioni dell'ambiente di diffusione, in quanto determina il fenomeno delle onde stazionarie. La tabella seguente mostra alcuni valori di lunghezze d'onda in funzione della frequenza in aria libera:

Frequenza [Hz]	*Lunghezza d'onda [m]*
20	17
50	6.8
100	3.4
250	1.36
2000	0.17
5000	0.068
10000	0.034
20000	0.034

2.2 Le onde stazionarie

Le onde stazionarie sono particolari tipi di perturbazioni periodiche, le cui oscillazioni sono limitate nello spazio. L'ampiezza dell'oscillazione è nulla in alcuni punti, detti nodi, mentre è massima in altri, detti ventri; ogni ventre si trova a metà tra due nodi.

Immaginando una coppia di onde che si propaga in uno spazio delimitato da due superfici parallele riflettenti, si nota come l'onda stazionaria viene generata dalla somma delle due onde. A questo punto risulta necessario modificare l'equazione dell'onda, aggiungendo le condizioni al contorno che limitano il moto. Detto ***L*** lo spazio di propagazione, l'equazione dell'onda diventa:

$$\frac{\partial^2 \zeta(x,t)}{\partial^2 x} = \frac{1}{v^2} \cdot \frac{\partial^2 \zeta(x,t)}{\zeta \ t^2}$$

alla quale vanno aggiunte le seguenti condizioni: $\zeta(0,t) = A$ e $\zeta(L,t) = B$. Si ottiene quindi la soluzione generale della formula:

$$\zeta(x,t) = A\cos(kx) + B\sin(kx)$$

Le onde stazionarie si possono quindi considerare come il risultato dell'interferenza di onde progressive e regressive sinusoidali aventi la stessa frequenza.

2.3 Riflessione

La riflessione è uno dei fenomeni più comuni che si manifesta nel momento in cui un'onda sonora entra in contatto con una superficie. Quello che però può apparire meno ovvio è il fatto che la riflessione si genera soltanto nel caso in cui la dimensione della superficie riflettente dell'onda sonora sia sufficientemente grande rispetto alla lunghezza d'onda **λ**. Quindi, in base alla dimensione dell'ostacolo che incontra l'onda si possono avere diversi effetti:

- se la dimensione dell'ostacolo è minore di 1/3 di **λ** non c'è riflessione
- se la dimensione è comparabile con **λ** si ha una riflessione solo della metà dell'energia e si passa al fenomeno della diffrazione
- se la dimensione è maggiore del triplo di **λ** allora si ha riflessione totale

2.4 Diffrazione

É un fenomeno complementare alla riflessione che si definisce come la deviazione della traiettoria delle onde, quando queste incontrano un ostacolo fisico. In particolare, quando la lunghezza d'onda è grande e non ci sono riflessioni, o comunque sono molto poche, si può assumere che l'onda aggiri l'ostacolo. Similmente, quando la lunghezza d'onda è piccola, c'è una buona riflessione, tuttavia parte dell'energia è in grado di aggirare l'ostacolo. In questo caso si parla di ombra acustica (figura 2); se, invece, le dimensioni dell'ostacolo sono maggiori della lunghezza d'onda dell'onda incidente, si manifestano solo parziali fenomeni di ombra acustica.

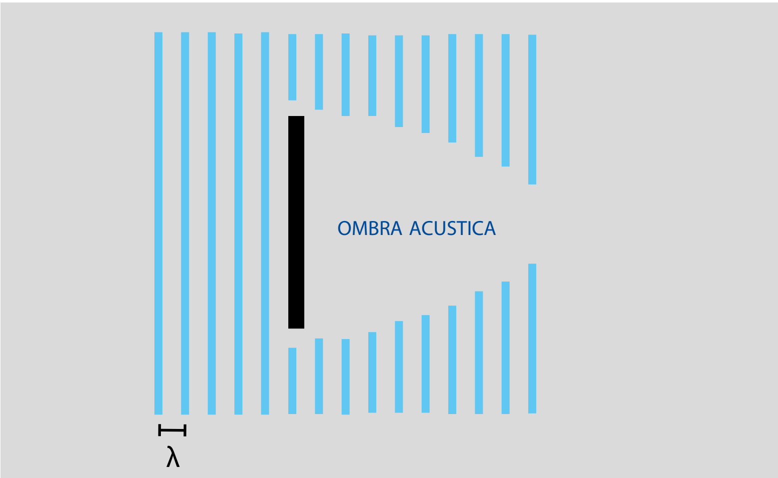


Fig. 2 - Ombra acustica.

Quando su una superficie è presente un'apertura di dimensioni maggiori di **λ**, l'onda passa attraverso generando un fascio stretto, mentre se **λ** è grande si produce un fascio diffuso (figura 3).

2.4.1 Principio di Huygen

Il principio di Huygen è un metodo di analisi applicato spesso per lo studio della propagazione delle onde luminose. Secondo Huygen: "*...ciascuna particella della materia in cui un'onda viaggia comunica il suo moto non solo alla particella vicina che è allineata con la sorgente luminosa, ma necessariamente anche alle altre con le quali è a contatto e che si oppongono al suo movimento. Cosicché intorno a ciascuna particella si origina un'onda di cui essa è il centro*". In sintesi il principio afferma che tutti i punti di un fronte ***F(t)*** possono essere considerati sorgenti puntiformi di onde sferiche secondarie aventi la stessa frequenza dell'onda principale.

