

FONDAMENTI DI ACUSTICA

L'acustica è il ramo della fisica che tratta la generazione, la propagazione, e la percezione di ONDE IN MEZZI ELASTICI (gassosi e liquidi, che percepiamo come suoni; solidi, che percepiamo come vibrazioni).

FENOMENO ONDOSO

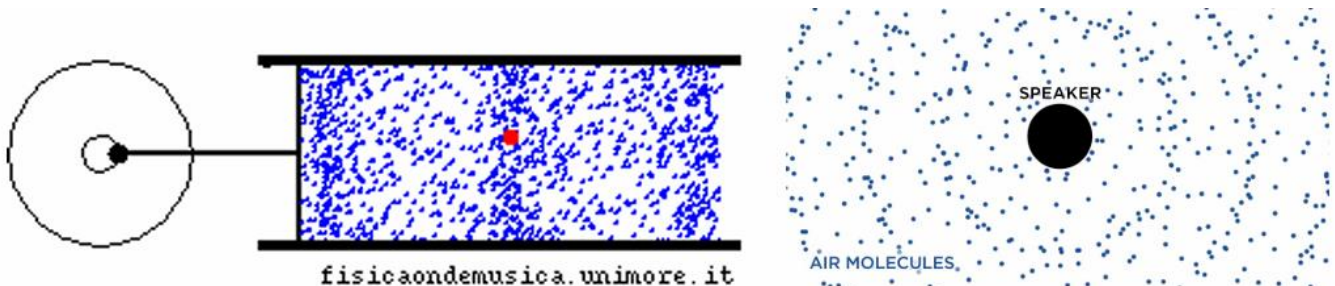
Un'ONDA è una perturbazione che si propaga attraverso uno spazio e trasporta energia senza che ci sia uno spostamento di materia perché le particelle del mezzo oscillano o vibrano intorno alla loro posizione di equilibrio senza spostarsi permanentemente.

Il FENOMENO ONDOSO si riferisce alla propagazione di perturbazioni (onde) attraverso un mezzo materiale o vuoto. Le onde meccaniche sono onde che necessitano di un mezzo materiale (solido, liquido o gassoso) per propagarsi.

Un'ONDA SONORA è un tipo di onda meccanica longitudinale che si propaga attraverso un mezzo (come aria, acqua o solidi) sotto forma di vibrazioni delle particelle del mezzo stesso. Il suono è prodotto da una sorgente che provoca delle vibrazioni che si trasmettono attraverso il mezzo circostante creando un'onda.

IL SUONO E LA PROPAGAZIONE SONORA

Il SUONO è una perturbazione di carattere oscillatorio che si propaga in un mezzo elastico di frequenza tale da essere percepita dall'orecchio umano (da circa 20 a 20000 Hz). La perturbazione è generata da una vibrazione di un corpo (sorgente sonora) che comprime ed espande alternativamente il mezzo elastico in cui è immerso.



Il suono si propaga quando una sorgente sonora (ad esempio una corda vibrante, le corde vocali, un altoparlante) crea VIBRAZIONI NEL MEZZO circostante. Queste vibrazioni provocano delle fluttuazioni di pressione che si trasmettono alle particelle vicine, creando una sequenza di compressioni e rarefazioni.

- Compressione: Le particelle del mezzo sono più vicine tra loro e la pressione aumenta.
- Rarefazione: Le particelle del mezzo sono più distanti tra loro e la pressione diminuisce.

Queste compressioni e rarefazioni si propagano in tutte le direzioni dalla sorgente sonora, formando un'onda che trasporta l'energia senza che le particelle del mezzo si spostino permanentemente, ma solo in modo oscillatorio attorno alla loro posizione di equilibrio.

Quando un'onda sonora si propaga, le particelle del mezzo vibrano avanti e indietro lungo la direzione di propagazione dell'onda, causando quindi variazioni nella pressione e nella densità.

In assenza di fenomeno sonoro, la pressione vale 1 atm o 101325 Pa e la densità vale 1,2.

Nelle compressioni dell'onda sonora, le particelle del mezzo si avvicinano tra loro. Questo comporta un aumento della pressione in quella regione. La pressione è una misura della forza per unità di area che le particelle esercitano l'una sull'altra.

Quando le particelle sono più vicine, come nelle compressioni, la densità del mezzo aumenta, e di conseguenza anche la pressione in quella zona aumenta.

Nelle compressioni dell'onda sonora, le particelle del mezzo si avvicinano tra loro. Questo comporta un aumento della pressione in quella regione. La pressione è una misura della forza per unità di area che le particelle esercitano l'una sull'altra.

Quando le particelle sono più vicine, come nelle compressioni, la densità del mezzo aumenta, e di conseguenza anche la pressione in quella zona aumenta.

Una compressione è una zona di alta pressione (perché le particelle sono vicine tra loro).

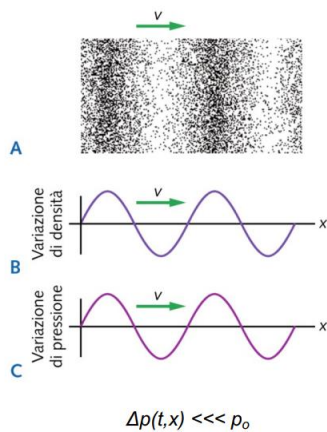
Nelle rarefazioni, le particelle si allontanano l'una dall'altra, causando una diminuzione della pressione. La pressione in questa regione è più bassa rispetto alla zona di equilibrio, dove le particelle si trovano alla loro distanza di riposo.

Quando le particelle si allontanano, la densità del mezzo diminuisce, e la pressione nella zona di rarefazione è inferiore rispetto alla zona di compressione.

Le rarefazioni sono quindi le zone di bassa pressione.

La densità è una misura della quantità di materia per unità di volume. In un'onda sonora, la densità del mezzo cambia a causa delle oscillazioni delle particelle:

- Nelle compressioni, la densità aumenta, poiché le particelle sono più vicine tra loro.
- Nelle rarefazioni, la densità diminuisce, perché le particelle sono più lontane tra loro.



In questo modo, la propagazione del suono implica un alternarsi di regioni ad alta densità (compressioni) e regioni a bassa densità (rarefazioni), che sono accompagnate da corrispondenti variazioni di pressione.

Nei fluidi, lo spostamento delle particelle (con velocità u) indotto dal segnale acustico è associato a una piccola variazione di pressione Δp e di densità $\Delta \rho$. In aria, le fluttuazioni di pressione avvengono attorno al valore stazionario della pressione atmosferica pari a circa 105 N/m^2 (Pa) o 1 bar.

L'ampiezza di queste fluttuazioni $\Delta p(t,x)$ è molto piccola paragonata al valore della pressione atmosferica.

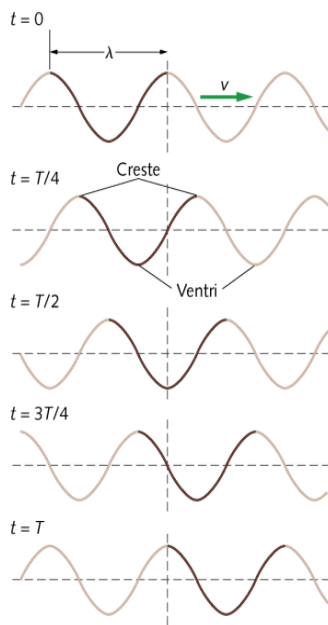
Un suono esiste se una perturbazione che si propaga attraverso un mezzo elastico determina uno spostamento delle particelle e una variazione della pressione tale da essere rilevato. All'onda acustica sono dunque associate grandezze che descrivono la perturbazione dello stato di quiete del mezzo di propagazione:

- $\Delta p(t,x) = p(t,x) - p$ pressione acustica o sonora (Pa)
- $u(t,x)$ velocità delle particelle (m/s)
- $\Delta \rho(t,x) = \rho(t,x) - \rho$ variazione di densità del mezzo (kg/m^3)

LA LUNGHEZZA D'ONDA

La lunghezza d'onda è la distanza tra due punti consecutivi di un'onda che si trovano nella stessa fase di oscillazione. In altre parole, è la distanza tra due creste successive (o due ventri) di un'onda.

La cresta è il punto di massima compressione dell'onda, cioè il punto in cui le particelle del mezzo raggiungono la loro massima deviazione in una direzione (ad esempio, la massima deformazione positiva).



Il ventre è il punto di massima decompressione dell'onda, cioè il punto in cui le particelle del mezzo raggiungono la loro massima deviazione nella direzione opposta (la massima deformazione negativa).

Un fronte d'onda è una superficie immaginaria che rappresenta tutti i punti del mezzo che sono attraversati dalla stessa fase dell'onda sonora. Esso è costituito da tutti i punti in cui le particelle del mezzo si trovano nello stesso stato di vibrazione (ad esempio, tutte le particelle che raggiungono il massimo spostamento verso l'esterno nella stessa istante di tempo, oppure tutte quelle che si trovano nel punto di minima compressione).

I fronti d'onda si spostano man mano che l'onda si propaga attraverso il mezzo. Ogni fronte d'onda corrisponde a un'onda che si propaga in modo uniforme.

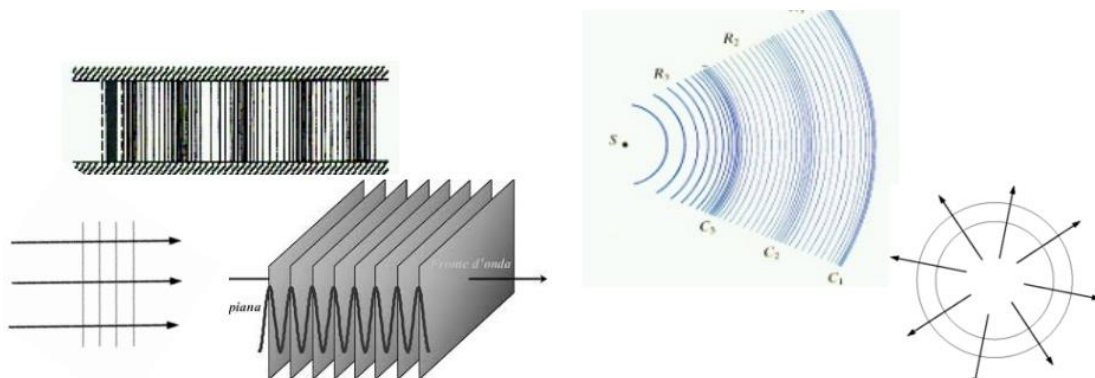
La forma dei fronti d'onda dipende dalla natura della sorgente sonora:

- Sorgente puntiforme: se la sorgente è un punto (ad esempio, una sorgente sonora piccola rispetto alla lunghezza d'onda), i fronti d'onda sono sferici, poiché l'onda si propaga in tutte le direzioni, espandendosi come una sfera.
- Sorgente lineare: se la sorgente è una linea (ad esempio, una lunga fessura), i fronti d'onda sono circolari o cilindrici.
- Sorgente piana: se la sorgente è un piano (ad esempio, una superficie molto ampia che emette suono), i fronti d'onda sono piani e si propagano in tutte le direzioni con una forma piana.

Esempio di fronte d'onda sferico: una sorgente sonora che emette onde in tutte le direzioni (come un altoparlante piccolo). Le onde si propagano verso l'esterno in fronti d'onda sferici, e ogni "strato" di queste onde forma una sfera che cresce nel tempo.

Un raggio d'onda è una linea tangente che indica la direzione di propagazione dell'onda sonora. Esso è un vettore che punta nella direzione in cui l'energia acustica si sta muovendo. I raggi d'onda sono perpendicolari ai fronti d'onda e aiutano a visualizzare come l'energia acustica si diffonde nello spazio.

I fronti d'onda e i raggi d'onda sono due modi complementari di descrivere lo stesso fenomeno. Mentre i fronti d'onda rappresentano le superfici dove le particelle del mezzo si trovano nella stessa fase, i raggi d'onda rappresentano le direzioni lungo le quali l'energia dell'onda si propaga. Raggi e fronti sono sempre legati tra loro: i raggi sono tangenti ai fronti d'onda; quindi, ogni raggio d'onda punta nella direzione della propagazione dell'onda e si propaga lungo la superficie del fronte d'onda.



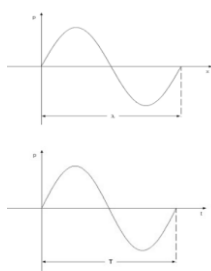
Immagina un altoparlante che emette onde sonore in tutte le direzioni (come un piccolo punto di sorgente sonora). Le onde si propagheranno sotto forma di fronti d'onda sferici. Se disegniamo delle linee che puntano lungo la direzione di propagazione, queste linee saranno i raggi d'onda. La distanza tra due fronti consecutivi (ad esempio, da una sfera all'altra) rappresenta la lunghezza d'onda dell'onda sonora.

PERIODICITÀ DEI FENOMENI ACUSTICI

La periodicità è una caratteristica fondamentale dei fenomeni acustici, poiché il suono stesso è un'onda che si ripete ciclicamente nel tempo e nello spazio.

- La periodicità nel tempo si riferisce alla ripetizione ciclica delle oscillazioni delle particelle del mezzo in cui si propaga l'onda sonora.
- La periodicità nello spazio si riferisce alla ripetizione ciclica dell'onda nello spazio, cioè alla distanza tra due punti successivi dell'onda che sono nella stessa fase (ad esempio, tra due creste consecutive o due ventri)

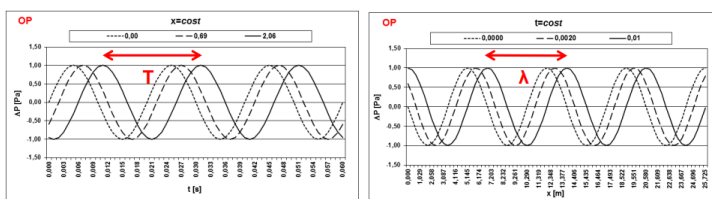
La periodicità del fenomeno acustico viene descritta con le seguenti grandezze:



- rispetto allo spazio:
 - lunghezza d'onda λ (m)
 - numero d'onda k con $k = 2\pi/\lambda$ (rad/m)
- rispetto al tempo:
 - periodo T (s)
 - frequenza f (Hz) con $f = 1/T$
 - frequenza angolare ω (rad/s) con $\omega = 2\pi/T = 2\pi f$

ONDE PIANE

Le onde piane sono onde sonore che si propagano in linee rette e la loro superficie di fronte d'onda è piana (cioè, costituita da piani paralleli). Questo tipo di onda si verifica quando il suono si propaga in un ambiente in cui la sorgente è molto grande rispetto alla lunghezza d'onda, oppure quando la propagazione avviene in una direzione preferenziale (ad esempio, in una lunga galleria o in un tubo).



