



INFORMATICA MUSICALE

UNIVERSITA' DEGLI STUDI DI CATANIA
DIPARTIMENTO DI MATEMATICA E INFORMATICA
LAUREA TRIENNALE IN INFORMATICA
A.A. 2020/21
Prof. Filippo L.M. Milotta

ID PROGETTO: 0E




TITOLO PROGETTO: Il risuonatore di Helmholtz

AUTORE: Corsaro Miriana

Indice

| | |
|---|----------|
| 1. Obiettivi del progetto | 2 |
| 1.1 Caratteristiche principali della risonanza acustica | 2 |
| 1.2 Il risuonatore di Helmholtz | 3 |
| 1.3 Acustica architettonica | 5 |
| 1.4 Realizzazione dei subwoofer | 6 |
| 2. Riferimenti Bibliografici | 7 |
| 3. Argomenti Teorici Trattati | 8 |
| 3.1 Proprietà fisiche delle onde e analisi di Fourier | 8 |
| 3.2 Risonanza acustica dei materiali..... | 10 |
| 3.3 Riflessione e riverbero..... | 11 |

1. Obiettivi del progetto

-  Comprendere le caratteristiche principali della risonanza acustica.
-  Descrivere il funzionamento del risuonatore di Helmholtz.
-  Cenni sull'acustica architettonica e sulla realizzazione dei subwoofer tramite il sistema bass reflex.

1.1 Caratteristiche principali della risonanza acustica

La risonanza acustica è il fenomeno di amplificazione delle onde sonore che caratterizza i risuonatori e il principio su cui si basa il funzionamento di quasi tutti gli strumenti musicali.

Essa è indotta da uno stimolo esterno, trasmesso al risuonatore attraverso vincoli meccanici oppure attraverso l'aria, e si verifica nei risuonatori in corrispondenza della propagazione delle onde sonore, quando la frequenza delle onde è uguale alla frequenza di risonanza di un oggetto, che per effetto comincia a vibrare sempre di più. Più la frequenza dello stimolo esterno è simile alla frequenza di risonanza naturale del risuonatore, più l'effetto è rilevabile.

Ogni sistema fisico ha infatti delle proprie **frequenze di oscillazione** e rispetto ad esse può entrare in risonanza con una sorgente esterna, oppure no. Un risuonatore assorbe quindi l'onda che gli arriva, in un modo che dipende dalle frequenze caratteristiche. Questa energia non viene esaurita ma si accumula, ad ogni impulso che giunge, così l'intensità sonora aumenta sempre di più.

Le frequenze caratteristiche di un risuonatore, che regolano poi il fenomeno della risonanza acustica, dipendono primariamente dal tipo e dalla conformazione del risuonatore stesso, quindi da massa, rigidità ed elasticità.

Per comprendere appieno gli effetti della risonanza, possiamo avvalerci di un esempio pratico, considerando due diapason posti a pochi centimetri di distanza l'uno dall'altro.

Il diapason è uno strumento acustico che genera una nota standard per accordare gli strumenti musicali e si presenta come una sorta di forcella di acciaio: quando si percuote, produce un suono puro, privo di frequenze armoniche.

Nell'esperimento, si colpisce il primo diapason con una barretta metallica per farlo vibrare e si osserva che le onde sonore si propagano in tutte le direzioni e investono l'altro diapason, a poca distanza. Si verifica che anche il secondo diapason comincia a vibrare, pur non avendo ricevuto un colpo diretto, perché le onde sonore si propagano con una frequenza uguale a quella di risonanza. Le onde generate dalla risonanza del secondo diapason si sommano con quelle del primo diapason, formando un'onda sonora con maggiore ampiezza (più forte).

Pertanto, considerando il sistema nella sua interezza, si è ottenuto, grazie alla risonanza acustica, un suono amplificato.



Molti **strumenti musicali** sfruttano il fenomeno della risonanza per rinforzare i suoni: il flauto e l'organo funzionano come risuonatori, ma anche le casse armoniche degli strumenti a corda, come la chitarra, sono casse di risonanza. Negli strumenti a fiato le vibrazioni della colonna d'aria presente nel tubo dello strumento entrano in risonanza con le vibrazioni prodotte dall'aria che entra dal bocchino, mentre nel caso della chitarra la cassa armonica entra in risonanza con le vibrazioni della corda della chitarra e amplifica determinate frequenze. Lo stesso accade per la cassa del pianoforte.