Dopo un tempo ***Δt*** la nuova posizione del fronte ***F(t + Δt)*** sarà la superficie di inviluppo di queste onde secondarie. Il campo complessivo è dato dalla sovrapposizione dell'onda primaria con quelle di ordine superiore.

Pur essendo nato per studiare i fenomeni luminosi, questo principio, può essere esteso per la previsione di tutti i fenomeni ondulatori.

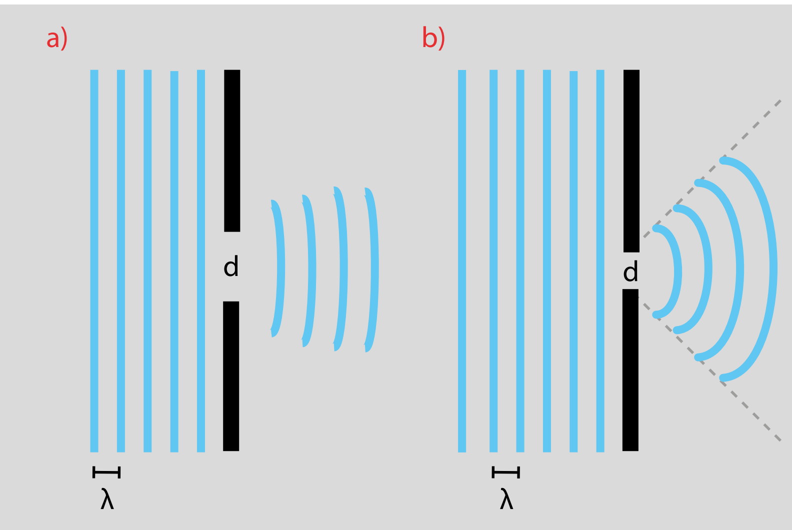


Fig. 3 - Diffrazione: a) λ < d, b) λ > d.

2.5 Rifrazione

La rifrazione è un fenomeno per il quale la curvatura del percorso delle onde sonore cambia quando passano da un mezzo elastico a un altro, in cui la velocità di propagazione è diversa. Un esempio si può avere quando con una temperatura calda e un clima umido i suoni distanti vengono percepiti con estrema chiarezza. Questo è giustificabile con una "inversione" di temperatura, ovvero il terreno si raffredda velocemente e gli strati d'aria diventano più caldi rispetto a quelli in prossimità del suolo. In altre parole, se la temperatura dell'aria è maggiore di quella della superficie, le onde si direzionano all'ingiù verso la superficie per effetto della rifrazione.

Questo fenomeno viene descritto tramite la legge di Snell, secondo cui il rapporto tra il seno dell'angolo generato da un raggio incidente su una superficie e quello generato dal raggio rifratto è uguale al rapporto inverso degli indici di rifrazione dei mezzi attraversati dai raggi:

$$\frac{\sin \alpha_{inc}}{\sin \alpha_{rifr}} = \frac{n_2}{n_1}$$

L'indice di rifrazione è definito come:

$$n = \frac{c}{v}$$

dove ***c*** è la velocità della luce e ***v*** è la velocità dell'onda attraverso un certo mezzo di propagazione. Perciò la relazione precedente può essere riscritta come:

$$\frac{\sin \alpha_{inc}}{\sin \alpha_{rifr}} = \frac{v_1}{v_2}$$

In realtà, nel caso di un'onda sonora, la rifrazione è rappresentata sempre dal rapporto dei seni uguale, però, al rapporto tra la velocità nel mezzo rifrangente e la velocità nel primo mezzo:

$$\frac{\sin \alpha_{inc}}{\sin \alpha_{rifr}} = \frac{v_2}{v_1}$$

Quindi, l'onda sonora non si avvicina alla normale al piano di incidenza nel mezzo, con indice di rifrazione n_2, ma si allontana per ritrovarsi parallela a prima del momento di incidenza quando si ripassa al mezzo con indice di rifrazione $n_1 > n_2$.

2.6 Risonanza in tubi e corde

La risonanza è un fenomeno fisico per il quale un corpo elastico inizia a vibrare a una certa frequenza propria dopo essere stato eccitato con una certa energia. Per analizzare meglio il fenomeno è utile valutare il comportamento di un'onda all'interno di un tubo, in tre condizioni differenti, e di una corda.

2.6.1 Tubi

- ***pareti chiuse***: questo caso è equivalente allo studio del comportamento delle onde stazionarie (figura 4).

  A seguito di un'opportuna eccitazione, il tubo risuona alla frequenza propria per una lunghezza di ***λ/2*** e per frequenze superiori. L'ampiezza ***p*** che si crea dalla sovrapposizione delle onde è data dalla relazione:

  $$p = p_{\max}\left(\cos 2\pi \frac{x}{\lambda}\right)(\cos 2\pi f t)$$

  Da notare è la presenza di tre zone nodali[Nota 1] in prossimità delle pareti e al centro.

