

1. Indici di valutazione e metodologie di misura in opera delle prestazioni fonoisolanti degli elementi di involucro edilizio. Normativa acustica di riferimento per i requisiti di fonoisolamento.

Le misurazioni devono essere effettuate nell'ambiente nel quale il livello di rumore è più elevato che non coincide con l'ambiente in cui viene generato il rumore.

Potere fonoisolante apparente R' → $R' = L_1 - L_2 + 10 \log S / A_{tot}$

S = superficie partizione; A_{tot} = assorbimento totale

↓

Indice di valutazione del potere fonoisolante apparente R'_w → confronto con i valori limite del DPCM 5/12/19

R'_w (dB) = indice del potere fonoisolante apparente di partizioni fra ambienti

Collaudo:

- 1) Misurazione di L_1 e L_2 (isolamento acustico $D = L_1 - L_2$) in più punti dell'ambiente ricevente e emittente;
- 2) Misurazione del tempo di riverberazione T nell'ambiente ricevente in bande di 1/3 di ottava e calcolo dell'assorbimento totale $A_{tot} = 0,16 V / T_r$

Isolamento acustico normalizzato rispetto al tempo di riverberazione $D_{2m, nT}$

→ $D_{2m, nT} = D_{2n} + 10 \log T / T_0$

T_0 = tempo di riverberazione di riferimento = 0,5

↓

Indice dell'isolamento acustico di facciata $D_{2m, nT, w}$ → confronto con i valori limite del DPCM 5/12/19

$D_{2m, nT, w}$ (dB) = indice dell'isolamento acustico di facciata normalizzato rispetto al tempo di riverberazione
Collaudo: si utilizza come sorgente rumorosa un altoparlante inclinato a 45° a 7m dalla facciata e un fonometro a 2m in corrispondenza del baricentro della facciata.

- 1) Misurazione di L_1 e L_2 in 5 punti diversi nell'ambiente ricevente ed emittente; Isolamento acustico $D_{2m} = L_{1,2m} - L_2$ valutato con rumore stazionario con L_1 a una distanza di 2m dalla facciata;
- 2) Misurazione del Tempo di riverberazione nell'ambiente ricevente in bande di 1/3 di ottava.

Livello di pressione sonora di calpestio normalizzata rispetto all'assorbimento acustico L'_n

$L'_n = L_i + 10 \log A / A_0$

' = esistono trasmissioni laterali; A_0 = area di assorbimento equivalente = 10mq

↓

Indice di valutazione del livello pressione sonora di calpestio $L'_{n,w}$ → confronto con i valori limite del DPCM 5/12/19

$L'_{n,w}$ (dB) = indice di livello di rumore di calpestio di solai normalizzato rispetto all'assorbimento acustico.

Collaudo: si utilizza un generatore di calpestio (minimo in 4 punti diversi) nell'ambiente emittente e minimo 4 posizioni microfoniche con fonometro nell'ambiente ricevente;

- 1) Misurazione di L_i in più punti dell'ambiente ricevente in bande 1/3 di ottava → $L = 10 \log (1/n \sum 10^{L_i/10})$;
- 2) Misurazione del tempo di riverberazione T nell'ambiente ricevente in bande di 1/3 di ottava.

DETERMINAZIONE DELL'INDICE DI VALUTAZIONE NEL CASO DI RUMORE PER VIA AEREA (UNI EN ISO 717-1)

Si determinano con la procedura riportata di seguito e riguardano i termini R , R' , D_{nT} , $D_{2m, nT}$; si denotano con il pedice w.

- 1) Avvicinare la curva di riferimento alla curva sperimentale fino a quando la somma degli scarti sfavorevoli sarà più grande possibile, e comunque non maggiore di 10 dB per misurazioni in 5 bande di ottava (32 dB per misurazioni in 16 bande di 1/3 di ottava);
- 2) Leggere il valore dell'indice considerato sulla curva di riferimento, a 500 Hz.

Uno "scarto sfavorevole" si produce quando i risultati sperimentali sono minori dei valori di riferimento; si prendono in considerazione solo gli scarti sfavorevoli.

Uno "scarto sfavorevole" si produce quando i risultati sperimentali sono minori dei valori di riferimento; si prendono in considerazione solo gli scarti sfavorevoli.