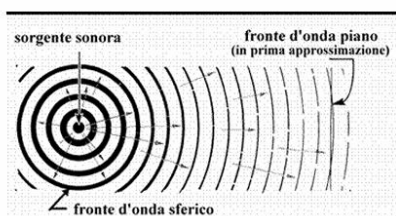
Nel caso di onde piane progressive con sorgente animata di moto armonico semplice (suoni puri) si avrà:

$$\Delta p(t, x) = \Delta p_{\max} \sin(\omega t - kx)$$

$$\omega = \frac{2\pi}{T} = 2\pi f \quad k = \frac{2\pi}{\lambda}$$

ω = pulsazione, rad/s
 f = frequenza, Hz
 T = periodo, s
 k = numero d'onda, rad/m
 λ = lunghezza d'onda, m

ONDE SFERICHE



Le onde sferiche, al contrario, si propagano in tutte le direzioni a partire da una sorgente puntiforme, creando fronti d'onda sferici. In questo caso, la superficie del fronte d'onda è una sfera che cresce di raggio man mano che l'onda si propaga. Le onde sferiche sono tipiche di una sorgente sonora che emette in modo omogeneo in tutte le direzioni, come una sorgente puntiforme.

Nel caso di onde sferiche progressive prodotte da una «sfera pulsante» animata di moto armonico semplice si avrà:

$$\Delta p(t, r) = \frac{\Delta p_{\max}}{r} \sin(\omega t - kr)$$

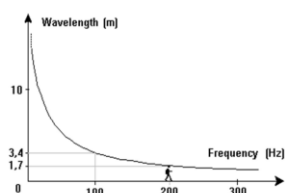
dove r è la distanza dalla sorgente. In questo caso la pressione sonora (o acustica) Δp decresce in modo inversamente proporzionale alla distanza dalla sorgente.

Caratteristica	Onde Piane	Onde Sferiche
Forma dei fronti d'onda	Piani paralleli	Sfere concentriche
Direzione di propagazione	Propagazione rettilinea	Propagazione radiale (tutte le direzioni)
Sorgente	Sorgente molto estesa o in un mezzo confinato	Sorgente puntiforme o piccola
Velocità di propagazione	Uguale in tutte le direzioni nel piano	Diminuisce con la distanza dalla sorgente
Distribuzione dell'intensità	L'intensità non diminuisce con la distanza (in un mezzo ideale)	L'intensità diminuisce con il quadrato della distanza (legge dell'inverso del quadrato)
Esempio	Suono che si propaga in una lunga galleria	Suono emesso da un altoparlante puntiforme

LUNGHEZZA D'ONDA, PERIODO E VELOCITÀ DEL SUONO

- La lunghezza d'onda λ è la distanza percorsa dall'onda durante una oscillazione completa [m]
- Il periodo T è il tempo impiegato a compiere un'oscillazione completa (o il tempo necessario affinché un'onda si sposti di una lunghezza d'onda) [s]
- La frequenza f rappresenta il numero di oscillazioni complete effettuate nell'unità di tempo. Essa è legata alla rapidità di oscillazione delle particelle. Cicli/secondo, Hertz [Hz]; $f = 1/T$ (Hz)
- La velocità dell'onda c è la velocità con cui la propagazione di energia avanza nel mezzo (da non confondere con la velocità delle particelle) e dipende dalle proprietà del mezzo [m/s]; $c = \lambda/T = \lambda f$ (m/s)

Se la velocità del suono è costante (come nel caso di un determinato mezzo), la frequenza e la lunghezza d'onda sono inversamente proporzionali:



Se la frequenza aumenta, la lunghezza d'onda diminuisce.

Se la frequenza diminuisce, la lunghezza d'onda aumenta.

Quindi, se si aumenta la frequenza (ad esempio, producendo suoni più acuti), la lunghezza d'onda deve ridursi. Al contrario, se si diminuisce la frequenza (suoni più gravi), la lunghezza d'onda aumenta.

Valgono le seguenti relazioni:

$$f = \frac{1}{T} \quad \lambda = \frac{c}{f} \quad \lambda \cong \frac{340}{f}$$

Nell'aria ($c = 340$ m/s) le lunghezze d'onda corrispondenti all'intervallo di udibilità sono quindi comprese tra $\lambda = 17$ m ($f = 20$ Hz) e $\lambda = 17$ mm ($f = 20$ kHz).

λ	34 m		3.4 m		340 mm		34 mm	
f	10 Hz		100 Hz		1 kHz		10 kHz	
λ		17 m						17 mm
f		20 Hz						20 kHz

IL SUONO NELL'ARIA

Nel caso dell'aria, la velocità del suono dipende principalmente dalla temperatura dell'aria. All'aumentare della temperatura, la velocità del suono aumenta, poiché le molecole d'aria si muovono più velocemente, facilitando la propagazione delle vibrazioni acustiche.

La velocità del suono nell'aria (considerata come un gas ideale) è data dalla relazione termodinamica:

$$c = \sqrt{\gamma \frac{R_0}{M} T}$$

dove:

$\gamma = c_{pc}/c_{vc} = 1,402$ per l'aria (gas ideale biatomico)

R_0 = costante universale dei gas perfetti = 8314,3 J/(kmol•K)

M = massa molare dell'aria, pari a 29 kg/kmol

T = temperatura assoluta dell'aria (K)

Si ha dunque:

$$c = 331,4 + 0,6t$$

con t = temperatura dell'aria in °C

mezzo	velocità [m/s]
aria a 0°C	331
aria a 10°C	337
aria a 20°C	343
aria a 30°C	349

IL SUONO NEI SOLIDI

Nei solidi, la velocità del suono è generalmente molto più alta rispetto all'aria. Questo perché i solidi sono più rigidi e le particelle sono più vicine tra loro, il che facilita la trasmissione delle vibrazioni.

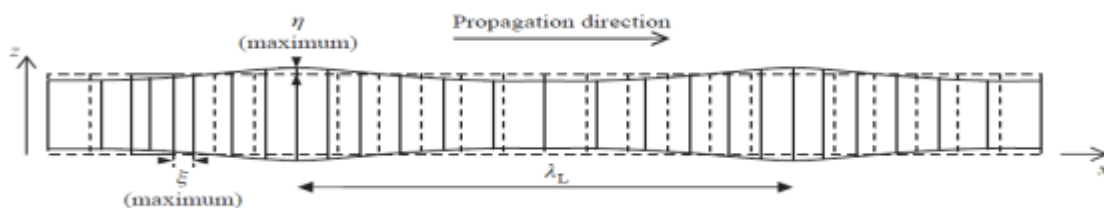
I suoni si propagano sia per onde longitudinali che per onde trasversali. La velocità di propagazione dipende dalla densità e da alcuni dei parametri elastici del mezzo: modulo di Young E (Pa) e rapporto di Poisson ν .

Nei solidi di dimensioni finite le onde elastiche di maggiore importanza sono le onde flessionali. La loro importanza deriva dal fatto che giocano un ruolo importante nei processi di radiazione acustica.

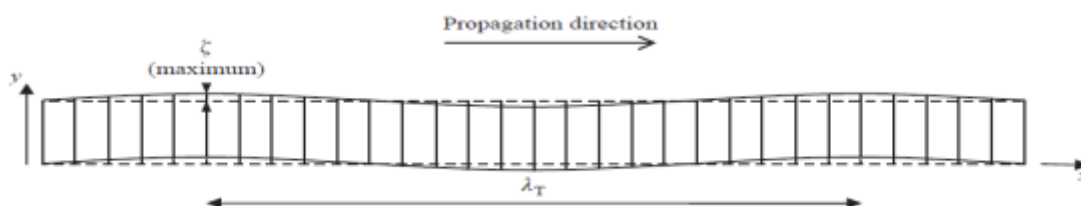
La loro velocità di propagazione non dipende solo dalle proprietà fisiche del mezzo ma anche dalla frequenza (più precisamente dalla sua radice quadrata).

materiale	c
	m/s
aria	340
materie plastiche espanse	775
gomma	47
sughero	516
materie plastiche compatte	1 732
nylon	1 348
acqua	1500
legno di pino	4 282
mattoni	3 430
cemento armato	3 297
vetro	5 477
piombo	1 113
alluminio	4 714
granito	5 055
ghisa	3 118
rame	3 672
acciaio	5 064

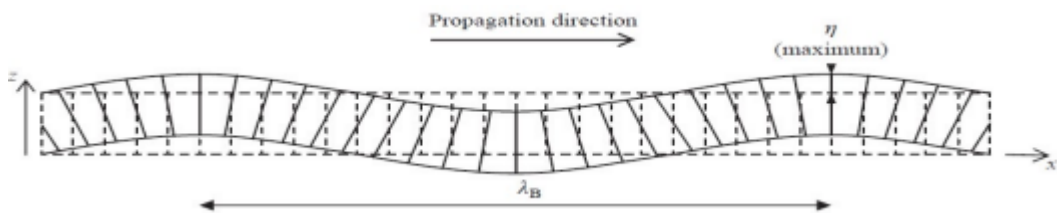
ONDE QUASI LONGITUDINALI SU UN PIANO: sono prodotti piccoli spostamenti laterali e per questo la radiazione del suono da queste onde è generalmente insignificante comparata con quella delle onde flessionali. Giocano un ruolo importante nella trasmissione delle vibrazioni tra pareti connesse.



ONDE DI TAGLIO TRASVERSALI SU UN PIANO: solo il movimento della superficie della parete è tangenziale all'aria adiacente, per cui queste onde non sono in grado di irradiare suono. Giocano un ruolo importante nella trasmissione di suono che si origina per via strutturale tra pareti connesse

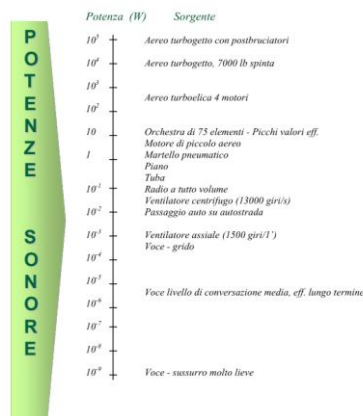


ONDE FLESSIONALI SU UN PIANO: produce sia la rotazione che lo spostamento laterale degli elementi del piano (molto pronunciati). Giocano un ruolo importante nella radiazione del suono.



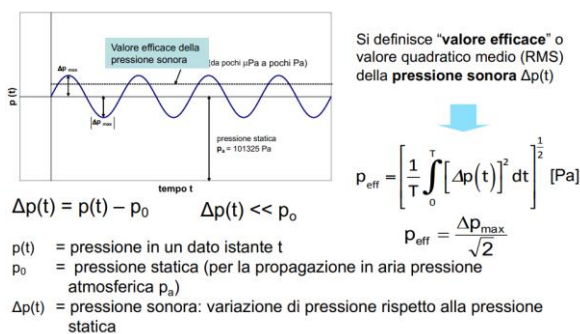
POTENZA SONORA

La potenza sonora è la quantità di energia sonora che una sorgente emette in unità di tempo. Viene espressa in watt (W). La potenza sonora dipende dalla superficie attraverso cui l'energia acustica viene trasportata e dalla pressione generata dall'onda sonora.



PRESSIONE SONORA

La pressione sonora è la variazione della pressione atmosferica causata dall'onda acustica. Quando un'onda sonora passa, le particelle del mezzo vibrano, causando piccole oscillazioni della pressione attorno al valore medio (la pressione atmosferica). La pressione sonora può essere misurata in pascal (Pa).



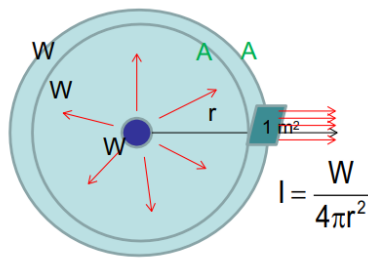
IL VALORE EFFICACE DELLA PRESSIONE SONORA (o pressione acustica efficace) è una misura utile perché fornisce una media quadratica della pressione istantanea nel tempo. Viene utilizzato per rappresentare il valore di picco di una grandezza variabile (come la pressione sonora) quando questa oscilla periodicamente (come nel caso di un'onda sonora).

INTENSITÀ SONORA

L'intensità sonora (W/m^2) rappresenta la quantità di energia che fluisce nell'unità di tempo attraverso una superficie di area unitaria perpendicolare alla direzione di propagazione dell'onda.

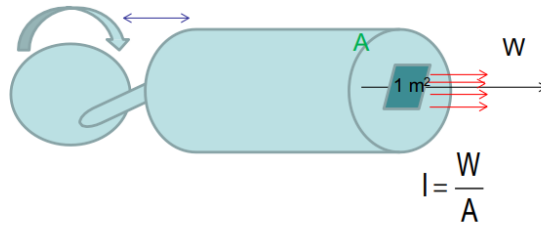
La potenza sonora emessa da una sorgente si irradia in tutte le direzioni dando origine in ogni punto dello spazio circostante ad una intensità sonora.

PROPAGAZIONE PER ONDE SFERICHE



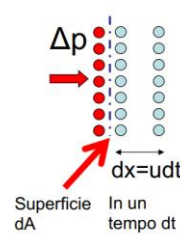
L'intensità decade con il quadrato della distanza dalla sorgente

PROPAGAZIONE PER ONDE PIANE



L'intensità è costante (trascurando i fenomeni dissipativi)

L'intensità sonora è legata alla pressione sonora secondo la seguente relazione (valida per onde piane e per le onde sferiche a sufficiente distanza dalla sorgente):



$$I = \frac{p^2}{\rho c}$$

L'energia che nell'intervallo dt attraversa l'area dA:

$$d^2E = \Delta p \cdot dA \cdot dx = \Delta p \cdot dA \cdot u \cdot dt$$

L'energia che fluisce per unità di superficie e nell'unità di tempo:

$$\frac{d^2E}{dA \cdot dt} = I(t) = \frac{\Delta p \cdot dA \cdot u \cdot dt}{dA \cdot dt} = \Delta p \cdot u$$

$$\Delta p \cdot u = \Delta p_{\max} u_{\max} \sin^2(\omega t - kx)$$

L'intensità media su T:

$$I = \frac{1}{T} \int_0^T \Delta p_{\max} u_{\max} \sin^2(\omega t - kx) dt = \frac{1}{2} \Delta p_{\max} u_{\max}$$

$$p = \frac{\Delta p_{\max}}{\sqrt{2}}; \quad u_{\max} = \rho_0 c$$

$$I = \frac{1}{2} \frac{\Delta p_{\max}^2}{\rho_0 c} = \frac{p^2}{\rho_0 c}$$

IMPEDENZA ACUSTICA

L'impedenza acustica è una proprietà del mezzo che descrive la resistenza alla propagazione del suono.