In generale, quindi, gli strumenti musicali sono basati sul fenomeno della risonanza e sono infatti costituiti da tre elementi:

- Una *sorgente sonora*, caratterizzata da un elemento vibrante (corde di un violino, labbra di un trombettista);
- Un *risuonatore acustico*, che amplifica il suono emesso della sorgente, vibrando con le sue stesse caratteristiche (cassa di risonanza di un violino, caneggio di una tromba);
- *Adattatori di impedenza acustica* (non sempre presenti): servono per la trasmissione dell'energia vibrante tra la sorgente sonora e il risuonatore, tra le diverse parti dello strumento, e anche tra lo strumento e l'ambiente circostante (ponticello e anima del violino, campana di una tromba).

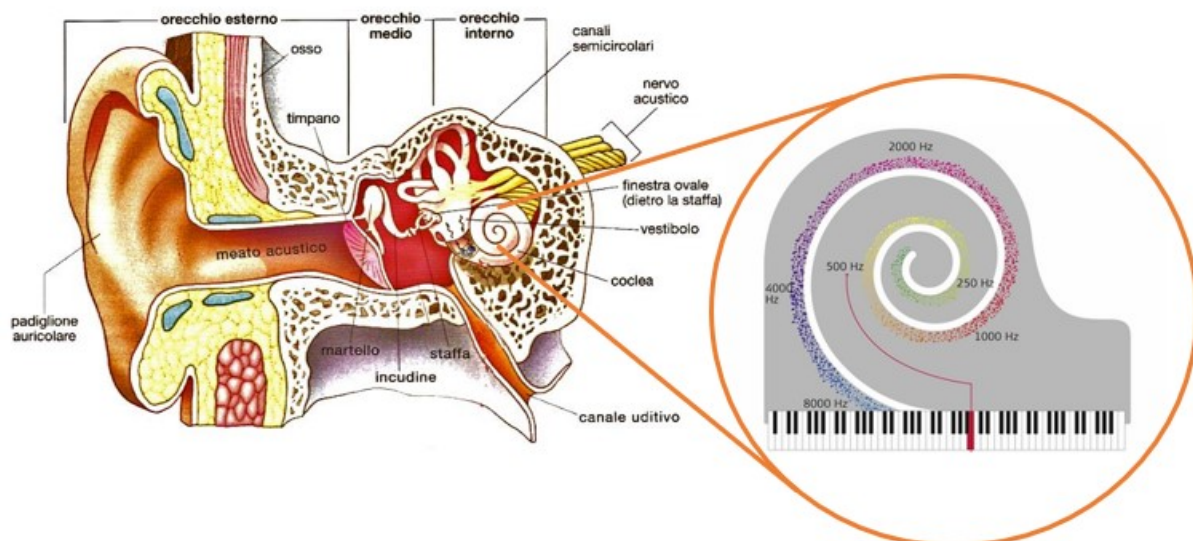
1.2 Il risuonatore di Helmholtz

I risuonatori di Helmholtz sono delle particolari cavità risonanti acustiche create da Hermann von Helmholtz nel 1860 per lo studio del suono e della sua percezione. Essi sono costituiti come dei recipienti di metallo (in genere sferici o cilindrici) di varie dimensioni, con una stretta apertura preceduta da un breve e stretto collo, all'interno delle quali cavità si verifica il fenomeno di risonanza dell'aria.

Immettendo dell'aria al suo interno, si generano delle onde stazionarie in risonanza con la frequenza propria della cavità, che, quindi, si comporta come un amplificatore selettivo del suono in un ristretto intervallo di frequenze.



Helmholtz per primo utilizzo i risuonatori nello studio della sensazione sonora a causa dell'analogia con l'orecchio umano. Anche l'orecchio infatti esegue un'analisi di Fourier in tempo reale del suono che riceve, trasformando l'informazione contenuta nelle singole componenti armoniche in una codifica spaziale: armoniche di differente frequenza corrispondono ad un'eccitazione in una differente posizione all'interno della coclea.



Un banco di risuonatori di dimensioni differenti, quindi, può essere utilizzato come uno strumento analogico di analisi del suono: in presenza di un suono complesso, infatti, il banco di risuonatori lo scompone nelle sue componenti pure, dove la risposta di ciascun risuonatore sarà proporzionale all'intensità con cui la frequenza corrispondente contribuisce a formare il suono da analizzare. Si tratta, in pratica, di un rudimentale sistema meccanico in grado di effettuare un'analisi di Fourier in tempo reale. Grazie all'elettronica, naturalmente, queste operazioni sono oggi svolte da un opportuno banco di filtri che operano su un segnale elettrico, ottenuto dall'originale sonoro grazie ad un microfono.