- ***una parete chiusa***: in questo caso è possibile verificare un fenomeno meno ovvio di quanto si possa pensare, ovvero: dalla parte aperta del tubo è possibile notare una riflessione parziale dell'onda sonora. Questo fatto è spiegabile poiché la velocità del suono in un grande volume d'aria è leggermente differente rispetto al caso in cui l'area è limitata a causa dell'effetto di attrito delle pareti, così le onde all'interno del tubo trovano condizioni di trasmissione differenti sull'apertura a causa della variazione d'impedenza nel mezzo. La riflessione non è mai completa, ma viene riflessa soltanto una parte dell'energia, a seconda delle dimensioni del tubo. Tuttavia, in alcuni casi può essere sufficiente per dare origine al fenomeno delle onde stazionarie. In figura 5 è possibile vedere la rappresentazione del tubo aperto da un lato. Nel modo di vibrazione più semplice la lunghezza del tubo si approssima a ***λ/4***. Si "approssima" in quanto la lunghezza acustica del tubo non corrisponde esattamente alla lunghezza fisica.

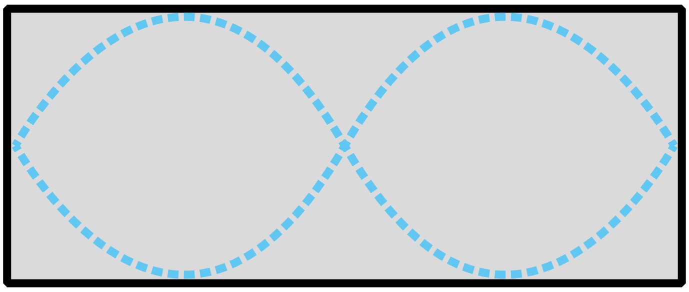


Fig. 4 - Tubo con pareti chiuse.

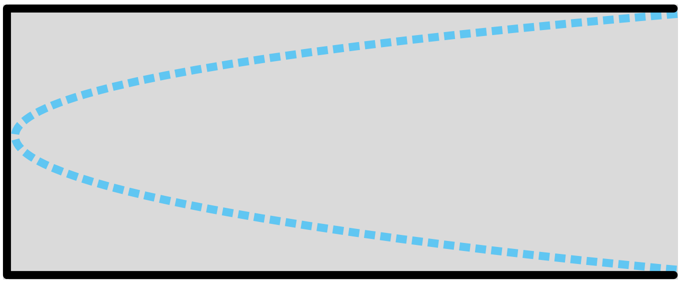


Fig. 5 - Tubo con lato aperto.

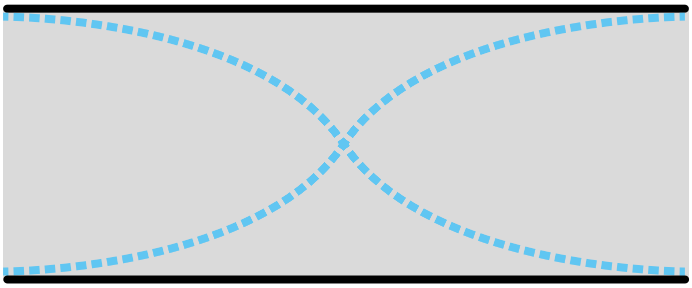


Fig. 6 - tubo con pareti aperte.

La lunghezza acustica è data dalla somma ***l+a***, dove "***l***" è la lunghezza fisica del tubo, mentre "***a***" corrisponde a un parametro di correzione[Nota 2]. Da questo si deduce come la minima frequenza di risonanza sia:

$$f_{ris} = \frac{nv}{4(l+a)}$$

dove ***n*** corrisponde al numero dell'armonica (***n***=1,2,3,...) diverso da 0.

Per quanto riguarda la pressione, è da notare che è nulla in prossimità del lato aperto del tubo, mentre è massima in prossimità del lato chiuso.

Nota 1 - punti in cui l'onda diretta e quella riflessa si intersecano e l'ampiezza è pari a 0.
Nota 2 - normalmente equivale a 0,6 • r, dove r è il raggio.

- ***pareti aperte***: in questo caso (figura 6), il valore ***l*** corrisponde a metà della lunghezza d'onda (***λ/2***). Siccome le pareti laterali sono aperte entrambe, è necessario apportare una doppia correzione, quindi la lunghezza acustica vale ***l+2a***.

  É da notare, inoltre, che in questo caso, a differenza del primo con le pareti chiuse, in prossimità delle pareti ci siano due ventri[Nota 3].

  La frequenza di risonanza viene quindi descritta dalla seguente relazione:

$$f_{ris} = \frac{nv}{2(l+2a)}$$

  Bisogna infine notare che in tutti e tre i casi, l'onda sonora trova nel tubo, chiuso e aperto, un amplificatore naturale. Il tubo può amplificare fino a 10÷12 dB il segnale eccitatore.

2.6.2 Vibrazioni nelle corde

Per valutare le vibrazioni prodotte nelle corde si assume che la loro lunghezza sia maggiore del loro spessore e che siano flessibili. La velocità di un'onda trasversale corrisponde a:

$$v = \left(\frac{T}{m}\right)^{\frac{1}{2}}$$

dove ***T*** è la tensione della corda, mentre ***m*** è la massa per unità di lunghezza. Analogamente a quanto descritto per i tubi, si considera il modo semplice di vibrazione come quello del caso in cui alle estremità ci siano due ventri (ad esempio nel tubo aperto ad entrambe le estremità), cioè ***λ = 2l***. Di conseguenza, la minima frequenza di vibrazione è:

$$\frac{1}{2l}\left(\frac{T}{m}\right)^{\frac{1}{2}}$$

Le armoniche prodotte in una corda vibrante dipendono dalla natura e dalla modalità dell'eccitazione. Le onde longitudinali, invece, hanno una velocità che corrisponde a:

$$v = \left(\frac{y}{\rho}\right)^{\frac{1}{2}}$$

dove ***y*** è il modulo di Young[Nota 4], mentre ***ρ*** è la densità. Considerando ad esempio l'acciaio (***y*** = 2 • 1011 N/m² e ***ρ*** = 8 • 103 kg), si ha che ***v*** = 500 m/s.