Nel caso di onde piane la Δp è in fase con la u e il loro rapporto $\Delta p/u$ rappresenta l'IMPEDENZA ACUSTICA CARATTERISTICA Z_0 del campo acustico:

$$Z_0 = \frac{\Delta p}{u} = \rho_0 c \quad \left(\frac{\text{Pa} \cdot \text{s}}{\text{m}} \text{ o } \frac{\text{kg}}{\text{m}^2 \text{s}} \text{ o rayl} \right)$$

Con ρ_0 densità dell'aria in assenza di suono, in kg/m³. Alla pressione atmosferica di 101300 Pa e alla temperatura di 20° è pari a 412 rayl

L'impedenza acustica caratteristica Z_0 costituisce un caso particolare, valido per la propagazione di onde piane, dell'IMPEDENZA ACUSTICA SPECIFICA, Z_s :

$$Z_s = \frac{\Delta p}{u} = R_s + jX_s$$

dove:
 R_s = resistenza acustica specifica
 X_s = reattanza acustica specifica

La propagazione per onde sferiche è un caso in cui pressione sonora e velocità di particelle non sono in fase e il loro rapporto, l'impedenza acustica specifica, è una grandezza complessa. Solo quando la distanza dalla sorgente è molto maggiore della lunghezza d'onda e quindi la curvatura dell'onda sferica risulta trascurabile, il termine reattivo tende a zero, mentre il termine resistivo approssima $\rho_0 c$: in questa condizione, l'impedenza acustica per un'onda sferica approssima quella per un'onda piana. La transizione fra campo vicino e campo lontano si verifica ad una distanza dalla sorgente $r \approx 1,6 \lambda$

LIVELLI DI PRESSIONE SONORA

I livelli di pressione sonora, potenza sonora e intensità sonora sono misurati in decibel (dB), una scala logaritmica.

SORGENTE SONORA	LIVELLO SONORO IN dB(A)
Soglia di udibilità	0
Soglia di rilevabilità di un normale fonometro	20
Ambiente considerato molto silenzioso	25
Conversazione sussurrata	30
Frigorifero	35
Condizionatore d'aria autonomo	50
Auto a bassa velocità	55
Lavabiancheria lavaggio	60
Conversazione normale	60
Aspirapolvere	70
Cacciata di W.C.	70
Automobile	71
Lavabiancheria centrifuga	75
Traffico intenso	75
Pianoforte	80
Autocarro	80
Treno in transito	85
Strumento musicale a corda	90
Ciacson d'auto	97
Strumento musicale a fiato	100
Aereo in fase di decollo	120
Soglia del dolore	130

- **LIVELLO DI PRESSIONE SONORA:** misura la pressione acustica che una onda sonora esercita nell'aria. È legato alla percezione uditiva dell'intensità del suono, ma non tiene conto della distanza dalla sorgente.

- **LIVELLO DI POTENZA SONORA:** rappresenta la potenza totale emessa da una sorgente sonora, ed è una misura più oggettiva e non dipendente dalla distanza dalla sorgente.

- **LIVELLO DI INTENSITÀ SONORA:** misura la potenza per unità di area (in watt per metro quadrato) che attraversa una superficie. È collegato al livello di potenza sonora, ma tiene conto della geometria dell'onda acustica, come la distanza dalla sorgente

ANALISI SPETTRALE

L'analisi spettrale è il processo di scomposizione di un segnale acustico (come un suono o una vibrazione) in componenti di frequenza, in modo da studiarne la distribuzione energetica in funzione delle frequenze.

Si basa sulla Trasformata di Fourier che permette di esprimere un segnale nel dominio del tempo (ad esempio, la variazione della pressione sonora nel tempo) come una somma di onde sinusoidali a diverse frequenze, ognuna delle quali con una certa ampiezza e fase.

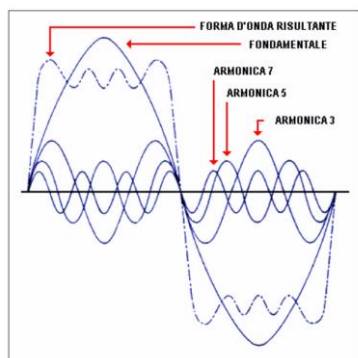
In pratica, l'analisi spettrale consente di visualizzare o misurare lo spettro di frequenze di un segnale.

SUONI PURI E SUONI COMPLESSI

Il **SUONO PURO** è un fenomeno sonoro sinusoidale.

Un suono puro è un segnale acustico che contiene una singola frequenza. È una sinusoide ideale, priva di armoniche, con una frequenza costante nel tempo e un'ampiezza fissa.

Il **SUONO COMPLESSO** è un fenomeno sonoro periodico decomponibile in componenti sinusoidali elementari dette armoniche.



Un suono complesso è composto da più frequenze. Queste frequenze possono essere armoniche (multipli interi di una frequenza fondamentale) o non armoniche (frequenze arbitrariamente distribuite).

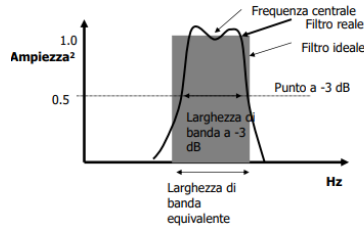
Se una sorgente sonora emette frequenze multiple della frequenza fondamentale (ad esempio, 100 Hz, 200 Hz, 300 Hz, ecc.), questi suoni sono percepiti come un suono armonico. La frequenza fondamentale (ad esempio 100 Hz) è la frequenza principale che determina il pitch del suono, mentre le armonie superiori (200 Hz, 300 Hz) arricchiscono la percezione del timbro del suono, ma non influenzano il pitch.

IL RUMORE

Il rumore è un suono caratterizzato dalla presenza di una distribuzione continua di frequenze. Può essere un segnale acustico caotico o aleatorio, che non può essere descritto da una semplice sinusoide o da un insieme di frequenze armoniche. Il rumore è spesso descritto come un suono senza una frequenza predominante o una struttura armonica chiara.

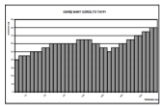


Il rumore a banda larga (detto anche rumore bianco o rumore con spettro ampio) è una tipologia di rumore caratterizzata da una distribuzione di potenza su un ampio intervallo di frequenze, senza picchi o bande ristrette.

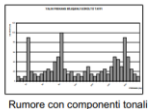


La principale caratteristica di questo tipo di rumore è che la sua potenza è distribuita in modo quasi uniforme su una vasta gamma di frequenze.

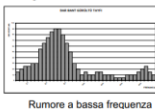
Filtro passa banda: dispositivo che lascia passare la gamma di frequenze comprese nel suo intervallo caratteristico senza attenuarle mentre attenua fortemente quelle al di sotto o al di sopra di tale intervallo.



Rumore a banda larga



Rumore con componenti tonali



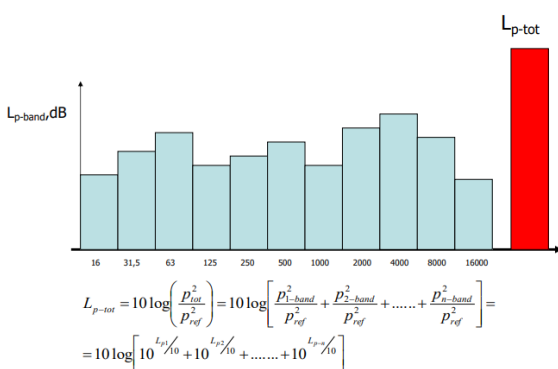
Rumore a bassa frequenza

Il rumore con componenti tonali è un tipo di rumore che contiene frequenze discrete o picchi tonali in corrispondenza di frequenze specifiche, rendendolo diverso dal rumore a banda larga. Questi componenti tonali sono suoni a frequenza fissa, come quelli che si possono udire in suoni armonici o in suoni musicali.

Il rumore a bassa frequenza è un tipo di rumore che contiene principalmente frequenze sotto i 200 Hz (soprattutto nelle gamme sub-basse e basse). Questo tipo di rumore è caratterizzato da onde sonore lunghe e più difficili da attenuare. È comune in situazioni come quelle che coinvolgono motori pesanti, veicoli, impianti industriali e in ambienti con forti vibrazioni.

Caratteristica	Suono Puro	Suono Complesso	Rumore
Composizione	Una singola frequenza	Più frequenze (fondamentale + armoniche)	Un insieme di frequenze casuali o continue
Esempi	Diapason, tono puro generato elettricamente	Strumenti musicali, voce umana	Fruscio, vento, rumore bianco
Spettro di frequenze	Una singola frequenza	Una frequenza fondamentale con armoniche	Una distribuzione continua o casuale di frequenze
Forma d'onda	Sinusoide pura	Combinazione di sinusoidi	Segnale caotico o irregolare
Riconoscibilità	Suono monotono e semplice	Suono ricco e timbrato	Suono privo di tono, caotico

Il livello globale si riferisce a una misura della potenza o pressione sonora totale di un suono o di una sorgente sonora all'interno di un determinato ambiente, considerando tutte le frequenze presenti nel suono.



SUDDIVISIONE IN BANDE

La suddivisione in bande in acustica si riferisce al processo di divisione dello spettro acustico in intervalli di frequenza, detti bande ad ampiezza costante e le bande ad ampiezza percentuale costante.

- In una suddivisione in **BANDE AD AMPIEZZA COSTANTE**, le larghezze delle bande di frequenza sono tutte uguali: ogni banda copre lo stesso intervallo di frequenze, indipendentemente dalla posizione nel dominio delle frequenze.
- In una suddivisione in **BANDE AD AMPIEZZA PERCENTUALE COSTANTE**, la larghezza di ogni banda è proporzionale alla frequenza centrale di ciascuna banda: l'ampiezza (larghezza) della banda aumenta all'aumentare della frequenza centrale.

1. Bande ad ampiezza costante

$$\Delta f = f_2 - f_1 = \text{cost}$$

2. Bande ad ampiezza percentuale costante

$$\frac{\Delta f}{f} = \text{costante} \quad \frac{f_2}{f_1} = \text{costante} \quad f = \sqrt{f_2 \cdot f_1}$$

f = frequenza nominale (di centro banda)

f_1 = frequenza di taglio inferiore

f_2 = frequenza di taglio superiore

Δf = ampiezza di banda

BANDE AD AMPIEZZA PERCENTUALE COSTANTE

- Bande di ottava

$$\frac{f_2}{f_1} = 2 \quad f = \frac{f_2}{\sqrt{2}} = \sqrt{2} f_1 \quad \frac{\Delta f}{f} = \frac{\sqrt{2}}{2} = 0,7071$$

- Bande di 1/n di ottava

$$\frac{f_2}{f_1} = \sqrt[n]{2} \quad f = \sqrt[n]{2} f_1 \quad \frac{\Delta f}{f} = \frac{\sqrt[n]{2} - 1}{\sqrt[n]{2}} = \text{cost}$$

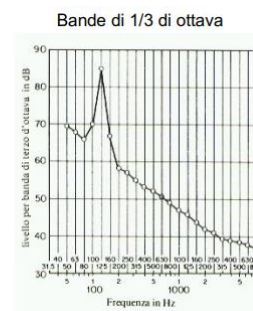
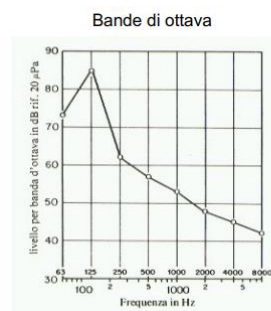
Per $n = 3 \rightarrow$ Bande di 1/3 di ottava:

$$\frac{f_2}{f_1} = \sqrt[3]{2} = 1,2599 \quad f = \sqrt[3]{2} f_1 = 1,1225 f_1 \quad \frac{\Delta f}{f} = 0,2316$$

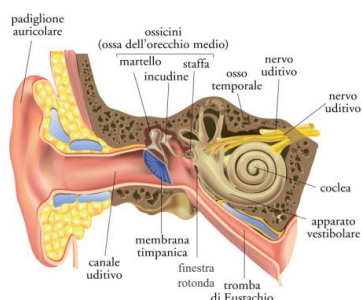
La suddivisione in bande di ottava è una delle più utilizzate in acustica e in ingegneria del suono. In questo caso, ogni banda copre un intervallo di frequenze che ha un rapporto di 2:1 (cioè, la frequenza più alta di ciascuna banda è il doppio della frequenza più bassa).

La suddivisione in bande di terzo di ottava è una suddivisione più fine rispetto alle bande di ottava. In questo caso, ogni banda ha una larghezza che è un terzo della larghezza della banda di ottava, quindi la differenza tra la frequenza più bassa e quella più alta di ogni banda è di un fattore di circa 1.414.

frequenza centrale	terzi d'ottava		ottave	
	frequenza inferiore	frequenza superiore	frequenza inferiore	frequenza superiore
Hz	Hz		Hz	
16	14	18	11	22
20	18	22		
25	22	28		
31,5	28	36	22	45
40	36	45		
50	45	57		
63	56	71	45	89
80	71	89		
100	90	112		
125	112	140	90	180
160	140	180		
200	180	224		
250	224	280	180	355
315	280	355		
400	355	450		
500	450	560	355	710
630	560	710		
800	710	900		
1000	900	1120	710	1400
1250	1120	1400		
1600	1400	1800		
2000	1800	2240	1400	2800
2500	2240	2800		
3150	2800	3550		
4000	3550	4500	2800	5600
5000	4500	5600		
6300	5600	7100		
8000	7100	9000	5600	11200
10000	9000	11200		
12500	11200	14000		
16000	14000	18000	11200	22400
20000	18000	22400		



PERCEZIONE DEL SUONO

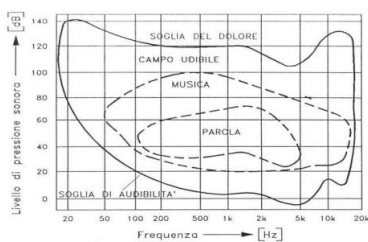


La percezione del suono è un processo che coinvolge sia il sistema uditivo che il cervello. Ecco i passaggi principali:

1. Raccolta del suono: Il padiglione auricolare raccoglie le onde sonore e le indirizza verso il canale uditivo esterno.
2. Vibrazione del timpano: Le onde sonore colpiscono il timpano, facendolo vibrare. La vibrazione dipende dalla pressione e dalla frequenza del suono.
3. Amplificazione e trasmissione delle vibrazioni: Le vibrazioni vengono trasmesse attraverso gli ossicini (martello, incudine e staffa) nell'orecchio medio, che le amplificano.
4. Trasduzione nel sistema liquido della coclea: Le vibrazioni arrivano nella coclea, dove il movimento del liquido stimola le cellule ciliate sulla membrana basilare. Le cellule ciliate sono specializzate nel rispondere a specifiche frequenze sonore.
5. Generazione di impulsi elettrici: Le cellule ciliate trasformano il movimento del liquido in impulsi elettrici.
6. Trasmissione degli impulsi elettrici: Gli impulsi elettrici vengono inviati attraverso il nervo uditivo al cervello.
7. Elaborazione e percezione del suono: Il cervello elabora questi impulsi nella corteccia uditiva e interpreta le informazioni relative alla frequenza, intensità, durata e localizzazione del suono.

Il campo di udibilità (o range uditivo) rappresenta l'intervallo di frequenze e intensità sonore che l'orecchio umano è in grado di percepire. Questo campo varia da persona a persona, ma esistono delle medie generali che sono utili per descrivere la capacità uditiva umana.