DETERMINAZIONE DELL'INDICE DI VALUTAZIONE NEL CASO DI RUMORE PER VIA STRUTTURALE (UNI EN ISO 717-2)

Si determinano con la procedura riportata di seguito e riguardano i termini L_n , L'_n e L'_{nT} ; si denotano con il pedice w.

- 1) Avvicinare la curva di riferimento alla curva sperimentale fino a quando la somma degli scarti sfavorevoli sarà più grande possibile, e comunque non maggiore di 10 dB;
- 2) Leggere il valore dell'indice considerato sulla curva di riferimento, a 500 Hz, ridotto di 5 dB.

Uno "scarto sfavorevole" si produce quando i risultati sperimentali sono maggiori dei valori di riferimento; si prendono in considerazione solo gli scarti sfavorevoli.

Livello di pressione sonora impianti a funzionamento discontinuo

$L_{AS,max}$ (dB(A)) = livello massimo di pressione sonora ponderata A con costante di tempo slow del rumore prodotto dagli impianti tecnologici a funzionamento discontinuo (=impianti fissi il cui livello sonoro emesso non è costante nel tempo, sanitari ascensori ecc...)

LA= livello ponderato A; S= acquisizione con costante di tempo slow

Livello di pressione sonora impianti a funzionamento continuo

L_{Aeq} (dB(A)) = livello continuo equivalente di pressione sonora ponderata A del rumore prodotto dagli impianti tecnologici a funzione continua (ventilazione meccanica, climatizzazione ecc..)

eq= equivalente, periodo di misura molto breve; gli impianti non devono originarsi nell'ambiente medesimo.

DPCM 5/12/97: Determinazione dei requisiti acustici passivi degli edifici (individua requisiti fonoisolamento). Il decreto stabilisce un valore superiore a 50 dB dell'indice di valutazione del potere fonoisolante apparente, $R'w$, per tutte le categorie di edificio, riferendo tale prestazione a elementi di separazione tra due distinte unità immobiliari.

Esso viene attuato attraverso i regolamenti edilizi comunali. Stabilisce i valori limite delle grandezze che determinano i requisiti acustici passivi dei componenti degli edifici e delle sorgenti sonore interne.

Classificazione degli ambienti abitativi in 7 categorie diverse (dalle residenze alle attività commerciali)

3. Aspetti progettuali e soluzioni costruttive per garantire l'isolamento del rumore trasmesso per via aerea (isolamento di facciata e tra unità abitative) e del rumore del calpestio.

Isolamento tra unità abitative: $R'w = L1 - L2 + 10 \log S / A_{tot}$; $R'w > 50 \text{ dB}$

Parete monostrato

Le pareti monostrato sono realizzate generalmente con blocchi di laterizio o blocchi di calcestruzzo o argilla espansa. I blocchi sono generalmente fissati sia in orizzontale che in verticale mediante uno strato di malta. Le pareti sono generalmente intonacate su entrambi i lati. Per i divisori in muratura comunemente utilizzati in edilizia, i valori tipici della frequenza critica sono nell'ordine di 150-250 Hz. Per questi materiali la previsione delle prestazioni acustiche è incerta, poiché non si riesce a tenere conto delle diverse proprietà dei materiali, della geometria e delle tecniche costruttive.

Parete doppia

Le pareti doppie vengono generalmente realizzate in laterizio. Dal punto di vista delle prestazioni acustiche si ha il vantaggio di avere buoni risultati con masse contenute. È necessario però prevedere un'intercapedine d'aria tra le partizioni murarie. Per incrementare le prestazioni delle pareti doppie:

- Impiego di strati elastici per il disaccoppiamento delle strutture
- Realizzazione di un'intercapedine di almeno 5-10 cm, se la dimensione dell'intercapedine è inferiore a 5 cm ed in assenza di materiale assorbente e intonaco le due pareti possono considerarsi accoppiate; la dimensione dell'intercapedine influenza il valore dell'indice di valutazione del potere fonoisolante.
- Interposizione di materiale fonoassorbente nell'intercapedine
- Realizzazione di partizioni murarie di diverso spessore (es: 8-12 cm)

La prestazione acustica di pareti doppie può essere influenzata dalla mancanza di una delle caratteristiche.