Il *comportamento* del risuonatore di Helmholtz è completamente descritto da due parametri:

- **Frequenza propria di risonanza:** dipende dal volume del contenitore, dalla lunghezza dello sbocco della cavità, dall'area dell'apertura della cavità e dalla velocità del suono nell'aria (che a sua volta dipende dalla temperatura);
- **Efficienza con cui esso risuona** (ovvero l'intervallo di frequenze alle quali si ottiene una risposta).

Per determinare la frequenza di risonanza, supponiamo prima che il risuonatore sia ideale, ovvero che durante l'oscillazione della massa d'aria, essa non esca dal recipiente e che si muova all'interno della cavità priva di attrito.

Quindi, all'interno del corpo rigido e chiuso del recipiente, l'aria si comporta come un corpo elastico che inizia a vibrare, mentre nel collo aperto l'aria è libera di muoversi avanti e indietro con una velocità finita, senza modificare il proprio volume e avente elasticità trascurabile.

Con queste approssimazioni, il sistema è del tutto equivalente al sistema meccanico massa-molla, dove:

- *l'aria contenuto nel recipiente si comporta come una molla ideale*, in virtù del fatto che è comprimibile. Maggiore è il volume V del recipiente, minore è la sua costante elastica equivalente. La costante elastica equivalente è data da:

$$k = \frac{\rho_0 c^2 A^2}{V} \quad \text{dove} \quad \rho_0 = \left[\frac{kg}{m^3} \right] = \text{densità dell'aria}$$

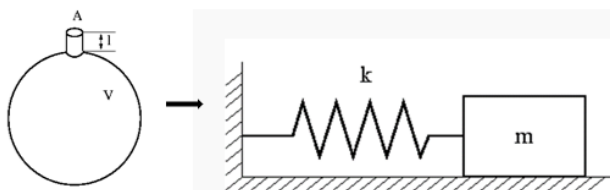
$$c = \left[\frac{m}{s} \right] = \text{velocità del suono nell'aria}$$

$$A = [m^2] = \text{sezione del collo}$$

$$V = [m^3] = \text{volume del corpo del recipiente}$$

- *l'aria contenuta nel collo si comporta come una massa ideale oscillante*: la sua caratteristica principale è l'inerzia che essa possiede una volta messa in circolazione. Poiché l'aria in questa sezione è presente in piccole quantità, la sua compressibilità è trascurabile. Una imboccatura stretta tende ad immobilizzare l'aria (grande inerzia), mentre con una imboccatura larga è facile spostare l'aria dentro e fuori dalla bottiglia. La massa d'aria nel collo del risuonatore è pari a:

$$m = \rho_0 l A \quad \text{dove} \quad l = [m] = \text{lunghezza del collo}$$



Sostituendo tali valori alla formula caratteristica per ricavare la frequenza di oscillazione propria di un

sistema massa-molla, ovvero: $f = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{k}{m}}$, si può ricavare la **frequenza di risonanza** del risuonatore:

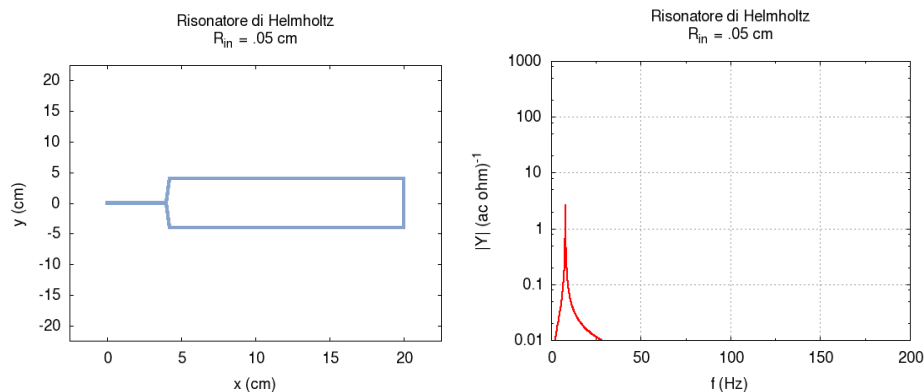
$$f = \frac{v}{2\pi} \sqrt{\frac{A}{Vl}}$$

Nel caso reale, però, un po' d'aria riesce a fuoriuscire dal recipiente durante ogni oscillazione, aumentando la componente inerziale e provocando una correzione sensibile alla frequenza. L'effetto della fuoriuscita dell'aria è equivalente ad avere un collo più lungo, quindi la correzione si può esprimere nell'uso di una lunghezza efficace l' , maggiore della lunghezza effettiva del collo, data dalla seguente formula:

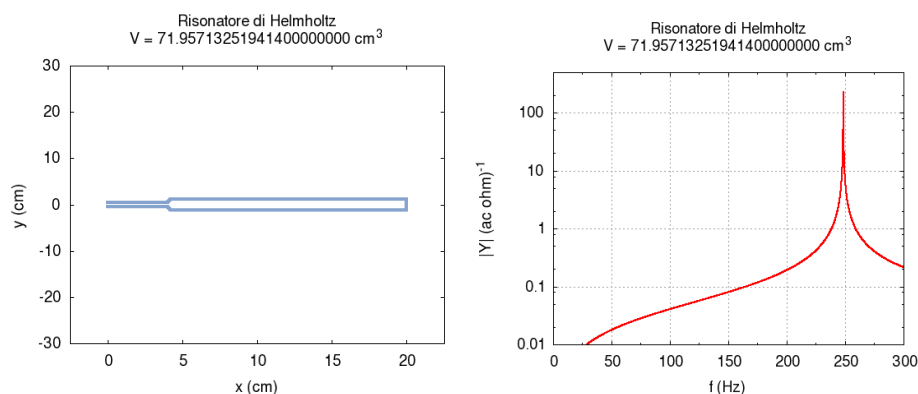
$$l' = l + \frac{4}{5} \sqrt{A}$$

In definitiva, la frequenza di risonanza dipende fortemente dalle dimensioni del sistema. Vale che:

- Tanto più è larga la sezione dell'imboccatura, tanto più la frequenza di risonanza aumenta.



- Tanto più aumenta il volume del risuonatore, tanto più la frequenza di risonanza diventa grave.



Da queste affermazioni deriva la particolare struttura dei banchi di risuonatori, che vengono per questo motivo posti in lunghe file di dimensioni progressivamente crescenti.

Questa struttura è infatti caratteristica di tutti gli strumenti musicali che producono suoni basandosi su banchi di risuonatori, come il pianoforte o l'organo.

Anche sistemi più semplici come bottiglie vuote di vetro, o anche riempite fino a un certo punto, sono sostanzialmente dei risuonatori di Helmholtz: quando si soffia delicatamente attraverso il collo di una bottiglia vuota, il suono prodotto è dovuto infatti alla risonanza di Helmholtz.

1.3 Acustica architettonica

L'acustica architettonica è quella disciplina dell'acustica che tratta della produzione, propagazione e ricezione del suono all'interno degli ambienti chiusi.

In queste circostanze, la risonanza di Helmholtz è utilizzata nei pannelli forati per interventi di fonoassorbimento: il risuonatore, infatti, agisce come smorzatore dinamico per le onde sonore in ambienti in cui sono presenti fenomeni di risonanza acustica, ovvero di riverbero prolungato ad una specifica frequenza.

Quando infatti ascoltiamo il suono prodotto da una sorgente sonora in un ambiente chiuso, il campo sonoro percepito da un ascoltatore è costituito da due contributi:

- Il **suono diretto**, costituito dall'onda sonora che raggiunge direttamente l'ascoltatore partendo dalla sorgente
- Il **suono riflesso**, che raggiunge l'ascoltatore con un certo ritardo rispetto al suono diretto solo dopo aver subito riflessioni da parte delle pareti, del pavimento e di tutti gli ostacoli posti tra la sorgente e l'ascoltatore

La politica generale che definisce un ambiente dotato di una “buona acustica” prevede che un certo grado di suono riverberato venga mantenuto in quanto gradito, poiché rende più caldo, continuo e fluido il suono. Quindi non si cerca di eliminarlo completamente, piuttosto di controllare il campo di riverbero.

La desiderata omogeneità del campo sonoro riverberato, necessaria per raggiungere gli ascoltatori in tutte le posizioni in modo uniforme, può essere ottenuta tramite **assorbimento per risonanza di cavità**, ma questa non è sicuramente l'unica soluzione.

Per realizzare questo tipo di assorbimento si utilizzano delle strutture costituite da pannelli di materiale non poroso (lastra di gesso) sui quali vengono praticati dei fori di opportune dimensioni, che assorbono il suono anziché rifletterlo, smorzando riverberi e risonanze indesiderate.

L'assorbimento avviene per viscosità che si realizza all'imboccatura dell'aerea cava all'interno del materiale, secondo il concetto del risonatore di Helmholtz.

La massa d'aria contenuta nei fori del pannello costituisce, infatti, con il volume d'aria dell'intercapedine retrostante, un sistema meccanico del tipo massa-molla, dotato quindi di una sua frequenza di risonanza, in corrispondenza della quale il sistema è in grado di assorbire una considerevole parte di energia.