Si può suddividere in due aspetti principali:



- Frequenze udibili: l'intervallo di frequenze che l'orecchio umano è in grado di percepire.
- Intensità sonora udibile: il range di livelli di pressione sonora che possiamo sentire, che va dal suono più debole (limite inferiore) a quello più forte (limite superiore).

L'orecchio umano è in grado di percepire un intervallo di frequenze che va all'incirca da 20 Hz a 20.000 Hz (20 kHz).

- Frequenze basse (dai 20 Hz ai 200 Hz) corrispondono a suoni come il rumore del tuono o il basso di un amplificatore musicale. Questi suoni sono più facilmente percepiti nelle frequenze basse quando sono molto forti, ma diventano meno evidenti man mano che la loro intensità diminuisce.
- Frequenze medie: La gamma media di frequenze (da 200 Hz a 2 kHz) è quella in cui l'orecchio umano è più sensibile. Queste frequenze sono particolarmente importanti per la comprensione del linguaggio umano e sono tipicamente presenti nella voce umana e nei suoni naturali.
- Frequenze alte (da 2 kHz a 20 kHz) comprendono suoni come quelli prodotti dagli strumenti musicali ad alta tonalità (ad esempio il violino, il fischio o il canto degli uccelli). Tuttavia, la sensibilità dell'orecchio per le frequenze alte diminuisce con l'età, soprattutto dopo i 25-30 anni.

L'intensità sonora si misura in decibel (dB), una scala logaritmica che esprime la pressione sonora (la forza delle onde sonore) rispetto a un livello di riferimento.

- Limite inferiore dell'udibilità: La pressione sonora minima che l'orecchio umano può percepire è pari a circa 20 μ Pa (micropascal), che corrisponde a un livello di 0 dB SPL (Sound Pressure Level). Questo livello rappresenta il suono più debole che una persona media può udire in condizioni ideali (senza rumore di fondo).
- Limite superiore dell'udibilità: Il limite superiore dell'udibilità è il suono più forte che l'orecchio umano può percepire senza subire danni. Questo livello è di circa 120-130 dB SPL, che corrisponde a suoni molto forti, come quelli di un motore a reazione o di un concerto rock ad alto volume. Suoni più forti di questo livello possono provocare danno all'udito e causare perdita dell'udito permanente.

DIAGRAMMA DI UDIBILITÀ

Il diagramma di udibilità è una rappresentazione grafica che mostra il campo di udibilità dell'orecchio umano in funzione della frequenza e dell'intensità sonora. È spesso chiamato curva di isosonia e indica come la sensibilità dell'orecchio varia in base alla frequenza.

- A bassi livelli di intensità, l'orecchio è più sensibile a frequenze medio-basse (intorno a 1-4 kHz), mentre a frequenze molto basse (sotto i 100 Hz) e molto alte (oltre i 15 kHz) la sensibilità diminuisce notevolmente.
- A frequenze alte e molto basse l'orecchio umano ha bisogno di un'intensità maggiore per percepire il suono.

Questa curva di sensibilità è la base per le misurazioni sonore ponderate, come la ponderazione A (usata per misurare il rumore ambientale), che tiene conto della maggiore sensibilità dell'orecchio umano alle frequenze tra 1 e 4 kHz e della minore sensibilità alle basse e alte frequenze.

Loudness (intensità percepita) e pitch (tonalità) sono due aspetti fondamentali della percezione del suono che dipendono dalle caratteristiche fisiche delle onde sonore, ma sono interpretati dal nostro sistema uditivo in modo più complesso. Sebbene siano entrambi influenzati dalle frequenze e intensità delle onde sonore, questi concetti si riferiscono a sensazioni soggettive e non a grandezze fisiche oggettive come la frequenza e la pressione sonora.

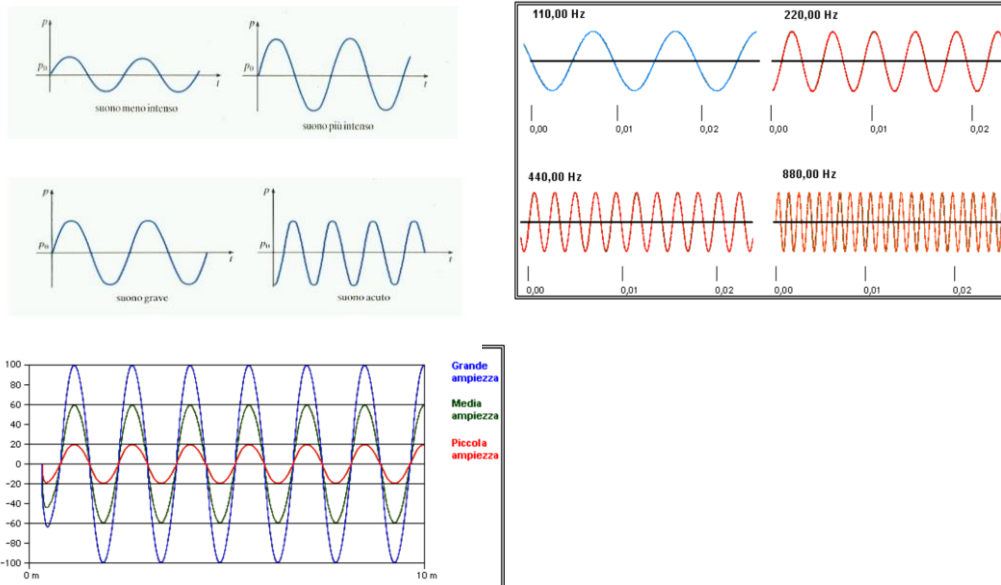
Il LOUDNESS si riferisce alla percezione della forza o intensità di un suono, ossia quanto un suono ci sembra "forte" o "debole". In termini fisici, l'intensità del suono è legata alla pressione sonora (misurata in decibel, dB), che a sua volta dipende dall'ampiezza delle onde sonore. Tuttavia, la percezione di "forte" o "debole" non corrisponde semplicemente a una misura oggettiva della pressione sonora, ma dipende anche da fattori psicofisici e dalle caratteristiche specifiche dell'onda sonora, come la frequenza e la durata.

- Legge di Weber-Fechner: La relazione tra la pressione sonora fisica e la sensazione percettiva di loudness non è lineare, ma segue una legge logaritmica. Ciò significa che un aumento di pressione sonora del 10 dB circa è percepito come un raddoppio della percezione di loudness. Tuttavia, un aumento di pressione sonora più grande potrebbe essere necessario per percepire un ulteriore raddoppiamento dell'intensità percepita.
- Dipendenza dalla frequenza: L'orecchio umano non è ugualmente sensibile a tutte le frequenze. È più sensibile alle frequenze medio-alte, tra 1.000 Hz e 5.000 Hz. Pertanto, per un suono di bassa frequenza (come il rumore di un motore) o un suono molto alto (come il suono di un fruscio), la stessa intensità fisica potrebbe essere percepita come più debole rispetto a un suono di frequenza intermedia, anche se la pressione sonora è la stessa.

Il PITCH si riferisce alla percezione della frequenza di un suono, ossia quanto un suono ci sembra "alto" o "basso". La tonalità dipende direttamente dalla frequenza delle onde sonore: suoni con frequenze più alte sono percepiti come suoni più acuti, mentre suoni con frequenze più basse sono percepiti come suoni più gravi.

- Frequenza e Pitch: In generale, il pitch è determinato dalla frequenza dell'onda sonora, che si misura in hertz (Hz). Le alte frequenze (ad esempio, 3.000 Hz e oltre) sono percepite come suoni alti (acuti), mentre le basse frequenze (ad esempio, sotto 100 Hz) sono percepite come suoni bassi (gravi).
- Relazione non lineare: La percezione del pitch non è lineare. Un aumento della frequenza di un fattore 2 (ad esempio, da 200 Hz a 400 Hz) è generalmente percepito come un raddoppio dell'altezza del suono. Tuttavia, un incremento da 2.000 Hz a 2.100 Hz non sarà percepito come lo stesso raddoppio del pitch, ma come un cambiamento minore. Perciò, la percezione del pitch segue una scala logaritmica.
- Gamma di frequenze udibili: L'orecchio umano può percepire suoni con frequenze da circa 20 Hz a 20.000 Hz. Tuttavia, la sensibilità all'interno di questa gamma non è uniforme. La nostra capacità di distinguere tonalità è migliore nelle frequenze medie, come quelle che corrispondono alla voce.

umana (circa 500 Hz – 4.000 Hz). Frequenze molto basse o molto alte sono meno facili da distinguere.



LOUDNESS DEI SUONI PURI

L'audiogramma è un grafico che rappresenta la capacità uditiva di una persona a diverse frequenze. Viene utilizzato per misurare la soglia di udibilità, ossia il livello minimo di pressione sonora che una persona può percepire in diverse frequenze. L'audiogramma viene comunemente utilizzato per diagnosticare perdite uditive e per capire come l'udito si comporta su diverse gamme di frequenze.

Le curve isofoniche (o curve di uguale livello di sensazione) sono utilizzate per rappresentare la sensibilità dell'orecchio umano a diverse frequenze a un determinato livello di percezione del suono.

In un audiogramma normale (di una persona con udito sano), le soglie di udibilità si trovano generalmente tra 0 e 20 dB SPL a tutte le frequenze comprese tra 250 Hz e 8.000 Hz, con un leggero aumento della soglia verso le frequenze basse e alte.

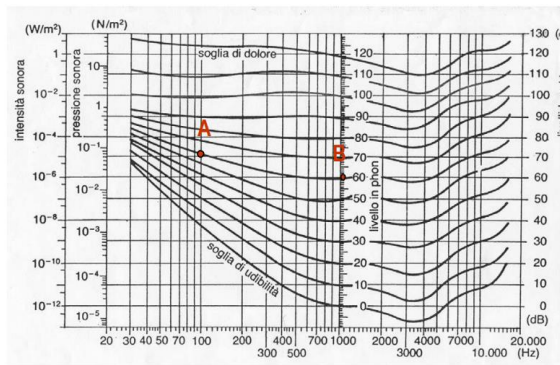
- Frequenze più basse (ad esempio, 125 Hz) sono generalmente più difficili da percepire a livelli di pressione molto bassi.
- Frequenze intermedie (come 500 Hz a 2.000 Hz) sono quelle in cui l'orecchio umano è più sensibile, cioè la soglia di udibilità è più bassa.
- Frequenze alte (sopra 4.000 Hz) tendono ad avere una soglia di udibilità leggermente più alta, ma rientrano ancora nell'intervallo di udito normale.

Le curve isofoniche rappresentano le linee di uguale sensibilità percettiva del suono (uguale "loudness") a diverse frequenze. In altre parole, una curva isofonica collega tutte le frequenze che sono percepite come aventi lo stesso livello di intensità sonora (loudness) da parte dell'orecchio umano. La soglia di percezione del suono varia con la frequenza, quindi le curve isofoniche non sono orizzontali, ma hanno una forma che varia con l'intensità e la frequenza del suono.

Le curve isofoniche vengono tracciate utilizzando il concetto di loudness percepito, che non segue una relazione lineare con la pressione sonora (dB SPL) ma dipende anche dalla frequenza. Le curve isofoniche sono simili a curve di livello sul piano logaritmico e vengono utilizzate per descrivere la sensibilità dell'orecchio umano a diverse frequenze, al variare della pressione sonora.

Le curve isofoniche sono costruite sulla base di sperimentazioni psicofisiche che valutano come gli esseri umani percepiscono la loudness a varie frequenze. Queste curve sono utili per comprendere la percezione

acustica e sono utilizzate anche per definire scale di misura del suono, come il livello di pressione sonora ponderato A (dB(A)), che tiene conto della sensibilità dell'orecchio umano.



A e B, punti ad uguale sensazione sonora

Audiogramma normale di Fletcher e Munson: curve di uguale livello di sensazione (isofoniche) –Ascolto in cuffia

Sensazione sonora: misurata in PHON, coincide con il livello di pressione sonora a 1000 Hz

L'orecchio umano è maggiormente sensibile alle frequenze comprese fra 2 e 4 KHz. A parità di sensazione, l'intensità del suono deve essere più elevata alle frequenze molto basse e molto alte.

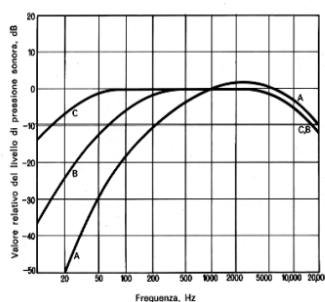
Frequenze basse (sotto 100 Hz): A basse frequenze, l'orecchio umano ha una minore sensibilità. Ciò significa che per percepire un suono a bassa frequenza come altrettanto forte di uno a frequenze più alte, è necessario che il suono a bassa frequenza abbia una maggiore pressione sonora. Ad esempio, un rumore a 50 Hz deve essere molto più forte (in termini di dB SPL) di un suono a 1 kHz per essere percepito come altrettanto forte.

Frequenze medio-basse (100 Hz – 1 kHz): L'orecchio umano ha una sensibilità maggiore in questa gamma di frequenze. I suoni in questo intervallo sono facilmente percepibili anche a bassissimi livelli di intensità sonora (dB SPL). Per esempio, una voce umana o il suono di un tamburo rientrano in questa gamma.

Frequenze medio-alte (1 kHz – 5 kHz): Questa è la gamma in cui l'orecchio umano è più sensibile, ed è la zona delle frequenze più rilevanti per la voce umana. Un suono a 3 kHz, per esempio, è percepito come più forte rispetto a un suono con la stessa pressione sonora a frequenze più basse o più alte. L'orecchio è particolarmente sensibile a queste frequenze, che corrispondono anche a molte delle frequenze dominanti nei linguaggi parlati.

Frequenze alte (oltre 10 kHz): La sensibilità diminuisce ancora nelle alte frequenze (superiori a 10 kHz). Sebbene l'orecchio umano possa percepire frequenze così alte, la soglia di udibilità cresce notevolmente. A frequenze molto alte, l'orecchio ha bisogno di suoni con maggiore pressione sonora per percepire la stessa intensità.

Sono stati proposti svariati metodi per valutare la loudness di rumori. Il metodo più utilizzato si basa sulle curve di ponderazione in frequenza, che riproducono in modo semplificato l'andamento delle curve isofoniche



Curva "A" riproduce l'isofonica 40 phon;
dovrebbe essere utilizzata per
SPL < 55 dB

Curva "B" riproduce l'isofonica 70 phon;
dovrebbe essere utilizzata per
55 ≤ SPL < 85 dB

Curva "C" riproduce l'isofonica 100 phon;
dovrebbe essere utilizzata per
SPL ≥ 85 dB

La ponderazione A è la più usata per simulare la percezione del loudness dell'orecchio umano nelle situazioni quotidiane, poiché tiene conto della minore sensibilità alle basse frequenze (sotto i 100 Hz) e alle alte

frequenze (sopra i 10 kHz). La curva A riduce fortemente l'influenza delle frequenze basse e alte, ponderando più le frequenze medie (intorno a 1-4 kHz), che sono quelle a cui l'orecchio è più sensibile.