L'espressione per la minima frequenza per le onde longitudinali è:

$$\frac{1}{2l}\left(\frac{y}{\rho}\right)^{\frac{1}{2}}$$

Sostituendo dei valori rilevanti, si è evidenziato come la frequenza per le vibrazioni longitudinali sia maggiore rispetto a quella per le vibrazioni trasversali.

2.7 Riverbero

Ogni volta che un'onda sonora colpisce una superficie all'interno di un ambiente ha origine, come detto, una riflessione, che a sua volta darà origine ad altre, e così via. Siccome la velocità di propagazione del suono è elevata (≈340 m/s), in pochi centesimi di secondo dall'uscita del suono dalla sorgente la stanza è immersa in riflessioni che si aggiungono e modificano il suono diretto. La somma delle riflessioni viene detto riverbero, e, quindi, il campo sonoro costituito dall'insieme delle onde (ognuna caratterizzata da un certo ritardo temporale e da un certo livello di attenuazione) viene detto campo di riverberazione.

2.7.1 Tempo di riverberazione

Uno dei parametri più importanti per valutare la qualità acustica di un ambiente è il *tempo di riverberazione* o *tempo di Sabine*, indicato comunemente con la sigla T_{60}, che indica il tempo necessario affinché la densità media dell'energia sonora diminuisca di 60 dB. Generalmente per ambienti poco riverberanti il valore del T_{60} è minore di un secondo, mentre per ambienti molto riverberanti è maggiore di due secondi.

Nota 3 - punti in cui l'ampiezza generata tra la prima e la seconda onda è massima.
Nota 4 - è dato dal rapporto tra la forza applicata σ e l'allungamento relativo ε.

Il calcolo del T_{60} può essere effettuato tramite due equazioni:

- ***equazione di Sabine:*** fornisce risultati accurati nel caso in cui il valore medio dei coefficienti di assorbimento dei materiali considerati sia inferiore a 0.2. Trascurando gli effetti di assorbimento dell'aria sopra i 4 kHz si ottiene la seguente relazione:

$$T_{60} = \frac{1}{6} \frac{V}{\sum S_n \alpha_n}$$

  dove V è il volume della stanza espresso in m^3, S_n è la superficie n-esima dell'n-esimo materiale che costituisce le pareti della stanza espressa in m^2 e α_n è il coefficiente di assorbimento dell'n-esimo materiale corrispondente.

- ***equazione di Eyring***: viene utilizzata quando il valore medio dei coefficienti di assorbimento è maggiore di 0,2 e per frequenze inferiori a 4 kHz. Al denominatore viene aggiunto un termine per considerare l'assorbimento dell'aria alle alte frequenze:

$$T_{60} = -\frac{1}{6} \frac{V}{S \cdot \ln(1-\overline{\alpha})}$$

  Dove S è la superficie totale della stanza, mentre $\overline{\alpha}$ è il coefficiente di assorbimento medio dei materiali presenti nella stanza.

2.7.2 Tempo di riverberazione ottimale

Nello studio della progettazione acustica di una sala è necessario tenere conto non solo dell'architettura della sala ma anche del suo volume, dell'arredamento dell'ambiente e dell'assorbimento complessivo, con e senza le persone all'interno.

É chiaro che la progettazione dipende espressamente dal fine di utilizzo della sala e, quindi, anche il tempo di riverberazione dovrà essere differente in base all'obiettivo. Risulta quindi necessario considerare il concetto di tempo di riverberazione ottimale, che caratterizza i vari ambienti.

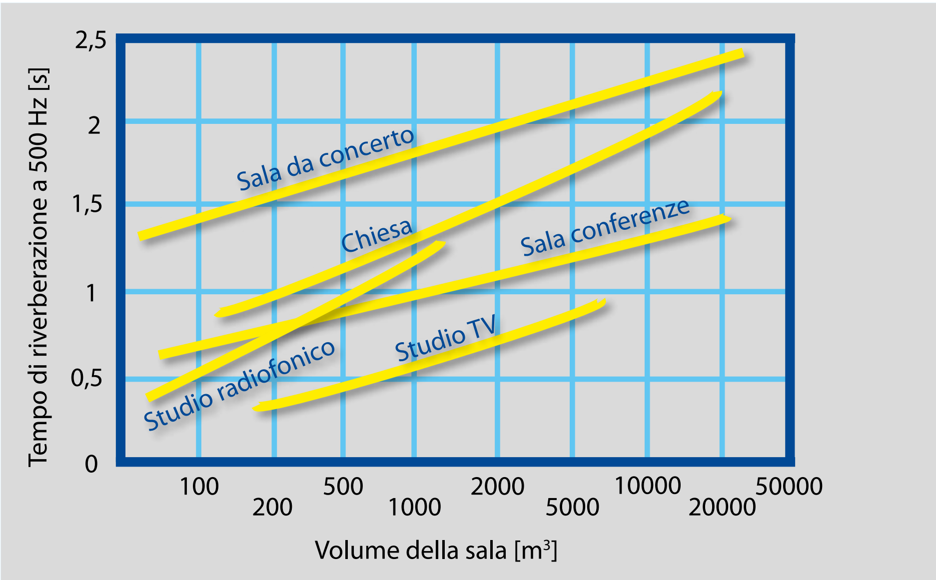
In figura 7 è riportato un grafico che evidenzia alcuni tempi di riverberazione tipici in funzione del volume.