L'assorbimento di un risonatore di questo tipo è molto selettivo intorno alla frequenza di risonanza e quindi particolarmente efficace nel caso di toni puri di bassa frequenza compresi tra 50 e 400 Hz. Nel caso in cui l'interno del materiale venga rivestito con materiale assorbente poroso, il valore del coefficiente di assorbimento alla frequenza di risonanza diminuisce, ma si allarga l'intervallo di frequenze in cui l'assorbimento è efficace. La frequenza di risonanza di questo tipo di pannelli è data dalla seguente relazione:

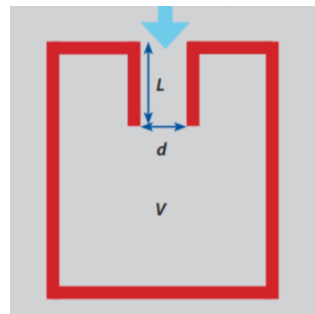
$$f = \frac{v}{2\pi} \sqrt{\frac{P}{dL}}$$

Dove P è la percentuale di foratura,

v è la velocità del suono,

D è lo spessore della cavità

L è la lunghezza del collo del risonatore.

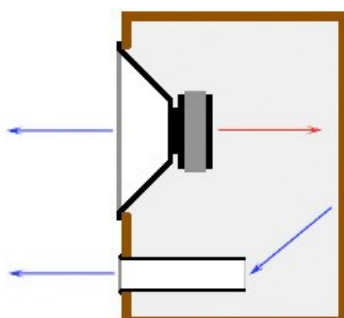


1.4 Realizzazione dei subwoofer

La risonanza trova applicazione nella realizzazione dei subwoofer tramite il sistema bass reflex, presenti nei moderni impianti Hi-Fi.

Il bass reflex è una particolare tecnica di realizzazione dell'insieme "cassa acustica + altoparlante", che consiste in una cassa di legno di dimensioni adeguate sulla quale viene progettata e realizzata una apertura, detta **raccordo del reflex**, funzionante come un risonatore di Helmholtz, che permette di convogliare verso la parte anteriore anche il suono generato posteriormente dall'altoparlante.

La risonanza di Helmholtz può quindi facilitare l'irraggiamento di un altoparlante alle basse frequenze: al di sotto di circa 80 Hz, infatti, l'efficienza di irraggiamento degli altoparlanti classici diminuisce drasticamente, e, senza l'aiuto della risonanza, molte frequenze andrebbero a spandersi a caso nell'ambiente di ascolto, generando rimbombi o annullandosi con le frequenze generate nella parte anteriore.



2. Riferimenti Bibliografici



Proprietà principali della risonanza acustica:

https://it.wikipedia.org/wiki/Risonanza_acustica



Descrizione chiara e dettagliata dei risuonatori di Helmholtz e la loro costruzione:

http://fisicaondemusica.unimore.it/Risuonatori_di_Helmholtz.html



Ulteriori approfondimenti sui risuonatori:

<http://www.classicogovone.it/archivio/fisica/2019/02/04/risuonatori-di-helmholtz/>



Analisi dell'acustica architettonica e varie tecniche connesse per ottenere un campo sonoro ottimale, tra cui la tecnica di assorbimento per risonanza di cavità:

<http://www.crit.rai.it/eletel/2010-3/103-04.pdf>



Ulteriori spunti per la descrizione dell'acustica architettonica:




http://fisicaondemusica.unimore.it/Acustica_architettonica.html



Proprietà fondamentali dei moderni subwoofer costruiti utilizzando la risonanza di Helmholtz:

https://it.wikipedia.org/wiki/Bass_reflex

3. Argomenti Teorici Trattati

-  Proprietà fisiche delle onde e analisi di Fourier.
-  Caratteristiche dei materiali.
-  Riflessione e riverbero.

3.1. Proprietà fisiche delle onde e analisi di Fourier

Un'onda è una perturbazione di una grandezza fisica che si propaga nel tempo trasportando energia o quantità di moto, partendo da una posizione particolare, detta sorgente.

La variazione dell'ampiezza in funzione del tempo può essere graficata attraverso la forma d'onda, che può presentare andamenti diversi a seconda che l'onda sia periodica o no. Si definisce:

- **ONDA PERIODICA:** un'onda si dice periodica di periodo T se è costituita da una sequenza di oscillazioni che si ripetono ad intervalli di tempo regolati e pari a T . Si può descrivere matematicamente tramite una funzione periodica di periodo T .
- **ONDA APERIODICA:** un'onda si dice aperiodica se non si può individuare una regolarità nelle oscillazioni.