La ponderazione B è stata usata in passato, ma oggi è meno comune rispetto alla A. È progettata per riflettere una sensibilità maggiore alle frequenze medie rispetto alla A, ma meno accentuata. È simile alla A, ma più lineare tra 500 Hz e 10 kHz.

La ponderazione C è usata per misurare rumori ad alta intensità, come quelli generati da motori o macchinari industriali. Questa curva ha una più bassa riduzione nelle frequenze basse, ed è simile alla curva di sensibilità dell'orecchio umano alle frequenze elevate;

Banda	A	B	C
16	-56.7	-28.5	-8.5
31.5	-39.4	-17.1	-3.0
63	-26.2	-9.3	-0.8
125	-16.1	-4.2	-0.2
250	-8.6	-1.3	0.0
500	-3.2	-0.3	0.0
1000	0.0	0.0	0.0
2000	1.2	-0.1	-0.2
4000	1.0	-0.7	-0.8
8000	-1.1	-2.9	-3.0
16000	-6.6	-8.4	-8.4

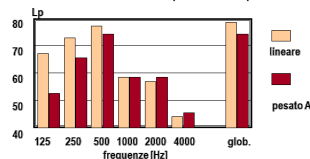
LIVELLO SONORO GLOBALE LINEARE

$$L_{LIN} = 10 \cdot \log \left[10^{\frac{L_{125}}{10}} + 10^{\frac{L_{250}}{10}} + \dots + 10^{\frac{L_{4000}}{10}} \right]$$

LIVELLO SONORO GLOBALE PONDERATO

$$L_{POND} = 10 \cdot \log \left[10^{\frac{L_{125}^*}{10}} + 10^{\frac{L_{250}^*}{10}} + \dots + 10^{\frac{L_{4000}^*}{10}} \right]$$

con: $L_{125,250,\dots}^*$ = Livello sonoro ponderato per ciascuna banda di frequenze

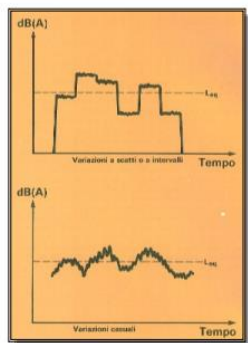


Il livello continuo equivalente è una misura utilizzata per rappresentare l'intensità di un rumore variabile nel tempo in modo equivalente a un rumore costante che produce lo stesso effetto sulla sensazione di loudness: è un valore che permette di descrivere in modo medio l'energia sonora di un rumore che cambia nel tempo, come se fosse un suono continuo e costante, ma con lo stesso impatto energetico.

L'effetto di disturbo di un suono di livello variabile può essere valutato attraverso il livello equivalente continuo:

$$L_{eq} = 10 \log \left[\frac{1}{T} \int_0^T \frac{p^2(t)}{p_{ref}^2} dt \right]$$

Il termine fra parentesi rappresenta la media temporale della potenza del segnale variabile: il livello equivalente ha dunque il significato di livello energetico medio del segnale. Il termine "short-L" si riferisce a livelli equivalenti valutati per intervalli molto brevi (< 1 s) che permettono di rappresentare l'andamento temporale del fenomeno.



Se il rumore presenta un andamento a scalini:

L_1 per il tempo δt_1

L_2 per il tempo δt_2

.....

L_j per il tempo δt_j

Il L_{eq} può essere calcolato con l'espressione:

$$L_{eq} = 10 \log \frac{1}{T} \left(\sum_{j=1}^n 10^{L_j/10} \delta t_j \right)$$

Dove: $T = \sum_{j=1}^n \delta t_j$

ACUSTICA DEGLI SPAZI CHIUSI

L'acustica degli spazi chiusi si occupa dello studio del comportamento del suono in ambienti confinati, come stanze, sale da concerto, teatri, uffici e edifici in generale. In questi contesti, diversi fattori, come la forma dell'ambiente, il materiale delle pareti, la presenza di arredi, e l'interazione tra il suono e le superfici influenzano in modo significativo la percezione acustica.

Le **SORGENTI SONORE** (O ACUSTICHE) sono generalmente costituite da corpi solidi vibranti o da fluidi in movimento. Esse sono caratterizzate in termini di:

- Potenza acustica W , che rappresenta l'energia trasmessa dalla sorgente al campo acustico nell'unità di tempo
- Spettro in frequenza
- Direttività

PROPAGAZIONE IN CAMPO LIBERO

La propagazione in campo libero si verifica negli SPAZI APERTI IN ASSENZA DI OSTACOLI. In questo caso, il suono è emesso da una sorgente puntiforme S di potenza e direttività assegnate.

In assenza di dissipazione (campo libero ideale), l'intensità acustica nel punto R può essere calcolata come:



$$I = \frac{QW}{4\pi r^2}$$

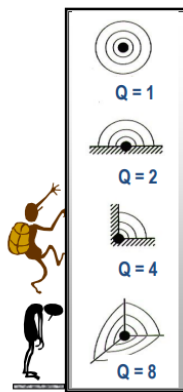
I = intensità acustica nel punto R
 r = distanza sorgente-ricevitore
 W = potenza acustica della sorgente S
 Q = fattore di direttività

La propagazione in un campo libero è tipica delle camere anecoiche.

Una camera anecoica è una stanza progettata per ridurre al minimo le riflessioni sonore. Queste stanze sono dotate di pareti fonoassorbenti e di pavimenti a struttura smorzante, che assorbono quasi tutta l'energia sonora, creando una condizione di campo libero ideale.

Situazione	Fattore di direttività Q	Indice di direttività ID (dB)
Spazio libero	1	0
Sorgente posta su una superficie riflettente	2	3
Sorgente posta all'incrocio di due superfici riflettenti	4	6
Sorgente posta all'incrocio di tre superfici riflettenti	8	9

$$I = Q \cdot \frac{W}{4\pi r^2} \quad [W/m^2]$$



La direttività si riferisce alla distribuzione dell'energia sonora in funzione della direzione di propagazione. Le sorgenti sonore possono avere:

- direttività omnidirezionale: il suono viene emesso in tutte le direzioni con la stessa intensità, come nel caso di una piccola sorgente puntiforme.
- direttività direzionale: il suono è emesso preferenzialmente in una direzione specifica. Questo è tipico di altoparlanti direzionali o strumenti musicali (come un trombone o una chitarra), che concentrano l'energia sonora in una particolare zona dello spazio.

La direttività dipende dalle caratteristiche della sorgente (ad esempio, la forma e le dimensioni di un altoparlante) e influisce sulla distribuzione del suono nell'ambiente. Un suono diretto verso una superficie riflettente può creare riflessioni che alterano la percezione del suono in una stanza.

Il LIVELLO DI PRESSIONE SONORA (SPL) IN UN CAMPO LIBERO dipende dalla distanza dalla sorgente e dalla potenza sonora emessa. In un campo libero ideale, l'intensità del suono decresce con il quadrato della distanza dalla sorgente, e il livello di pressione sonora diminuisce di 6 dB ogni volta che la distanza raddoppia.

ACUSTICA DEGLI EDIFICI

L'acustica degli edifici si occupa principalmente di due temi:

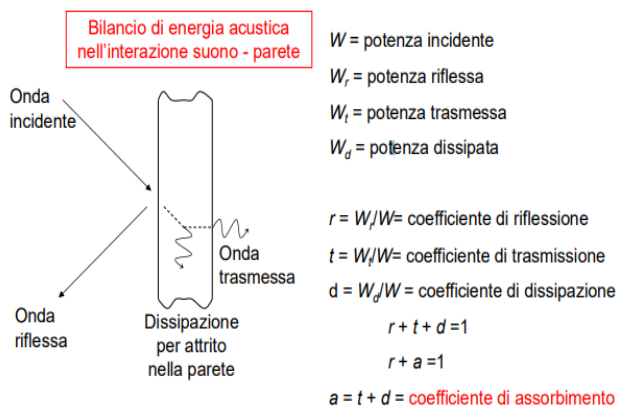
- problemi di fonoassorbimento (correzione acustica delle sale): studio dei rivestimenti delle pareti al fine di ottenere condizioni adeguate di ascolto della parola e/o della musica.
- problemi di fonoisolamento: protezione dell'ambiente abitato dall'influenza negativa del rumore proveniente dall'esterno, dalle u.i. adiacenti, oppure dagli impianti.

In particolare:

- non necessariamente i materiali idonei per la correzione acustica delle sale hanno buone proprietà di fonoisolamento e viceversa.
- A maggior ragione, l'isolamento termico delle pareti richiede materiali che non sempre contribuiscono all'isolamento acustico, né tantomeno alla correzione acustica dell'ambiente interno ("isolante termoacustico" è un termine molto utilizzato, ma fuorviante !!!!)

INTERAZIONE SUONO PARETE

Quando un'onda sonora incontra una parete, ci sono tre possibili interazioni:



1. RIFLESSIONE: parte dell'energia sonora si riflette dalla parete. Se la parete è dura e non porosa, la riflessione sarà maggiore.
2. ASSORBIMENTO: se la parete è costituita da materiali assorbenti, una parte dell'energia del suono viene assorbita. Ad esempio, una parete di gomma o di materiale acustico assorbe il suono, riducendo il livello di riflessione.
3. TRASMISSIONE: parte dell'energia sonora può passare attraverso la parete, soprattutto se la parete non è completamente solida, come nel caso di una parete sottile o di una finestra.

Assorbimento totale

$$A_{TOT} = \sum_{i=1}^k a_i \cdot S_i + \sum_{j=1}^m n_j \cdot A_j \quad [m^2]$$

a_i [-] = fattore di assorbimento dell'i-esima superficie
 S_i [m²] = area dell'i-esima superficie
 k [-] = numero di superfici
 n_j [-] = numero di unità assorbenti del j-esimo tipo
 A_j [m²] = assorbimento di una unità del j-esimo tipo
 m [-] = numero di tipi di unità assorbenti

Assorbimento medio

$$a_m = \frac{\sum a_i \cdot S_i + \sum n_j \cdot A_j}{\sum S_i}$$

VALORI DI ASSORBIMENTO ACUSTICO DI PERSONE E OGGETTI A_j [m²]
(da E. Cirillo, "Acustica applicata", 1997)

	Frequenze centrali delle bande di ottava [Hz]					
	125	250	500	1000	2000	4000
Persona adulta	0,23	0,33	0,39	0,43	0,46	0,46
Ragazzo	0,20	0,30	0,35	0,38	0,42	0,42
Bambino	0,17	0,24	0,26	0,29	0,33	0,33
Persona in piedi con abbigliamento pesante	0,17	0,41	0,91	1,30	1,43	1,47
Persona in piedi con abbigliamento leggero	0,12	0,24	0,59	0,98	1,13	1,12
Persona seduta su poltrona imbottita	0,25	0,35	0,40	0,40	0,40	0,40
Musicista seduto con strumento musicale	0,60	0,95	1,06	1,08	1,08	1,08
Sedia in legno	0,02	0,02	0,02	0,04	0,04	0,03
Poltrona da teatro tappezzata in similpelle	0,04	0,13	0,22	0,17	0,16	0,11
Poltrona da teatro imbottita tappezzata in velluto	0,14	0,25	0,30	0,30	0,30	0,30

La DIFFRAZIONE è il fenomeno che si verifica quando un'onda sonora incontra un ostacolo o una fessura e curva attorno ad esso, espandendosi oltre l'ostacolo. Questo è particolarmente evidente quando l'ostacolo ha dimensioni paragonabili alla lunghezza d'onda del suono.

In spazi confinati, la diffrazione consente alle onde sonore di propagarsi oltre ostacoli (come una parete o una colonna) e diffondersi in aree che altrimenti sarebbero inaccessibili.

La diffrazione è particolarmente significativa per le basse frequenze, che hanno lunghezze d'onda più lunghe, rendendo queste frequenze più capaci di "curvare" attorno agli ostacoli.

CAMPO SONORO RIVERBERATO

Il campo riverberato si riferisce a un ambiente in cui le onde sonore si riflettono ripetutamente sulle superfici, creando una serie di riflessioni multiple che persistono nel tempo. Questo tipo di campo è caratteristico di spazi in cui il tempo di riverberazione è lungo (cioè, il suono persiste per un certo periodo dopo che la sorgente sonora si è fermata).

In genere si può fare l'ipotesi che la componente riverberante del campo sia diffusa, ovvero che l'energia ad esso associata si distribuisca uniformemente nell'ambiente. Parliamo in questo caso di campo riverberato diffuso che si riproduce in laboratorio nelle camere riverberanti

IL CAMPO DIFFUSO

Il campo diffuso è un tipo di campo sonoro in cui il suono viene uniformemente distribuito in tutte le direzioni da molte riflessioni provenienti da tutte le superfici dell'ambiente. In questo campo, le onde sonore sono molto mescolate e l'energia sonora è distribuita in modo omogeneo nello spazio.

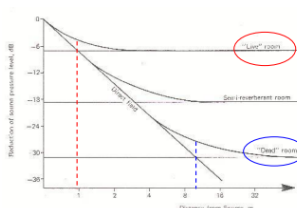
In ogni punto del campo sussistono onde piane che provengono con eguale probabilità da tutte le direzioni.

La teoria del campo diffuso è applicabile:

- in ambienti non eccessivamente assorbenti ($\alpha_m \leq 0,3 \div 0,4$);
- in ambienti con assorbimento distribuito;
- ad una distanza sufficiente sia dalle superfici dell'ambiente che dalla sorgente sonora;
- in ambienti non troppo grandi; se la sorgente non è fortemente direttiva;
- se la geometria dell'ambiente è tale da essere piuttosto compatta ma regolare (non corridoi, non ambienti bassi, etc);
- in ambienti non accoppiati;
- in presenza di elementi diffondenti anche sulle superfici.

CAMPO SONORO SEMIRIVERBERATO

Il campo sonoro in un ambiente di grande dimensione (campo sonoro semiriverberato) è costituito dalla sovrapposizione di due componenti:



Ambiente "vivo", molto riverberato (basso valore di R), d_c è piccolo: limitata estensione del campo diretto

Ambiente "sordo", molto assorbente (elevato valore di R), d_c è grande: notevole estensione del campo diretto

Si definisce distanza critica la distanza d alla quale la componente diretta e quella riverberata sono uguali. Suddivide il campo in una regione di "campo diretto" (o prossimo) e di "campo diffuso" (o riverberato)

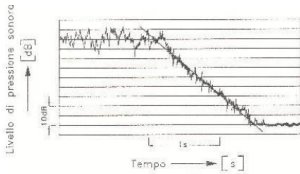
$$d_c = \sqrt{\frac{QW}{16\pi}}$$

- campo diretto, dovuto all'onda emessa dalla sorgente S che raggiunge direttamente il ricevitore R .
- campo riverberato, dovuto alle onde riflesse dalla parete.

In genere si può fare l'ipotesi che la componente riverberante del campo sia diffusa, ovvero che l'energia ad esso associata si distribuisca uniformemente nell'ambiente. Parliamo in questo caso di campo semiriverberato diffuso.