Il colore del suono tende a essere brillante se la riverberazione agisce sulle frequenze alte, mentre apparirà cupo se vengono esaltate le basse frequenze. Quindi si può affermare che per un buon ascolto il tempo di riverbero alle basse frequenze deve essere più alto: $T_{60}(bf) > T_{60}(af)$.

2.7.3 Distanza di riverberazione

La distanza di riverberazione è definita come la distanza dalla sorgente per cui il campo possa essere considerato "diffuso". Si considera un ambiente riverberante con una sorgente S e un ascoltatore A. Il livello di pressione L_t percepito dall'ascoltatore è dato dalla somma di due pressioni: la radiazione diretta L_d , che rappresenta il livello di pressione sonora SPL (*Sound Pressure Level*) che arriva direttamente all'ascoltatore, e la radiazione riflessa L_r, che rappresenta il livello di pressione sonora dovuta alle riflessioni.

Fig. 7 - Tempi di riverberazione tipici di alcuni ambienti.



Per cui:

$$L_t = L_d + L_r$$

La distanza di riverberazione può essere calcolata mediante la relazione:

$$r_r = 0.25\left(\alpha \frac{S}{\pi}\right) \approx 0.06\sqrt{\frac{V}{T_{60}}}$$

2.7.4 Esempio: effetto del riverbero sul parlato

Per spiegare l'effetto della riverberazione, si può considerare un esempio in cui l'influenza del riverbero è evidente: si considera una parola di due sillabe, come ad esempio "casa". Si suppone che la sillaba "...sa" si trovi a 25 dB sotto il livello di picco della prima sillaba e che raggiunga il proprio picco 0,32 s dopo la prima. Entrambi i suoni sono transitori che crescono e decadono velocemente. In figura 8 viene raffigurato lo schema dei fattori: la sillaba "ca..." raggiunge il picco a un livello fissato arbitrariamente a 0 dB all'istante t = 0, successivamente decade a seconda del tempo di riverberazione della stanza (come ipotesi si considera che sia di 0,5 s). La seconda sillaba raggiunge il picco, come detto, 0,32 s dopo e decade sempre in 0,5 s. In questa situazione la sillaba "...sa" non viene mascherata dalla prima. Se invece il tempo di riverberazione della stanza fosse maggiore di 0,5 s, ad esempio 1,5 s (raffigurato con le linee tratteggiate), la seconda sillaba sarebbe completamente mascherata.

L'effetto principale di un'eccessiva riverberazione è quindi quello di compromettere l'intelligibilità del parlato (cosa molto comune in ambienti come chiese e palestre), mascherando i suoni consonantici di livello inferiore.

Da questo esempio si può quindi concludere come in ambienti come parlatori, o comunque adibiti per l'ascolto del parlato, il tempo di riverberazione deve essere inferiore rispetto ad ambienti come sale da concerto.

2.8 Criteri Energetici

La fisiologia dell'apparato uditivo umano non permette di distinguere i suoni molto ravvicinati nel tempo (50 ms nel caso del parlato e 80 ms nel caso della musica) e le riflessioni vengono spesso interpretate come parte del suono diretto. L'energia che arriva prima di 50 ms si chiama energia utile, perché i contributi delle riflessioni si sommano al suono diretto, mentre l'energia che arriva dopo si chiama

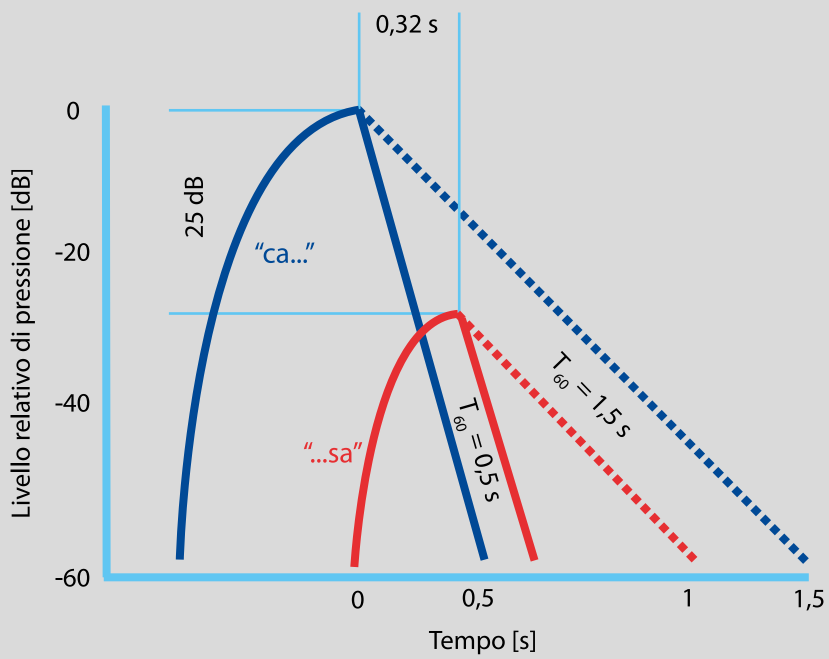


Fig. 8 - Effetto della riverberazione sul parlato.

energia dannosa, perché rischia di danneggiare la percezione sonora.