Un'importante principio soddisfatto dalle onde è il **Principio di sovrapposizione**, che afferma che se due o più onde della stessa natura si propagano nello stesso mezzo e si sovrappongono in un certo punto dello spazio, la perturbazione generata è data dalla somma algebrica di ciascuna onda presa singolarmente. Quindi, qualunque sia il numero di sorgenti sonore presenti, al nostro orecchio giunge una sola onda sonora, risultato della somma delle varie onde emesse dalle varie sorgenti.

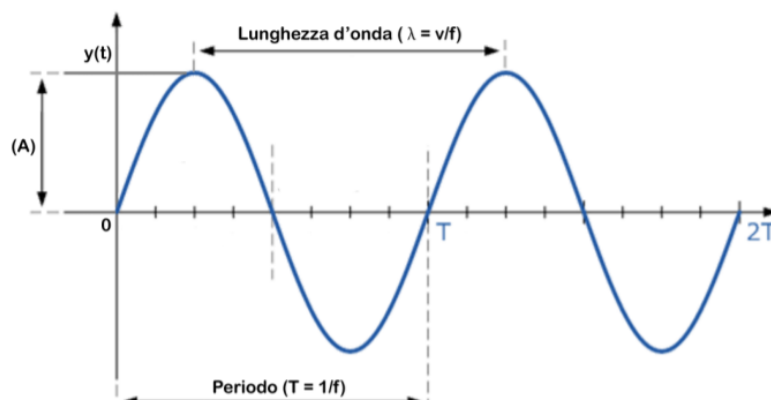
Nel caso di un'onda periodica, essa può essere completamente descritta attraverso alcuni parametri:

- **Ampiezza dell'onda:** rappresenta la variazione massima della grandezza oscillante;
- **Lunghezza d'onda:** data dalla distanza minima fra due creste o due ventri successivi;
- **Periodo:** l'intervallo di tempo in cui avviene un'oscillazione completa;
- **Frequenza:** il numero di oscillazioni in un secondo compiute dall'onda. Essa si misura in hertz (Hz) ed è pari all'inverso del periodo: $f = \frac{1}{T}$
- **Velocità di propagazione:** si dice velocità di propagazione di un'onda il rapporto tra la lunghezza d'onda e il periodo, cioè: $v = \frac{\lambda}{T}$

Per studiare le onde periodiche è molto utile scriverle in forma matematica, cioè descriverle tramite una funzione sinusoidale, ovvero:

$$y(t) = A \sin(2\pi ft + \varphi_0)$$

Dove A è la metà dell'ampiezza, f è la frequenza, il termine $2\pi ft + \varphi_0$ è la fase (una generica parte di periodo trascorso rispetto ad un istante di tempo fissato) e φ_0 è la fase iniziale (il periodo trascorso rispetto all'istante di tempo zero).



Un'oscillazione complessa può essere "decomposta" nelle sue oscillazioni armoniche, mediante un procedimento noto come **analisi di Fourier**. Tale analisi deriva dall'omonimo teorema, che afferma che: *qualunque funzione periodica di periodo T_0 , continua e limitata può essere rappresentata mediante una somma di funzioni sinusoidali pure di opportuna ampiezza e di frequenza multipla della frequenza fondamentale f_0 .*

Non tutte le funzioni periodiche possono essere scritte utilizzando lo sviluppo in Serie di Fourier: affinché questo sia possibile una funzione f deve soddisfare le **condizioni di Dirichlet**. Esse sono:

1. f deve essere assolutamente integrabile in un intervallo pari al periodo;
2. f deve avere un numero finito di estremi in un qualunque intervallo limitato;
3. f deve essere continua o avere al massimo un numero finito di punti di discontinuità di prima specie in un qualunque intervallo limitato (continuità a tratti).

Se queste condizioni sono soddisfatte, allora la funzione $y(t)$ periodica di periodo T può essere scritta come:

$$y(t) = \frac{a_0}{2} + \sum_{n=1}^{\infty} a_n \cos\left(n \frac{2\pi}{T} t\right) + b_n \sin\left(n \frac{2\pi}{T} t\right)$$

Questo procedimento può essere applicato anche alle onde non periodiche, utilizzando, invece che la serie di Fourier, la **Trasformata di Fourier**: in questo caso le frequenze delle onde elementari non apparterranno all'insieme discreto dei multipli della frequenza fondamentale, ma varieranno in un insieme continuo.