Campo libero o diretto	$I = \frac{QW}{4\pi r^2}$	$I = \frac{p^2}{\rho c}$	$L_p \cong L_i = L_w + ID - 11 - 20 \log r$
Campo riverberato	$I = \frac{W}{A_{tot}}$	$I = \frac{p^2}{4\rho c}$	$L_i = L_w - 10 \log A_{tot}$ $L_p \cong L_w - 10 \log A_{tot} + 6$
Campo semi-riverberato	$I_{DIR} = \frac{QW}{4\pi r^2}$ $I_{RIV} = \frac{W}{R}$	$I_{DIR} = \frac{p_{DIR}^2}{\rho c}$ $I_{RIV} = \frac{p_{RIV}^2}{4\rho c}$	$L_p \cong L_w + 10 \log \left(\frac{Q}{4\pi r^2} + \frac{4}{R} \right)$ NB: R è la costante acustica dell'ambiente

IL TEMPO DI RIVERBERAZIONE



Il tempo di riverberazione T_{60} può essere calcolato con la formula di Sabine:

$$T_{60} = 0,16 \frac{V}{A}$$

dove:

V = volume dell'ambiente (m^3)

$A = \sum a_i S_i = a_m S$ = area di assorbimento equivalente (m^2) o Assorbimento totale

N.B.

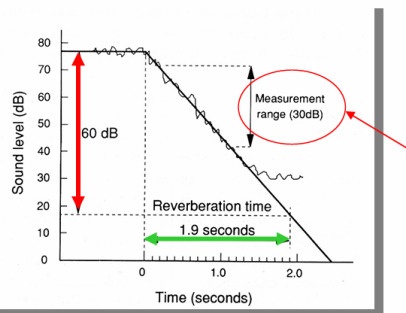
Nel calcolo di A si deve tenere conto dell'effetto di **persone e arredi**

La formula di Sabine si applica:

- ad ambienti relativamente grandi e di forma regolare
- ad ambienti non troppo "sordi" ($a_m \leq 0,4$ circa)
- con pareti che realizzano riflessioni diffuse (prive quindi di cavità o di superfici focalizzanti)

Il tempo di riverberazione è uno dei parametri fondamentali per descrivere la qualità acustica di un ambiente. Esso rappresenta il tempo che il suono impiega a decrescere di 60 decibel (dB) dal momento in cui la sorgente sonora è stata interrotta.

Esso è la quantificazione convenzionale della durata della "coda sonora". È definito come il tempo necessario affinché il livello sonoro in un punto della sala decada di 60 dB, dall'istante di spegnimento di una sorgente sonora che emette un segnale stazionario, e si indica come T_{60} .



Poiché è molto difficile in pratica ottenere un decadimento di 60 dB, la misura viene effettuata in genere su una porzione più limitata della coda sonora (ad es. di 30 dB) ed il risultato è quindi estrapolato a 60 dB.

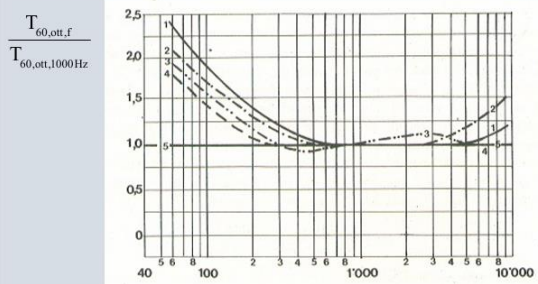
I valori di $T_{60,ott}$ sono anche spesso riferiti ad una ben precisa frequenza (in genere 500 Hz o 1 kHz):

$$T_{60,ott,1000Hz} \approx k \sqrt[3]{V}$$

$k = 0,3 \div 0,4$ per la parola

$k = 0,5 \div 0,8$ per la musica

Per le altre frequenze si ammettono valori ricavati dal grafico:



Valori ottimali di T_{60} in funzione della frequenza con riferimento al valore di 1000 Hz: (1) Mc Nair; (2) Morris e Nixon; (3) Danish Broadcasting studios (musica); (4) Richmond e Hejola; (5) (Békésy et al. (parlato)).

È possibile definire un VALORE OTTIMALE DI TEMPO DI RIVERBERAZIONE in funzione del volume della sala V e della sua destinazione d'uso, per alcune frequenze:

FONOIOLAMENTO

La TRASMISSIONE DEL SUONO può avvenire attraverso due principali modalità, entrambe rilevanti in acustica edilizia e ambientale:

- per via AEREA: il suono generato da una sorgente si propaga nell'aria sotto forma di onde sonore che incidono sulle superfici divisorie (pareti, soffitti, pavimenti). Queste onde causano vibrazioni nel materiale delle pareti, che trasmettono l'energia sonora all'ambiente adiacente, dove viene irradiata nuovamente nell'aria.
- per via STRUTTURALE: le vibrazioni meccaniche causate da urti (ad esempio, passi o colpi) o movimenti oscillatori (macchinari, elettrodomestici) si trasmettono attraverso le strutture solide di un edificio (pareti, travi, pilastri). Queste vibrazioni fanno oscillare le pareti e i pavimenti, che a loro volta irradiano parte dell'energia ricevuta sotto forma di onde sonore nell'ambiente disturbato.

MODO	DESCRIZIONE	PROCESSO	CARATTERISTICHE	PARAMETRO
aerea	il suono irradiato dalla sorgente nell'aria incide sulle pareti divisorie, si propaga attraverso di esse e da esse viene irradiato nell'ambiente disturbato	irradiazione primaria: il suono si propaga nell'aria e colpisce una parete. trasmissione attraverso il divisorio: la parete vibra a causa dell'energia sonora ricevuta. irradiazione secondaria: le vibrazioni della parete generano nuove onde sonore nell'ambiente disturbato.	la trasmissione dipende dall'isolamento acustico del materiale delle pareti. un divisorio con maggiore massa e rigidità riduce la trasmissione del suono per via aerea.	indice di isolamento acustico per via aerea: misura la capacità di una parete di ridurre il passaggio del suono per via aerea. un valore più alto indica una migliore performance.
strutturale	le vibrazioni meccaniche generate da urti o da movimenti oscillatori si trasmettono attraverso le strutture e fanno vibrare le pareti dell'ambiente disturbato che, a loro volta, irradiano parte dell'energia ricevuta nello spettro sonoro	generazione delle vibrazioni: urti o movimenti oscillatori innescano vibrazioni nelle strutture. trasmissione strutturale: l'energia vibrazionale si diffonde attraverso i materiali solidi. irradiazione sonora: le superfici strutturali che vibrano emettono onde sonore nell'ambiente circostante.	questa trasmissione è influenzata dalle proprietà elastiche e meccaniche delle strutture (massa, rigidità, smorzamento). l'uso di materiali antivibranti o giunti elastici può attenuare significativamente questo tipo di trasmissione.	indice di isolamento al rumore di calpestio: misura la capacità di un pavimento di ridurre la trasmissione del rumore da impatto. valori più bassi indicano migliori prestazioni.

POTERE FONOISOLANTE

Il potere fonoisolante di una parete, indicato come R , rappresenta la capacità della parete di attenuare il suono che la attraversa. Si misura in decibel (dB) ed è una funzione delle caratteristiche della parete e delle condizioni del suono incidente.

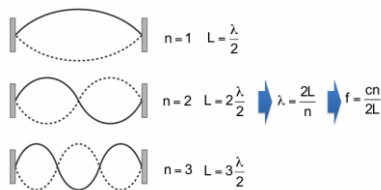
$$R = 10 \log \left(\frac{W_i}{W_t} \right) = 10 \log \left(\frac{1}{t} \right)$$

Il valore di R dipende da vari fattori:

1. Proprietà geometriche della parete:
Dimensioni e spessore: Pareti più spesse e di dimensioni maggiori tendono ad avere un potere fonoisolante più elevato.
2. Proprietà meccaniche della parete:
Massa: Secondo la Legge della Massa, il potere fonoisolante aumenta di circa 6 dB per ogni raddoppio della massa superficiale della parete.
Rigidità: Maggiore rigidità può favorire il passaggio di vibrazioni, riducendo il potere fonoisolante a basse frequenze.
Smorzamento (= rappresenta la frazione di energia dissipata in calore intrinsecamente all'elemento stesso e ceduta dall'elemento ad altri elementi a cui la parete è accoppiata): Un elevato smorzamento intrinseco riduce le vibrazioni trasmesse, migliorando l'isolamento acustico.
3. Frequenza del suono incidente:
A basse frequenze, l'isolamento è generalmente inferiore.
Nelle alte frequenze, il comportamento segue meglio la Legge della Massa.
4. Angolo di incidenza del suono:
L'angolo con cui le onde sonore colpiscono la parete influenza il comportamento dell'isolamento.
5. Condizioni di vincolo:
Vincoli strutturali della parete (giunzioni, collegamenti) possono favorire o ostacolare la trasmissione sonora.

RISONANZA

La presenza di ONDE STAZIONARIE nei pannelli reali e in strutture connesse ad altri elementi è un fenomeno che limita la propagazione di onde libere. Questo comportamento è analogo a quanto accade nelle corde di uno strumento musicale come la chitarra, in cui le onde stazionarie determinano le frequenze di vibrazione.



Quando una corda, fissata alle estremità, viene sollecitata, si generano onde stazionarie la cui lunghezza d'onda dipende dalle dimensioni della corda stessa e dal modo di vibrazione (nnn). Le condizioni al contorno (estremità fisse) impongono che in tali punti si trovino nodi (punti di ampiezza nulla).

Quando la FREQUENZA DEL SUONO INCIDENTE coincide con una delle FREQUENZE NATURALI DI RISONANZA di una parete, si verifica un'amplificazione significativa delle oscillazioni della parete. Questo fenomeno porta a una maggiore trasmissione dell'energia sonora e, quindi, a una riduzione del POTERE FONOISOLANTE alle frequenze di risonanza.

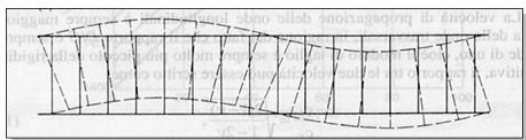
Caratteristiche della risonanza

1. AMPLIFICAZIONE DELLE OSCILLAZIONI: alla frequenza di risonanza, la parete oscilla con ampiezza molto maggiore rispetto ad altre frequenze.
2. RIDUZIONE DEL POTERE FONOISOLANTE: il potere fonoisolante diminuisce sensibilmente, poiché la parete trasmette quasi tutta l'energia sonora ricevuta.

3. FREQUENZE DI RISONANZA RILEVANTI: per pareti comuni, le frequenze di risonanza più significative sono generalmente inferiori a 100 Hz, una gamma al di sotto delle frequenze di interesse pratico per l'isolamento acustico (ad esempio, voce umana e rumori ambientali).

$$f_{m,n} = \frac{\pi s}{4} \sqrt{\frac{E}{3 \cdot \rho \cdot (1 - \sigma^2)}} \cdot \left[\left(\frac{m}{l_x} \right)^2 + \left(\frac{n}{l_y} \right)^2 \right] \quad (\text{Hz})$$

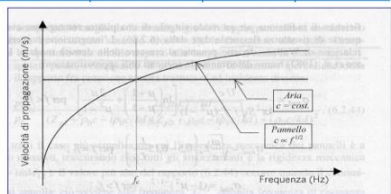
Dove: E = modulo di elasticità del materiale (N/m²)
 σ = coefficiente di Poisson del materiale
 ρ = densità (kg/m³)
s = spessore (m)
 l_x e l_y = dimensioni della parete nelle direzioni x e y
m, n = numeri interi (1,2,3,...) che rappresentano il numero di semilunghezze d'onda contenute nelle dimensioni l_x e l_y



$$c_f = \sqrt{\pi s f \sqrt{\frac{E}{3 \rho (1 - \sigma^2)}}} \quad (\text{m/s})$$

dove: f = frequenza (Hz)
E = modulo di elasticità del materiale (N/m²)
 σ = coefficiente di Poisson del materiale
 ρ = densità (kg/m³)
s = spessore (m)

MATERIALE	E N/m ²	ρ kg/m ³	σ
mattoni pieni	$2,5 \times 10^{10}$	1800	0,3
calcestruzzo	$2,6 \times 10^{10}$	2800	0,3
vetro	7×10^{10}	2500	0,23
marmo	$3,8 \times 10^{10}$	2600	0,3
gesso	$1,5 \times 10^{10}$	900	0,3
legno	$1,2 \times 10^{10}$	700	0,3
alluminio	$7,3 \times 10^{10}$	2700	0,33
piombo	$1,7 \times 10^{10}$	11300	0,43
acciaio	20×10^{10}	7800	0,29



f_c = frequenza critica (Hz)

Ogni struttura è dotata di caratteristiche elastiche; se la si colpisce o la si flette essa oscillerà per un certo tempo alle sue frequenze naturali di risonanza. Gran parte dei divisori hanno un certo numero di frequenze naturali di vibrazione, la più bassa delle quali è indicata come "FONDAMENTALE".

Le onde flessionali o bending waves sono onde elastiche generate nella parete durante il fenomeno della risonanza, la cui velocità di propagazione c non dipende esclusivamente dalle proprietà fisiche del mezzo, ma anche dalla frequenza (dalla sua radice quadrata) del moto oscillatorio che le induce.

Potere fonoisolante di una parete omogenea e isotropa in funzione della frequenza

SEZIONE	R	CAUSA	EFFETTI MITIGANTI
i	decresce di -6 db/ottava	rigidità areica	nessuno (rigidità domina)
ii	riduzione per risonanza	frequenze proprie della parete	smorzamento
iii	aumenta di +6 db/ottava	legge della massa	aumento della massa frontale
iv	decrescita per coincidenza	effetto di coincidenza tra onde sonore e flessionali	smorzamento e materiali multistrato
v	aumenta fino a +10 db/ottava	sopra la frequenza critica, la trasmissione diminuisce	spessori elevati e giunti disaccoppiati

LEGGE DELLA MASSA

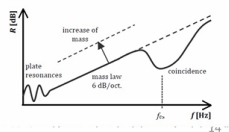
Incidenza normale $R_0 = 20 \log(fm) - 42,3$ (dB)

dove:
f = frequenza (Hz)
m = massa frontale della parete (kg/m²)

NB: raddoppiando la frequenza o la massa frontale il potere fonoisolante R aumenta di 6 dB

$R_{0,1} = 20 \log(fm) - 42,3$

$R_{0,2} = 20 \log(2fm) - 42,3 =$
 $= 20 \log 2 + 20 \log(fm) - 42,3 =$
 $= 6 + 20 \log(fm) - 42,3 = R_{0,1} + 6$



Incidenza diffusa

$R_{casuale(0^\circ-90^\circ)} = R_0 - 10 \log(0,23 R_0)$

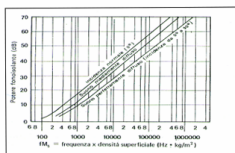
Incidenza casuale ottenuta mediando i valori dell'angolo di incidenza $\beta = 0^\circ$ e $\beta = 90^\circ$

Incidenza diffusa pratica

$R_{pratica(0^\circ-78^\circ)} \approx R_0 - 5$

$R_{pratica(0^\circ-78^\circ)} \approx 20 \log fm - 48$

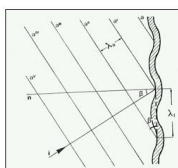
Incidenza pratica ottenuta limitando ai valori di β fra $\beta = 0^\circ$ e $\beta = 78^\circ$, per una migliore interpretazione del fenomeno reale



15

COINCIDENZA

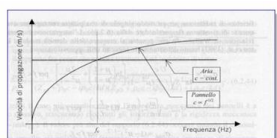
Quando un'onda piana incide obliquamente sul piano di una parete si instaurano oscillazioni flessionali (onde flessionali di lunghezza d'onda λ_f) che si propagano sul pannello medesimo



i = direzione di propagazione dell'onda sonora incidente ; n = normale alla parete; β = angolo di incidenza; λ_a = lunghezza d'onda del suono nell'aria; λ_f = lunghezza d'onda delle vibrazioni flessionali nella parete.