Per valutare il contributo energetico, la norma ISO 3382Nota 5 considera tre indici: *definizione*, *chiarezza* e *speech transmission*.

- ***Definizione***Nota 6: misura la chiarezza con la quale l'ascoltatore percepisce il messaggio parlato. È definito come il rapporto tra l'energia utile e l'energia totale.

$$D_{50} = \frac{\int_{0ms}^{50ms} p^2(t)dt}{\int_{0ms}^{\infty} p^2(t)dt}$$

  dove $t = 0$ è l'istante in cui giunge l'impulso diretto. I valori ottimali sono compresi tra 0,3 e 0,7.

- ***Chiarezza***Nota 7: misura la possibilità di percepire nitidamente note musicali suonate in rapida successione. È il rapporto tra l'energia sonora ricevuta nei primi 80 ms del suono diretto e quella che giunge successivamente, espresso in dB.

$$C_{80} = \frac{\int_{0ms}^{80ms} p^2(t)dt}{\int_{80ms}^{\infty} p^2(t)dt}$$

  I valori ottimali sono compresi tra -2 dB e +2 dB.

- ***STI***: è un parametro per valutare l'intelligibilità del parlato. È definito come un rapporto di energie.

$$STI = \frac{\int_{10ms}^{100ms} p^2(t)dt}{\int_{0ms}^{10ms} p^2(t)dt}$$

Nota 5 - stabilisce le procedure da seguire per la determinazione del tempo di riverbero negli auditori.
Nota 6 - *Early Energy Fraction*.
Nota 7 - *Early to late Sound Index*.

2.9 Eco

L'eco è un fenomeno fisico prodotto dalla riflessione delle onde sonore contro un ostacolo, causata dalla discontinuità del mezzo di propagazione. Le onde riflesse tornano all'emettitore con una certa intensità e un certo ritardo in modo da poter essere percepite separatamente da quella diretta.

Spesso si tende a confondere erroneamente l'eco con il riverbero. I due fenomeni si differenziano, infatti, per due parametri: il ritardo con cui l'onda riflessa torna all'emettitore e la distanza tra la sorgente e l'ostacolo. Affinché si parli di eco, il ritardo non deve essere inferiore a 1/10 di secondo, mentre la distanza minima deve essere pari a 17 m. Il valore di quest'ultimo parametro non è casuale: se infatti si considera che la velocità del suono in aria a 20°C è ≈340 m/s e che il ritardo è 1/10 di secondo, allora risulta che, in aria, il percorso totale è 34 m, cioè 17 m dalla sorgente all'ostacolo e 17 m per il percorso inverso.

3. Elementi di progettazione acustica degli ambienti chiusi

La progettazione acustica di un ambiente rappresenta un problema complesso da analizzare a causa della grande quantità di fattori che influiscono, e tutto ciò risulta amplificato nel caso in cui si considerino ambienti chiusi. Restringendo l'attenzione, per il momento, soltanto agli aspetti fisici, esistono modelli di calcolo che permettono di fare previsioni quantitative utili nell'ambito dell'acustica tecnica. Spesso, per un ambiente chiuso si distingue il problema della descrizione a bassa frequenza da quello ad alta frequenza, ovvero è possibile definire l'ambiente di dimensioni piccole o grandi a seconda della frequenza d'interesse. Come parametro di misura si considera la lunghezza d'onda e in particolare il rapporto tra le dimensioni lineari del locale e la lunghezza d'onda. Ad esempio, una dimensione media dieci volte più grande della lunghezza d'onda definisce un ambiente di grandi dimensioni.

Se si considera la gamma di frequenze dell'udito umano, la lunghezza d'onda in aria a 20 Hz è pari a 17 m, mentre a 20 kHz è 1,7 cm.

3.1 Descrizione modale

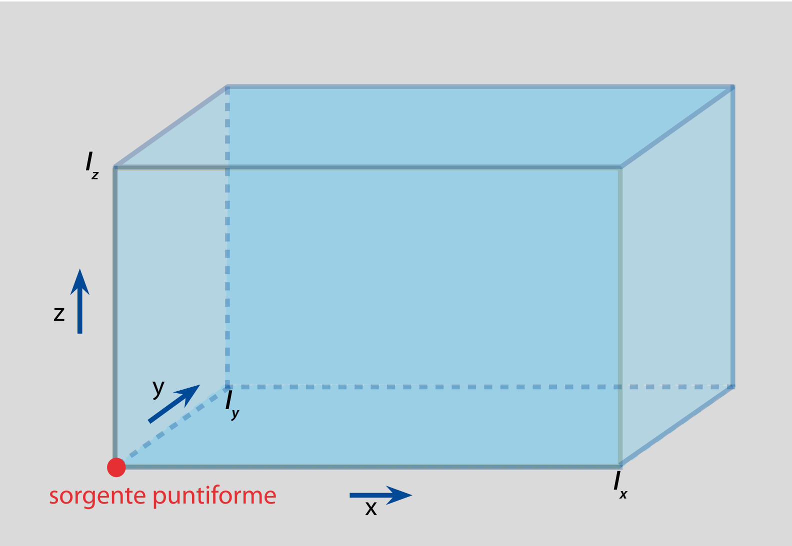
La teoria modale permette di dare una descrizione del suono negli spazi chiusi molto accurata, in quanto è in grado di rappresentare in modo preciso gli aspetti della fenomenologia ondulatoria che spesso non vengono considerati da altri modelli.