Pareti leggere

L'utilizzo di pareti divisorie interne, pareti leggere, realizzate con lastre di gesso rivestito e struttura portante di montanti in lamiera piegata. All'interno della cavità è inserito solitamente un pannello in lana minerale. I valori del potere fonoisolante ($R'w$) sono influenzati dal tipo e forma dei telai, dallo spessore della cavità e dalle modalità di posa in opera. Alle alte frequenze si osserva solitamente una brusca diminuzione del potere fonoisolante dovuta al fenomeno della coincidenza. Le caratteristiche costruttive delle pareti leggere rendono i risultati acustici particolarmente sensibili a fattori geometrici costruttivi. La stima dell'indice di valutazione viene effettuata con formule empiriche.

Pareti monostrato $R'w = 54 \text{ dB}$ | *Pareti doppie* $R'w = 55 \text{ dB}$ → $R'w \geq 50 \text{ dB}$ | *Pareti leggere* $R'w = 63 \text{ dB}$

Calcolo in laboratorio deve essere maggiore di quasi 10 dB essendo che il potere fonoisolante diminuisce in opera a causa dei fiancheggiamenti punti deboli pareti.

Trasmissioni laterali: per evitare le trasmissioni laterali si possono realizzare degli incastri tra le murature, oppure far sì che la parete poggi sul solaio nudo e non sul massetto.

Scatole da incasso impianti elettrici disallineati; Passaggio tubi in cavedi insonorizzati.

LE PORTE: non troppo spesse quando i materiali sono prestanti, battente meglio doppie che singole, diversi materiali a diversa densità ci sono più è fonoisolante.

Isolamento di facciata:

$D_{2m,nT} = L1,2n - L2 + 10 \log T / T_0$; $T_0 = 0,5s$

Le finestre e i cassonetti degli avvolgibili sono i maggiori responsabili del rumore proveniente dall'esterno. Per ottenere buoni risultati si devono migliorare le caratteristiche del VETRO, del SERRAMENTO, del SOTTOFINESTRA e delle BOCCHETTE DI AERAZIONE.

VETRO-CAMERA

- L'impiego di vetri camera stratificati migliora le prestazioni fonoisolanti e acustiche dell'ambiente.
- L'intercapedine tra i due vetri deve essere la maggiore possibile
- I vetri devono essere montati su telai separati e tenuti da guarnizioni smorzanti in gomma
- Le lastre di vetro devono essere di spessore differenziato

TELAIO

- Le caratteristiche di fonoisolamento di una superficie vetrata dipendono dalla tenuta all'aria del telaio perimetrale; a tal scopo prevedere serramenti ad elevata tenuta all'aria;
- Il materiale di cui è costituito il telaio (legno, acciaio, alluminio, pvc, etc.) non influisce in modo sensibile sulla prestazione acustica della vetrata

LE BOCCHETTE DI VENTILAZIONE

- Utilizzare bocchette di ventilazione ad elevato isolamento acustico

Rumore di calpestio:

$L'n = L_i + 10 \log A/A_o$; A_o = area di assorbimento equivalente 10 mq

PAVIMENTO GALLEGGIANTE

Interposizione di materiale resiliente tra struttura portante ed il massetto sul quale viene applicata la finitura superficiale. Lo stato resiliente continuo (ben posizionato e risvoltato sulle pareti) ha il compito di smorzare la trasmissione di vibrazioni attraverso i componenti strutturali. Esistono diversi tipi di sottofondi resilienti: la rigidità dinamica deve essere bassa, ma non esageratamente per non schiacciare il materiale. Le prove per il livello di pressione vengono realizzate con e senza pavimento galleggiante.

SOTTOFONDI RESILIENTI: α β γ

Sottofondo di tipo α : costituito da una membrana bituminosa di spessore 1,5 mm accoppiata ad un tessuto non tessuto elastico in fibra poliestere di spessore 5 mm.

Sottofondo di tipo β : costituito da un feltro ad alta grammatura con una faccia impregnata a saturazione parziale da una speciale miscela bituminosa e rifinita con tessuto polipropilenico, dello spessore totale di 2,8 mm.

Sottofondo di tipo γ : costituito pannelli rigidi in lana di roccia ad alta densità, legata con resine termoindurenti, per un totale di circa 20mm.