$c_f = \sqrt{\pi s f \sqrt{\frac{E}{3\rho(1-\sigma^2)}}}$ (m/s)

1



$c_a > c_f$ $c_a = c_f$ $c_a < c_f$

$c_a = \lambda_a f$

$c_f = \lambda_f f$

$\lambda_a > \lambda_f$ $\lambda_a = \lambda_f$ $\lambda_a < \lambda_f$

La frequenza critica f_c è quella frequenza per la quale la velocità di propagazione delle onde flessionali nella parete eguaglia la velocità di propagazione del suono nell'aria. L'effetto di coincidenza si verifica quando esistono onde acustiche incidenti che hanno lunghezza d'onda λ_a la cui componente parallela alla parete (proiettata sulla parete perpendicolarmente alla direzione di incidenza) è pari alla lunghezza d'onda $\lambda_f = l \sin \beta$ ciò avviene per $f \geq f_c (\sin \beta \leq 1)$, frequenze dette di "coincidenza", ed è dipendente dall'angolo di incidenza β

La più bassa frequenza di coincidenza, per la quale frequenza critica $\lambda f = \lambda a$, viene definita "e si ha per incidenza radente dell'onda sonora ($\beta = 90^\circ$ e $\sin \beta = 1$)

$$f_c = \frac{c^2}{\pi s} \sqrt{\frac{3\rho(1-\sigma^2)}{E}} \quad [\text{Hz}]$$

Materiale	sf_c [m Hz]
Acciaio	12,4
Alluminio	12,2
Calcestruzzo denso	$19 \pm 10\%$
Calcestruzzo leggero	$34 \pm 10\%$
Calcestruzzo poroso	$33 \pm 10\%$
Legno compensato	$20 \pm 10\%$
Ottone	17,8
Perspex	27,7
Rame	16,3
Truciolato	$23 \pm 10\%$
Vetro	12,7

ES:

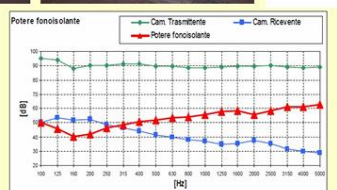
- muro di cls leggero da 8 cm, $f_c = 425$ Hz;

Misura del Potere fonoisolante a norma ISO 140-3
Laboratorio INRIM Torino

= 158 Hz;
= 1058 Hz.



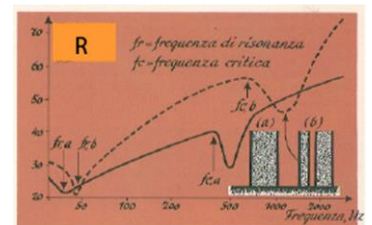
$$R = L_1 - L_2 + 10 \log \frac{S}{A_{TOT2}}$$



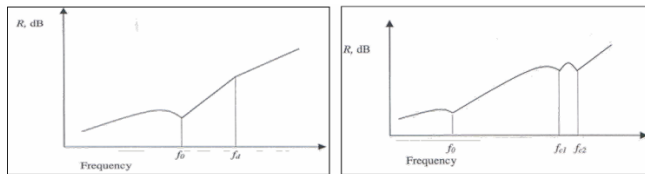
Per spostare verso le alte frequenze l'effetto di coincidenza e per aumentare il potere fonoisolante, si possono utilizzare pareti doppie separate da un'intercapedine.

Rispetto ad una parete monostrato, a parità di massa frontale, il potere fonoisolante aumenta quando le due pareti:

- Sono collegate da elementi elastico-smorzanti (per evitare la trasmissione di vibrazioni per via solida).
- Sono diverse per spessore e materiale (affinché non coincidano le loro frequenze critiche).
- Hanno interposto materiale fonoassorbente (per assorbire l'energia sonora che attraversa l'intercapedine).



POTERE FONOISOLANTE DI UNA PARETE DOPPIA COSTITUITA DA PANNELLI SEPARATI DA UN'INTERCAPEDINE D'ARIA



$f < f_0$: il sistema si comporta come una parete singola di massa areica pari a $m_1 + m_2$; R cresce di 6 dB/ottava o di 6 dB al raddoppio della massa

f_0 : risonanza massa-aria-massa

$$f_0 = 60 \sqrt{\frac{1}{d} \left(\frac{1}{m_1} + \frac{1}{m_2} \right)} \quad (\text{Hz})$$

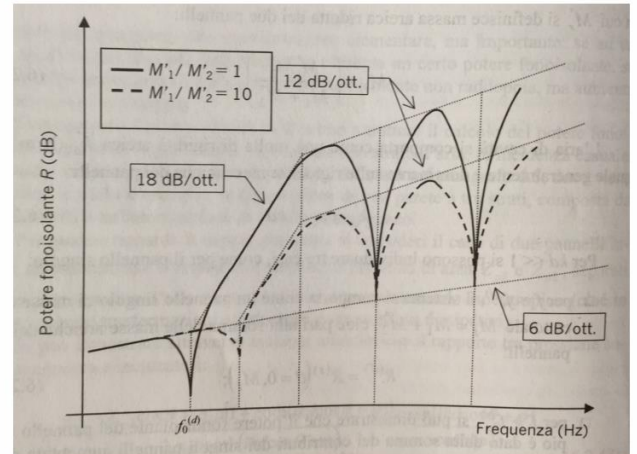
dove:
d = spessore dell'intercapedine [m]

$f_0 < f < f_d$: il secondo pannello agisce come una massa collegata elasticamente al primo funzionando da smorzatore dinamico; R cresce di 18 dB/ottava

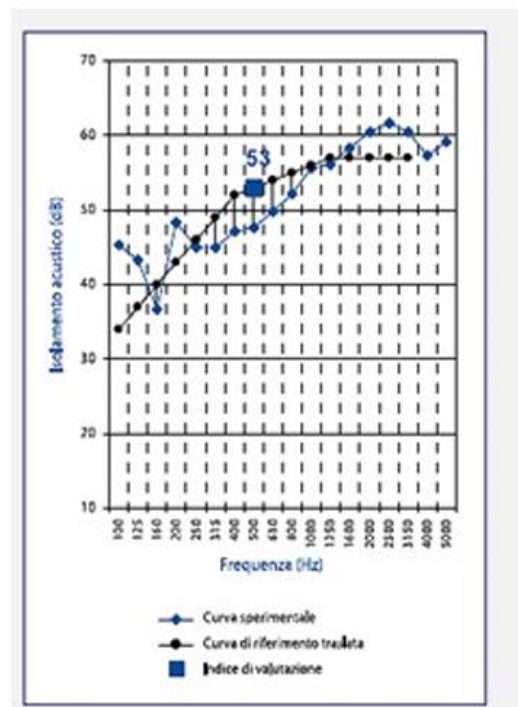
f_d : risonanza di cavità; occorre ogni volta che lo spessore dell'intercapedine è multiplo della semilunghezza d'onda; $f = nc/2d$, con $n = 1, 2, \dots$

$f > f_d$: R cresce di 12 dB/ottava

Per frequenze più elevate di f_0 intervengono inoltre i fenomeni di coincidenza (f_{c1}, f_{c2})²⁴



DETERMINAZIONE DELL'INDICE DI VALUTAZIONE DEL POTERE FONOISOLANTE E DELL'ISOLAMENTO ACUSTICO (UNI 717-1)



(R_w, R'_w, \dots)

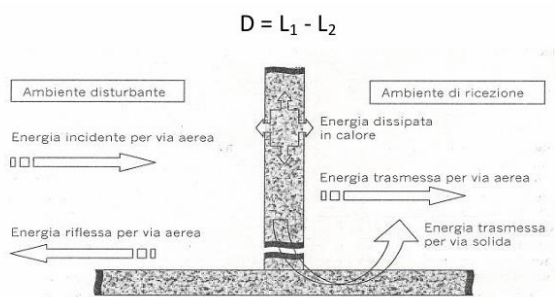
La procedura prevede di far scorrere la curva di riferimento per passi di 1 dB rispetto alla curva sperimentale di $R, R', D_{2m,0.05}$, etc., fino a quando la somma degli scarti sfavorevoli (si hanno quando il risultato sperimentale è inferiore al valore di riferimento), diventa più grande possibile, ma non superiore a 32 dB, per misurazioni effettuate in 16 bande di un terzo d'ottava, o a 10 dB, per misurazioni effettuate in 5 bande di ottava. Quando si verifica questa condizione il valore dell'indice di valutazione si legge sulla curva di riferimento in corrispondenza della frequenza di 500 Hz.

POTERE FONOISOLANTE DI DIVISORI

tipo di divisorio	potere fonoisolante (in dB) alle frequenze (Hz)						R_w^*
	125	250	500	1000	2000	4000	
parete di mattoni pieni intonacata (spessore 12 cm, peso 220 kg/m ²)	34	35	40	50	55	57	45
id. (spessore 24 cm, peso 440 kg/m ²)	40	44	50	56	57	57	54
parete di mattoni forati (spessore 28 cm)	37	43	52	60	64	65	57
parete in calcestruzzo intonacata (spessore 18 cm, peso 440 kg/m ²)	40	42	50	58	66	68	54
parete in calcestruzzo (2 strati di 5 cm, separati da intercapedine di 2,5 cm)	37	40	44	50	56	62	49
id. (2 strati di 7,5 cm, separati da intercapedine di 7,5 cm)	37	40	50	54	56	63	52
divisorio in gesso-perlite (spessore 5 cm, peso 49 kg/m ²)	26	28	30	31	42	47	33
id. (spessore 6,3 cm, peso 107 kg/m ²)	31	30	29	35	45	52	34
tramezzo mobile	15	22	26	27	33	35	29
tramezzo mobile munito di pannelli vetrati (cristallo 7+9 mm di spessore)	17	20	25	24	28	28	26
tramezzo mobile munito di pannelli vetrati con doppio cristallo (2 lastre uguali, distanti 1 cm)	17	20	23	33	33	33	25
tramezzo mobile munito con doppio cristallo (2 lastre di diverso spessore, distanti 4 cm)	22	27	30	30	36	38	32
id. con porta	20	22	27	30	30	35	30
doppia finestra	16	24	36	50	54	58	36

* Indice di valutazione del Potere Fonoisolante

ISOLAMENTO ACUSTICO FRA AMBIENTI ADIACENTI



Si consideri la trasmissione del suono fra un ambiente emettente 1 (ambiente DISTURBANTE) e un ambiente ricevente 2 (ambiente DISTURBATO).

Si definisce ISOLAMENTO ACUSTICO fra 1 e 2 la differenza fra i livelli di pressione sonora misurati nei due ambienti:

$$D = L_1 - L_2$$

La trasmissione del suono avviene in realtà sia per via aerea attraverso la parete divisoria, sia per via solida (trasmissione laterale, o di fiancheggiamento).

Se si trascurano le trasmissioni laterali, è possibile esprimere il potere fonoisolante R della parete divisoria, di area S , in funzione dell'isolamento acustico D (misurato) e dell'area di assorbimento acustico dell'ambiente ricevente A_2 .

$$R = D + 10 \log \frac{S}{A_2}$$

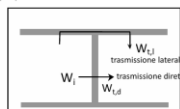
L'area di assorbimento acustico dell'ambiente ricevente A_2 si calcola con la formula di Sabine in funzione del volume V e del tempo di riverberazione dell'ambiente ricevente T_2

$$R' = 10 \log \frac{1}{r'} = 10 \log \frac{W_i}{W_{t,d} + W_{t,l}}$$

Dove: W = potenza sonora incidente sul divisorio

$W_{t,d}$ = potenza sonora trasmessa attraverso il divisorio

$W_{t,l}$ = potenza sonora trasmessa attraverso gli elementi laterali



NB: L'apice posto vicino al termine R indica la misura della grandezza in opera, dove sono presenti le trasmissioni attraverso gli elementi laterali.

NB: Il potere fonoisolante apparente R' è sempre minore del potere fonoisolante. Nel caso di tipologie costruttive convenzionali:

$$R' = R - (2 \div 4) \text{ dB}$$

Le formule sopra riportate sono alla base della misura di laboratorio del potere fonoisolante, nelle quali è possibile eliminare le trasmissioni laterali. Le formule possono essere applicate anche a misure in opera, in cui le trasmissioni laterali sono sempre presenti: in questo caso si ottiene il cosiddetto "POTERE FONOISOLANTE APPARENTE" R' della parete.

TRASMISSIONE DEL SUONO PER VIA STRUTTURALE: IL RUMORE DI CALPESTIO

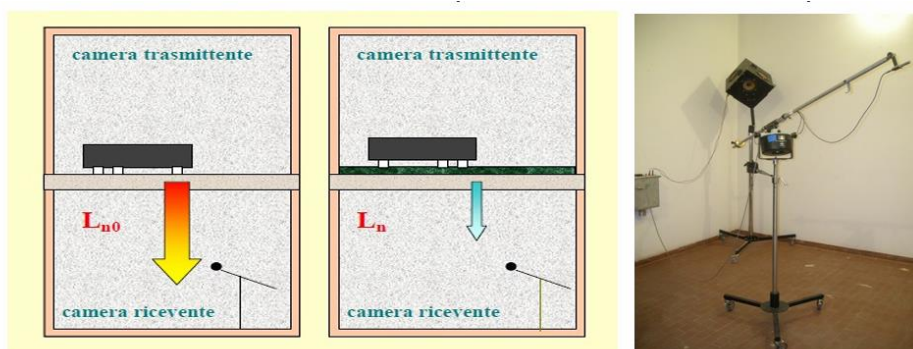
Oltre al potere fonoisolante relativo alla trasmissione per via aerea, in acustica edilizia si considera anche un altro importante indice: il livello di rumore di calpestio.

La misura viene effettuata ponendo, nella camera emettente (sovrastante) una "macchina normalizzata di calpestio" e misurando il livello di rumore indotto nella camera ricevente (sottostante).