Per chiarire il concetto è opportuno considerare la seguente situazione. Si consideri un ambiente parallelepipedo (figura 9), in cui gli spigoli, orientati lungo i tre assi, sono di lunghezza l_x, l_y e l_z.

All'origine del sistema di assi cartesiani viene collocata una sorgente puntiforme, che pulsa secondo la legge armonica semplice alla frequenza angolare ω con ampiezza P_0. Inoltre, si considerano le superfici interne come uniformi e poco assorbenti.

La soluzione dell'equazione delle onde, con il termine dovuto alla sorgente, nota come equazione di Helmotz non omogenea, fornisce il valore della pressione sonora ***p(x,y,z)*** come somma di una serie di funzioni complesse $p_n(x, y, z)$. Ciascuna funzione

Fig. 9 - Stanza parallelepipeda con sorgente puntiforme.



$p_n(x, y, z)$ rappresenta un modo naturale dell'ambiente:

$$p(x,y,z) = \sum_n p_n(x,y,z)$$

dove l'ampiezza del generico modo n è data dall'espressione:

$$\left|p_n(x,y,z)\right| = \frac{\rho_0 v^2 \omega P_0}{V \cdot \sqrt{4\omega_n^2 k_n^2 + \left(\omega^2 - \omega_n^2\right)^2}} \psi_n(x,y,z)$$

dove:

- ρ_0 è la densità dell'aria nell'ambiente espressa in kg/m^3;
- ω è la frequenza angolare della sorgente;
- ω_n è la frequenza angolare naturale del modo ***n***;
- ***V*** è il volume dell'ambiente;
- k_n è la costante di smorzamento del modo ***n***;
- ψ_n (x, y, z) è la forma modale per il modo ***n***, che esprime la dipendenza

dell'ampiezza del modo ***n*** dalle coordinate spaziali:

$$\psi_n(x,y,z) = \cos\left(\frac{n_x \pi x}{l_x}\right) \cdot \cos\left(\frac{n_y \pi y}{l_y}\right) \cdot \cos\left(\frac{n_z \pi z}{l_z}\right)$$

con n_x, n_y, n_z = 0,1,2,3,...;

La precedente relazione evidenzia come ogni modo sia individuato da una terna di numeri interi, detti numeri modali, ognuno dei quali può assumere qualsiasi valore a partire da 0.

La dipendenza spaziale di ciascun modo corrisponde a un campo stazionario tridimensionale dovuto a coppie di onde piane di uguale ampiezza e frequenza, che viaggiano in verso contrario lungo traiettorie rettilinee individuate dai rapporti n_x/l_x, n_y/l_y, n_z/l_z.

I modi si distinguono in tre categorie:

- ***modi assiali***: le onde componenti viaggiano lungo una direzione parallela ad un asse coordinato e interagiscono con la coppia di superfici contrapposte e ortogonali all'asse considerato. Questi modi sono contraddistinti da un solo numero modale non nullo, quindi la terna si presenta come (n_x, 0, 0), (0, n_y, 0) o (0, 0, n_z). Siccome dipendono da una sola coordinata si definiscono anche *modi monodimensionali*.

- ***modi tangenziali***: le onde componenti viaggiano lungo direzioni appartenenti a piani paralleli ai piani coordinati e interagiscono con due coppie di superfici contrapposte ortogonali al piano contenente le direzioni di propagazione. In questo caso la terna è caratterizzata da un solo numero nullo, quindi si presenta come (n_x, n_y **0**), (n_x**, 0,** n_z) o (**0,** n_y n_z). Si definiscono anche *modi bidimensionali*.
- ***modi obliqui***: le onde componenti si propagano secondo direzioni oblique rispetto agli assi coordinati e interagiscono con tutte le coppie di superfici contrapposte del parallelepipedo. I numeri modali sono tutti diversi da 0, quindi, i modi (n_x, n_y n_z) sono detti *modi tridimensionali*.

Da ciò si può affermare che:

- negli otto vertici del parallelepipedo tutti i modi contribuiscono alla pressione sonora.
- al centro dell'ambiente sono nulli tutti i modi per i quali almeno uno dei tre numeri modali è dispari. Quindi solo 1/8 dei modi disponibili contribuisce alla pressione sonora in quel punto.
- al centro di ciascuna faccia del parallelepipedo manca il contributo dei modi con due numeri modali dispari. Questo comporta che solo 1/4 dei modi possibili può contribuire alla pressione sonora nei punti considerati.
- al centro di ogni spigolo del parallelepipedo manca il contributo dei modi con un numero modale dispari. Quindi solo la metà dei modi possibili può contribuire alla pressione sonora in questi punti.