Tale processo non si riduce ad un semplice, ma complesso, calcolo matematico, ma offre la base teorica per innumerevoli applicazioni. Su di esso infatti si basano infatti:

- La possibilità di comprendere la nascita del timbro peculiare di ogni strumento musicale;
- La progettazione di sistemi di riconoscimento e sintesi vocale;
- La possibilità di ricercare le frequenze di risonanza dei sistemi oscillanti;
- La maggior parte delle tecniche spettroscopiche in fisica.

L'analisi spettrale, cioè la determinazione dei coefficienti a_n e b_n può essere effettuata anche per oscillazioni periodiche non descritte da una funzione di cui non si conosce l'espressione analitica $y(t)$.

Tali oscillazioni possono essere, ad esempio, le oscillazioni di un qualunque sistema meccanico, come una corda o di una membrana di uno strumento musicale, o un ponte o un edificio sottoposto a sollecitazioni esterne.

In questo caso l'analisi spettrale viene effettuata "empiricamente" facendo interagire l'onda in questione con sistemi fisici in grado di attivare meccanismi capaci di selezionarne e discriminare, separandole, le varie componenti spettrali (cioè le varie armoniche) da cui è l'onda è costituita. Tali meccanismi possono essere di vario tipo: nel fenomeno della risonanza il meccanismo selettivo è fornito dalla proprietà dei sistemi oscillanti di assorbire energia dalle diverse armoniche in modo più o meno efficiente.

Nel caso delle **onde sonore**, Helmholtz utilizzò tale principio per costruire un insieme di risonatori per analizzare il suono complesso generato dagli strumenti musicali. L'equivalente monocromatico del suono è un'onda sonora costituita da un'unica armonica come, in prima approssimazione, quello del diapason.

Oggi giorno esistono sistemi elettronici in cui la frequenza di risonanza è fissata modificando parametri fisici sui quali si ha un controllo superiore rispetto ai risonatori "meccanici" di Helmholtz. Per tale ragione l'analisi spettrale viene oggi effettuata tramite circuiti oscillanti molto più affidabili, selettivi e precisi dei risonatori di Helmholtz.

3.2. Risonanza acustica dei materiali

Passando al settore edile e all'analisi dei materiali, si può parlare di risonanza acustica utilizzata per andare ad indagare le caratteristiche di un edificio o dei materiali con cui è stato costruito.

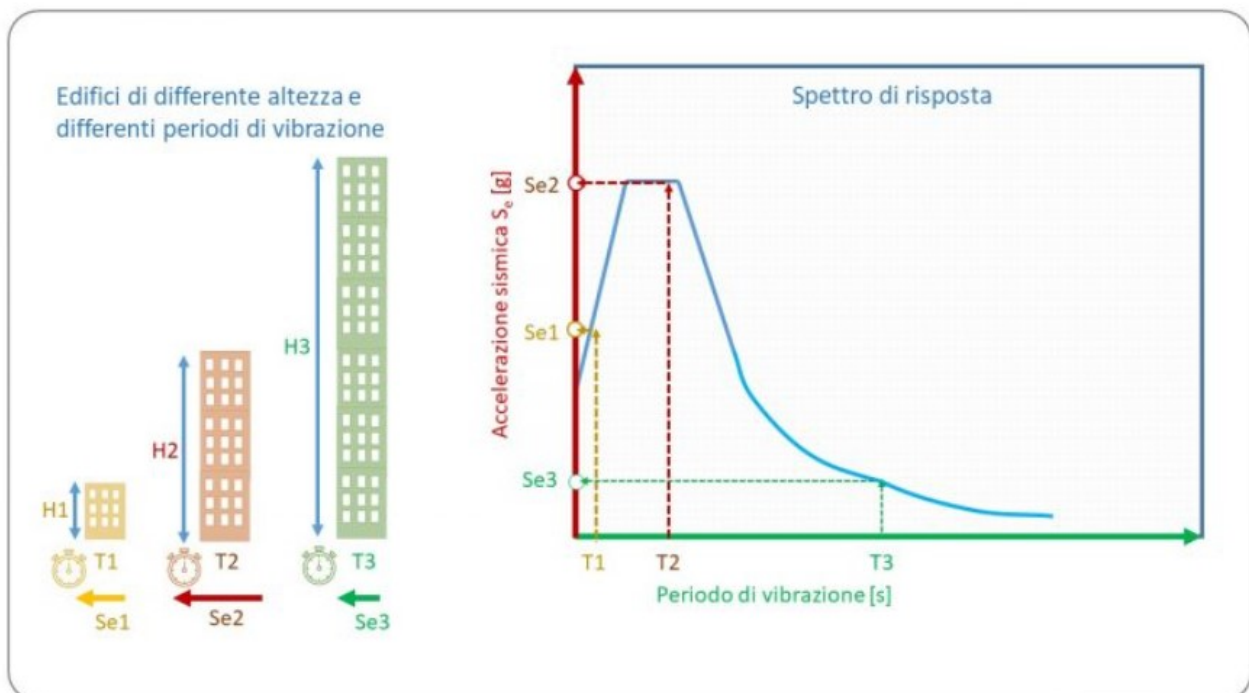
Per un sistema fisico, le frequenze di risonanza sono legate alla sua geometria ma anche alla natura dei materiali, studiandole si possono ottenere utili indicazioni su dinamica, stabilità e resistenza ad oscillazioni e "scosse".