Si osservi che, mentre nel caso del rumore trasmesso per via aerea un valore elevato dell'indice (potere fonoisolante) denota un'elevata prestazione del componente, nel caso del calpestio un valore elevato dell'indice (livello di rumore di calpestio) una bassa prestazione del componente.

Il grado di isolamento di un orizzontamento dai rumori «impattivi» si valuta attraverso IL LIVELLO DI PRESSIONE SONORA DI CALPESTIO L_n (dB) definito come il livello medio di pressione sonora nell'ambiente disturbato quando sul pavimento di quello disturbante agisce un generatore di calpestio normalizzato.

MISURA IN LABORATORIO A NORMA UNI 16251-1 DELL'ATTENUAZIONE DEL LIVELLO DI PRESSIONE SONORA DI CALPESTIO



$$L_n = L_i + 10 \log \frac{A}{A_0} \quad (\text{dB})$$

$$\Delta L = L_{n0} - L_n \quad (\text{dB})$$

ΔL = attenuazione del livello di pressione sonora di calpestio, dB

L_{n0} = livello di pressione sonora senza rivestimento

L_n = livello di pressione sonora con rivestimento

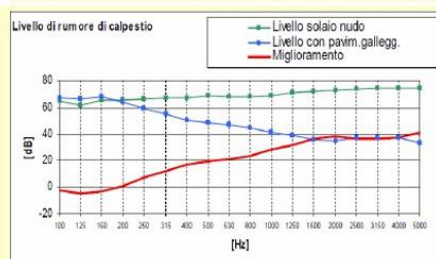
A = area di assorbimento equivalente, m^2

A_0 = area di riferimento (10 m^2)

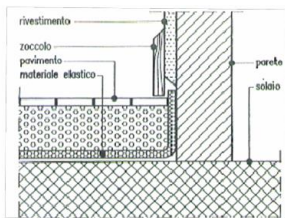


36

MISURA DEL LIVELLO DI PRESSIONE SONORA DI CALPESTIO NEL LABORATORIO INRIM DI TORINO



SOLUZIONI PER L'ISOLAMENTO ACUSTICO DAI RUMORI DI CALPESTIO

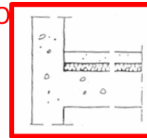


PAVIMENTI GALLEGGIANTI



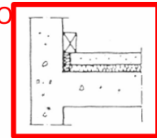
interposizione di materiale elastico tra solaio e pavimento

NO



Assenza di risvolti dello strato elastico in corrispondenza delle pareti verticali

NO



Scorretto posizionamento del battiscopa

SI

SI

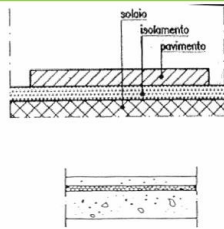
NO



posizionamento non teso e presentante dei vuoti nel materassino elastico

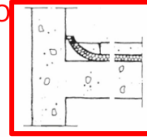
interruzione dello strato elastico

SI



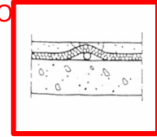
38

NO



Riduzione dello spessore del massetto

NO



Scorretto posizionamento degli impianti

SI

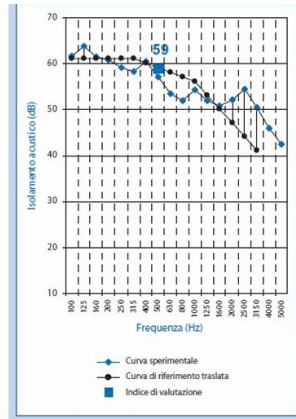
SI

DETERMINAZIONE DELL'INDICE DI VALUTAZIONE DEL LIVELLO DI PRESSIONE SONORA DI CALPESTIO NORMALIZZATO (UNI 717-2)

La procedura prevede di far scorrere la curva di riferimento per passi di 1 dB rispetto alla curva sperimentale di $L_{n,w}$, $L'_{n,w}$, $L'_{nT,w}$, fino a quando la somma degli scarti sfavorevoli (si hanno quando il risultato sperimentale è superiore al valore di riferimento), diventa più grande possibile, ma non superiore a 32 dB, per misurazioni effettuate in 16 bande di un terzo d'ottava, o a 10 dB, per misurazioni effettuate in 5 bande di ottava. Quando si verifica questa condizione il valore dell'indice di valutazione si legge sulla curva di riferimento in corrispondenza della frequenza di 500 Hz.

NB: Le misurazioni in bande di ottava sono previste solo per $L'_{n,w}$ e $L'_{nT,w}$, e in questo caso l'indice di valutazione ottenuto secondo il metodo specificato deve essere ridotto di 5 dB.

⁽¹⁾ $L_{n,w}$ rappresenta l'indice di valutazione del livello di pressione sonora di calpestio normalizzato, ottenuto da misure in laboratorio secondo la norma UNI EN ISO 140-6.

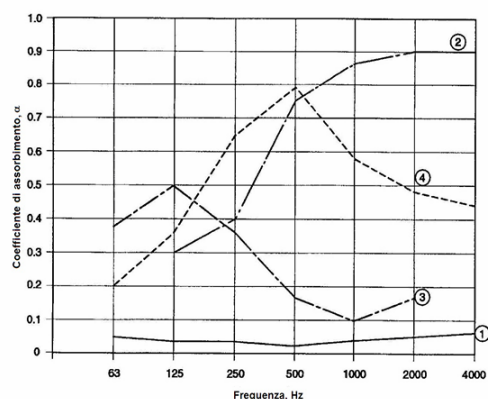


NB: L'indice di valutazione dell'attenuazione di livello di pressione sonora di calpestio, ΔL_w , si ottiene rapportando i valori misurati di ΔL ad un solaio di riferimento come descritto nella norma UNI 717-2.

I MATERIALI FONOASSORBENTI

meccanismo di dissipazione	tipo di materiale
assorbimento per porosità	materiali porosi a struttura cellulare o fibrosa espansi a cella aperta di origine minerale (vetro cellulare, argilla espansa) resine espanse a cella aperta (poliuretano, ecc.) fibre minerali (lana di vetro / roccia) fibre vegetali (legno mineralizzato) fibre sintetiche (poliestere)
assorbimento per risonanza di membrana	pannelli vibranti: - lastre in legno - lastre in gesso
assorbimento per risonanza di cavità	risuonatori acustici (pannelli forati a parete o controsoffitto): legno, gesso e metallo

ANDAMENTO IN FREQUENZA DI « α »



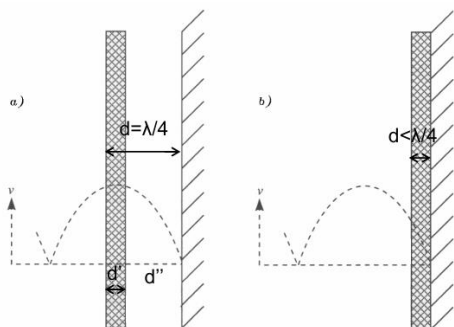
- ① Pannello di gesso rivestito su parete
 ② Materiale poroso (50 mm fibra minerale, 50 kg/m³; l'assorbimento non viene significativamente diminuito se tale pannello è protetto da un pannello perforato con almeno il 30% di area aperta)
 ③ Pannello vibrante (pannello 9 mm di spessore, 50 mm di intercapedine contenente 25 mm di fibra minerale)
 ④ Pannelli forati / assorbimento per risonanza di cavità (14% di foratura, 25 mm di intercapedine contenente fibra minerale)

MATERIALI FONOASSORBENTI POROSI

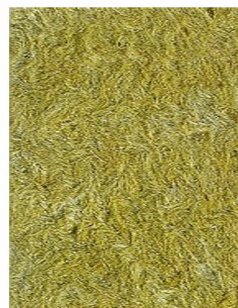
I pori del materiale devono essere aperti e collegati fra loro.

In prossimità di una parete rigida il maggiore fonoassorbimento si avrà dove la velocità di oscillazione delle particelle è massima. Il primo punto corrispondente al massimo della velocità si troverà ad una distanza dalla parete pari a $d = \lambda/4$. Uno strato fonoassorbente di spessore d assorbirà con efficacia tutte le onde sonore per cui $d > \lambda/4$ o $\lambda < 4d$.

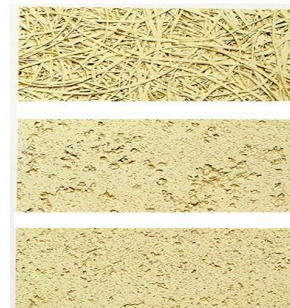
Se tra lo strato fonoassorbente di spessore d' e la parete si trova un'intercapedine di spessore d'' saranno assorbite con efficacia le onde con $d > \lambda/4$ o λ .



Maggiore (a) o minore (b) efficienza nell'installazione di materiale fonoassorbente poroso su parete rigida.

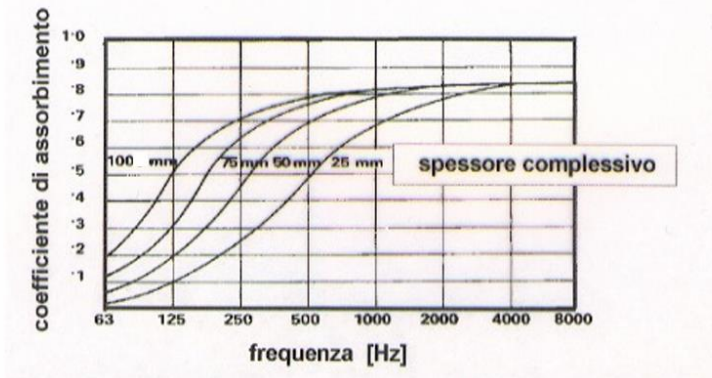


lana di roccia

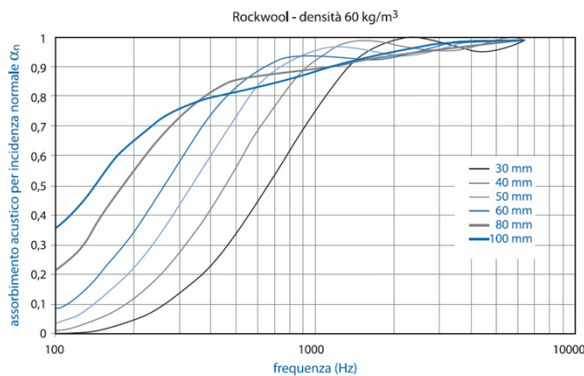


fibra di legno mineralizzata

COEFFICIENTE DI ASSORBIMENTO DI UN PANNELLO FONOASSORBENTE IN FUNZIONE DELLA FREQUENZA E DELLO SPESSORE



Per frequenze superiori alla frequenza per cui si ottiene lo spessore ottimale d il coefficiente di assorbimento acustico è ~ costante

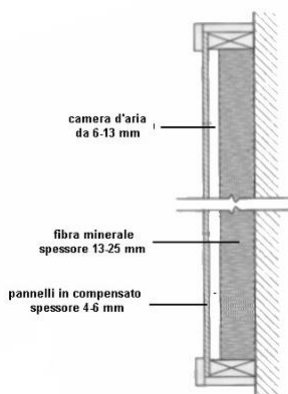
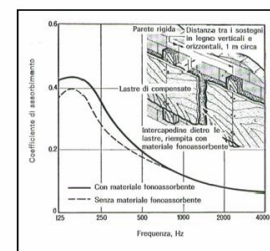
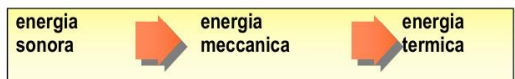


Influenza dello spessore sull'assorbimento acustico di un pannello in lana di roccia con densità pari a 60 kg/m³

ELEMENTI O STRUTTURE FONOASSORBENTI: I PANNELLI VIBRANTI

Sono strutture formate da fogli di materiale non poroso di spessore sottile (compensato, tela gommata, polietilene, ecc.) posati su telai di sostegno e distanziati dalla parete da un'intercapedine di qualche centimetro.

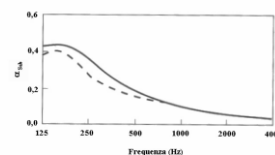
La struttura si comporta come una massa vibrante (pannello) collegata ad un sostegno rigido (parete) tramite un elemento elastico (aria nell'intercapedine). La dissipazione dell'energia sonora avviene per deformazione del pannello e del volume d'aria retrostante.



Per un TIPICO PANNELLO VIBRANTE MONTATO A PARETE l'assorbimento è massimo alla frequenza di risonanza del sistema pannello-aria. Il parziale riempimento dell'intercapedine con materiale assorbente poroso determina lo smorzamento delle vibrazioni del pannello con conseguente incremento del potere fonoassorbente.

$$f_0 = 60 \cdot \sqrt{\frac{1}{m \cdot d}} \quad [\text{Hz}]$$

dove: m [kg/m²] = massa frontale del pannello
 d [m] = spessore dell'intercapedine



Spettro di assorbimento di un pannello vibrante di legno compensato dello spessore di 4,6 mm installato a 51 mm di distanza dalla parete con e senza materiale fonoassorbente poroso nell'intercapedine. La linea continua si riferisce al pannello con il materiale poroso nell'intercapedine, la linea tratteggiata, senza il materiale poroso nell'intercapedine

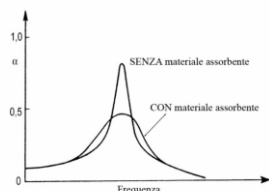
RISUONATORE ACUSTICO



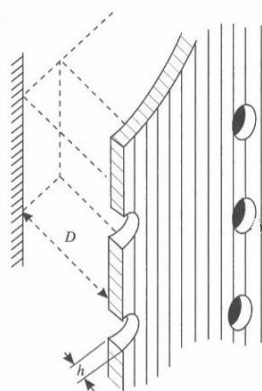
$$f_0 = \frac{c}{2\pi} \sqrt{\frac{S}{V(l + 0.8d)}} \text{ Hz,}$$

Un risonatore acustico è costituito da una cavità che comunica con l'esterno attraverso un foro o una fenditura (collo del risonatore) per lo più a sezione circolare. Se le dimensioni del risonatore sono piccole rispetto alla lunghezza d'onda del suono incidente e se il collo è abbastanza piccolo rispetto alla cavità, l'aria nel collo si comporta come una massa oscillante e l'aria nella cavità come un elemento elastico.

Andamento in frequenza del coefficiente di assorbimento acustico a dei risonatori con o senza l'aggiunta di materiale fonoassorbente poroso all'interno della cavità



SCHEMA DI PANNELLO FORATO RISONANTE



$$f_0 = \frac{c}{2\pi} \sqrt{\frac{p}{Dh}} \text{ Hz,}$$

p = percentuale di foratura (area forata/area del pannello).

Valori del coefficiente di assorbimento acustico di un pannello forato risonante di legno compensato dello spessore di 13 mm con fori del diametro di 4,8 mm e diverse percentuali di foratura, a 6 cm da una parete, con l'intercapedine riempita di materiale fonoassorbente poroso