4. Onde stazionarie in un ambiente parallelepipedo di piccole dimensioni e modi assiali.

Un ambiente chiuso è definibile come uno spazio caratterizzato da superfici riflettenti che contiene un fluido omogeneo, l'aria. Un ambiente è grande o piccolo a seconda della minima frequenza del suono che ci interessa sia prodotto e ascoltato in quell'ambiente. Alla minima frequenza corrisponde la massima lunghezza d'onda producibile in quell'ambiente e se l'ambiente è dieci volte più grande della massima lunghezza d'onda esso si definisce di grandi dimensioni.

Per determinare il campo sonoro, e stabilire dunque il valore della pressione sonora o il suo livello in un punto dell'ambiente, nel caso di ambienti semplici (ad es. parallelepipedi) di piccole dimensione il metodo della "teoria modale" permette la determinazione del campo sonoro in modo più rigoroso rispetto ad altri modelli. Con tale metodo è possibile ricavare una soluzione analitica del campo sonoro. Esso comporta la soluzione dell'equazione delle onde ed evidenzia che la pressione sonora in un dato punto dell'ambiente è data dalla somma dei contributi di ciascun "modo acustico" proprio dell'ambiente.

Piccoli ambienti → Teoria modale (campo discreto) | Grandi ambienti → Acustica statistica (campo diffuso)

Esiste una frequenza limite, detta frequenza di Schroeder f_s , essa separa:

- Basse frequenze $f < f_s$ → comportamento modale ("small rooms"); campo acustico discreto
- Alte frequenze $f > f_s$ → comportamento statistico ("large rooms"); campo acustico diffuso

Poiché sotto la f_s la pressione è molto disomogenea nello spazio a causa dei ventri e dei nodi si è introdotto un indice detto ROS (rapporto onde stazionarie) che rappresenta la differenza in Db tra i massimi e i minimi di un'onda stazionarie.

Onda stazionaria:

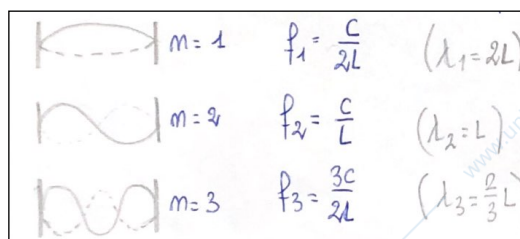
Un'onda stazionaria è un fenomeno oscillatorio che si manifesta in qualsiasi mezzo materiale con porzioni di spazio limitate ed è definita come un'onda che non si propaga, ma rimane fissa nella stessa zona di spazio a determinate frequenze dette frequenze di risonanza. Le onde stazionarie nascono dall'interferenza dell'onda progressiva con l'onda regressiva o riflessa.

$$\begin{aligned}
 p_i(x,t) &= p_{\max,i} \cos(\omega t - Kx) & + & & p_r(x,t) &= p_{\max,r} \cos(\omega t + Kx) \\
 \text{ONDA PROGRESSIVA (diritta)} & & \downarrow & & \text{onda regressiva} \\
 & & & & = 2p_{\max} \cos x(Kx) \cos(\omega t) & \text{onda stazionaria} \\
 \text{dove } K &= \frac{2\pi}{\lambda} & \Rightarrow & p(x,t) &= 2p_{\max} \underbrace{\cos\left(\frac{2\pi}{\lambda} x\right)}_{\text{distribuzione spaziale}} \underbrace{\cos(\omega t)}_{\text{distribuzione temporale}}
 \end{aligned}$$

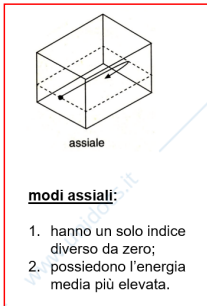
L'onda risultante è detta stazionaria, in quanto non avviene una propagazione nello spazio, ma soltanto un'oscillazione del tempo. Le onde stazionarie si instaurano nella stanza a precise frequenze, chiamate frequenze di risonanza o modi propri.

Si può avere anche un'interferenza prodotta da onde provenienti dalla stessa sorgente, se le onde vengono riflesse su superfici rigide e perfettamente riflettenti. Su ogni punto della superficie riflettente l'onda incidente e quella riflessa danno luogo alla stessa pressione acustica, mentre la velocità di vibrazione è nulla, poiché la velocità di vibrazione dell'onda riflessa è uguale e contraria a quella dell'onda diretta. Si verifica nello spazio interposto una condizione di "risonanza" dovuta al successivo rimbalzare dell'energia sonora fra le due pareti, con la sovrapposizione di due onde che si propagano nel verso opposto e si compongono in fase. Si parla in questo caso di onde stazionarie.