Prima ancora di progettare le sezioni degli elementi strutturali di un edificio si può già conoscere in maniera approssimata l'entità dell'azione sismica a cui la struttura dovrà essere in grado di resistere attraverso il calcolo approssimato del periodo di vibrazione e allo spettro di risposta. La **Circolare 2019**, emanata dal **Ministero delle Infrastrutture e dei Trasporti**, fornisce una formula semplificata per calcolare il periodo di vibrazione in funzione dell'altezza della costruzione:

$$T = C1 \cdot H^{\frac{3}{4}}$$

Dove T è il periodo di vibrazione primario della struttura e H è l'altezza totale della struttura espressa in metri a partire dal piano di fondazione. Il coefficiente C1 dipende dalla tipologia strutturale:

- C1 = 0.085 per costruzioni con struttura a telaio in acciaio o legno;
- C1 = 0.075 per costruzioni con struttura a telaio in calcestruzzo armato;
- C1 = 0.050 per costruzioni con struttura di muratura o di qualsiasi altro tipo.



3.3. Riflessione e riverbero

Un fenomeno fisico fondamentale della propagazione del suono è la riflessione che si determina quando l'onda sonora incontra un ostacolo e torna indietro.

Questo fenomeno non avviene sempre, ma sotto opportune condizioni: affinché un suono che incontra un ostacolo sia riflesso, è necessario che la sua lunghezza d'onda sia molto più piccola dell'ostacolo.

Il suono riflesso perderà una parte della sua energia, la quale quantità dipende dal materiale della superficie con cui si scontra. Se in certi ambienti si vuole evitare la riflessione, basta quindi fare ricorso all'utilizzo di materiali detti fonoassorbenti, con i quali però la maggior parte dell'energia verrà comunque assorbita.

Se si conosce la velocità di propagazione v dell'onda, è possibile calcolare la distanza D di un oggetto dalla sorgente, presso cui l'onda riflessa fa di norma ritorno. Il tempo Δt che essa impiega per compiere due volte la stessa distanza, di andata e ritorno, è pari a:

$$\Delta t = \frac{2D}{v}$$

Si individuano così due onde: l'**onda incidente** e l'**onda riflessa**.

La riflessione può dar luogo a due differenti fenomeni:

- **ECO:** Si ha eco quando l'onda incidente e l'onda riflessa risultano distinte nell'orecchio dell'ascoltatore. Esso consiste nella sensazione che un suono emesso da una sorgente in una direzione, venga rimesso dopo un certo tempo da un'altra sorgente nella direzione opposta. Affinché l'essere umano possa apprezzare l'eco, non basta che l'onda venga riflessa, ma è necessario che la superficie riflettente si trovi ad una certa distanza dalla sorgente. Poiché gli esseri umani possono distinguere due suoni simili solo se questi arrivano all'apparato uditivo a distanza di almeno 0.1 s, per poter apprezzare l'eco nell'aria a 20° è necessario che la superficie riflettente sia ad una distanza D di almeno:

$$\Delta t = \frac{2D}{v} \Rightarrow D = \frac{v \Delta t}{2} \Rightarrow D = \frac{343 \cdot 0.1}{2} \cong 17 \text{ m}$$

Se la superficie riflettente è troppo vicina alla sorgente, non si riuscirà a distinguere tra il suono originale e il suono riflesso.

- **RIVERBERO:** Si ha riverbero quando l'onda incidente si confonde nell'orecchio dell'ascoltatore con l'onda riflessa. Tale fenomeno si verifica quando la superficie riflettente si trova a distanza inferiore di 17 m e consiste, a livello percettivo, nell'aumento di intensità e/o distorsione.

L'acustica delle sale si ottiene studiando e sfruttando il fenomeno del riverbero, mentre in musica si usa il riverbero per arricchire le melodie.