Le frequenze di risonanza dei modi sono date dalla relazione:

$$f_n = \frac{\omega_n}{2\pi} = \frac{c}{2}\sqrt{\left(\frac{n_x}{l_x}\right) + \left(\frac{n_y}{l_y}\right) + \left(\frac{n_z}{l_z}\right)}$$

Per quanto detto, un ambiente parallelepipedo può

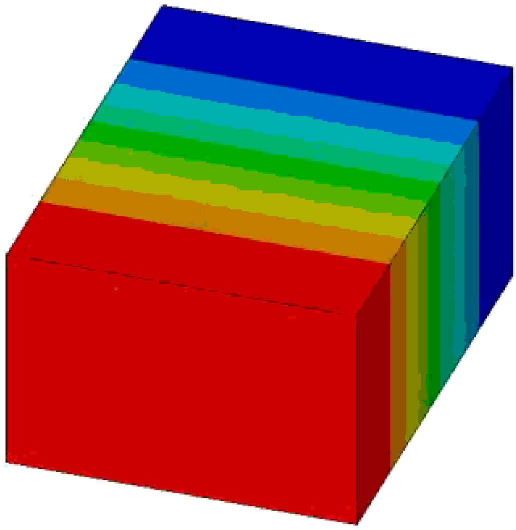


Fig. 10 - Modo assiale.

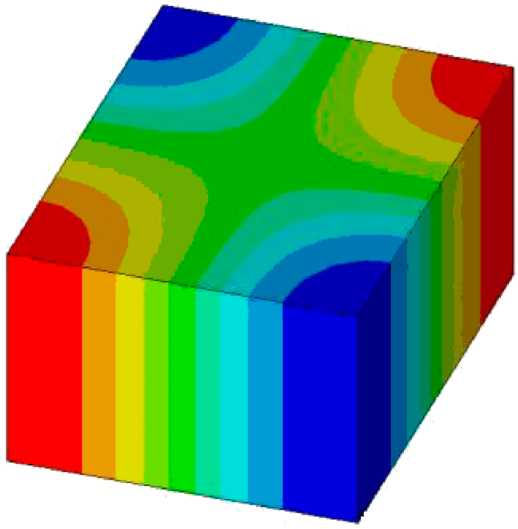


Fig. 11 - Modi tangenziali.

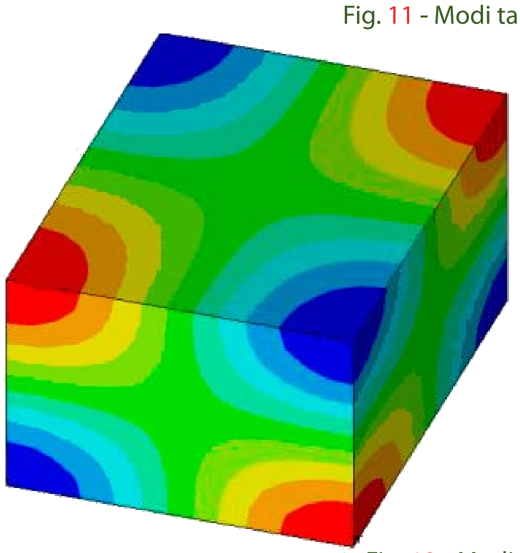


Fig. 12 - Modi obliqui.

Le figure 10, 11 e 12 sono tratte da *M. Fringuellino*, "Acustica dei piccoli ambienti" (seminario al Politecnico del 2009) essere considerato come un sistema multirisonante. Rimane infine da capire come poter determinare quanti modi possono essere eccitati in risonanza facendo variare la frequenza tra 0 e ***f*** e chiarire il concetto di densità modale.

Il numero di modi può essere calcolato tramite la seguente relazione:

$$N = \frac{4\pi f^3 V}{3c^3} + \frac{\pi f^2 S}{4c^2} + \frac{f + L}{8c}$$

dove ***V*** è il volume dell'ambiente, ***S*** è l'area totale delle superfici, mentre ***L*** è la somma delle lunghezze degli spigoli del parallelepipedo. In realtà, per ambienti relativamente grandi gli ultimi due addendi possono essere trascurati, quindi la formula precedente si approssima come:

$$N \cong \frac{4\pi f^3 V}{3c^3}$$

La densità modale rappresenta il numero di frequenze di risonanza all'interno di una banda unitaria intorno alla frequenza ***f*** e può essere calcolata considerando la derivata della formula precedente rispetto alla frequenza:

$$n(f) = \frac{dN}{df} = \frac{4\pi f^2 V}{c^3}$$

Dato un certo volume ***V***, la densità modale cresce con il quadrato della frequenza. Questo comporta che alle basse frequenze pochi modi contribuiscono in modo efficace alla pressione sonora nell'ambiente, per cui il livello di pressione sonora in regime permanente sinusoidale fluttua spostandosi da punto a punto nell'ambiente. Alle alte frequenze, invece, corrisponde un'elevata densità di modi e le fluttuazioni di livello si riducono muovendosi all'interno dell'ambiente.

Bibliografia

- *L. Scopece*: "L'audio per la televisione", Roma, Gremese, 2009.
- *Everest F. Alton:* "Manuale di acustica", Milano, Hoepli, 1996.
- *R. Spagnolo*: "Manuale di acustica applicata", Milano, Città degli studi, 2008.