Tra le due pareti piane riflettenti e parallele si è formata un'onda stazionaria che determina in alcuni punti detti "nodi" N un valore nullo dell'ampiezza, e in altri detti "ventri" V un valore che oscilla nel tempo tra i due massimi $2y_{\max}$ e $-2y_{\max}$. Si crea cioè una disuniformità spaziale del suono. Tra due nodi e tra due ventri successivi c è $\lambda/2$ e so che se la lunghezza della stanza è un multiplo di $\lambda/2$ io ho onde stazionarie. Cioè se $l = n\lambda/2$ ho un'onda stazionaria. Da $c = \lambda f$, si può scrivere che le onde stazionarie si hanno per $c = 2l/n f$. Da questa relazione posso determinare le frequenze che mi determinano onde stazionarie, dette anche frequenze di risonanza o modi assiali della stanza. Ottengo quindi che $f_n = cn/2l$. La più bassa frequenza di risonanza si ha quando $n=1$ e si chiama la frequenza fondamentale, quelle successive sono dette armoniche della fondamentale e valgono multipli interi della stessa, cioè $2f$, $3f$, $4f$, etc.



Si consideri un ambiente parallelepipedo di lunghezza l_x , l_y e l_z con superfici interne riflettenti. Immaginiamo di porre una sorgente sonora puntiforme in un angolo della stanza ($x = y = z = 0$) che pulsa di moto armonico semplice, ad una data frequenza. Quando la sorgente inizia a funzionare un'onda sonora si diffonde in tutte le direzioni. Essa si riflette sulle superfici della stanza e ci saranno certamente certi percorsi che si ripeteranno uguali nel tempo e creeranno dunque delle risonanze (onde stazionarie in 3 dimensioni). In altre parole, la stanza ha i propri modi normali di vibrazione e le sue relative frequenze normali. Ci sono tre tipi di modi normali di vibrazione in un ambiente chiuso: 1) Modi assiali, in cui l'onda riflessa si muove parallela ad un asse; 2) Modi tangenziali, in cui l'onda riflessa si muove parallelamente ad una coppia di pareti (è tangenziale ad essa) ed incide obliquamente sulle altre due coppie; 3) Modi obliqui, in cui l'onda riflessa incide in modo obliquo su tutte le tre coppie di pareti.



La distribuzione spaziale della pressione acustica all'interno di un ambiente di forma parallelepipeda, in presenza di superfici perfettamente riflettenti, per ciascuna frequenza di risonanza (o modo normale di vibrazione) è proporzionale al prodotto di tre coseni (si ricordi $\lambda=c/f$):

$$p(x, y, z, t) = A \cdot \cos\left(\frac{2\pi f_x}{c} x\right) \cos\left(\frac{2\pi f_y}{c} y\right) \cos\left(\frac{2\pi f_z}{c} z\right) \cos(2\pi f t)$$

Ampiezza Componente spaziale Componente temporale

Dove: $f = \sqrt{f_x^2 + f_y^2 + f_z^2}$

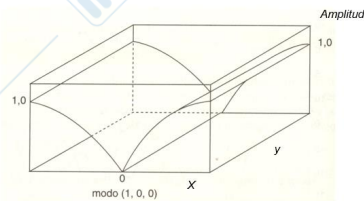
Applicando le opportune condizioni al contorno (pressione sonora massima agli estremi del sistema) per tutte e 3 le direzioni x, y, z si ottengono le frequenze di risonanza riferite a ciascuna componente spaziale. La frequenza totale risultante dalle 3 componenti è chiamata frequenza naturale (o modo proprio) di risonanza f_n :

$$f_n = \sqrt{f_x^2 + f_y^2 + f_z^2} = \frac{c}{2} \sqrt{\left(\frac{n_x}{L_x}\right)^2 + \left(\frac{n_y}{L_y}\right)^2 + \left(\frac{n_z}{L_z}\right)^2}$$

con $n_x, n_y, n_z = 0, 1, 2, 3, \dots$ detti **indici modali**

Modi assiali:

Sono modi distinti da un solo indice modale non nullo: $(n_x, 0, 0)$, $(0, n_y, 0)$, $(0, 0, n_z)$. Dipendendo da una sola coordinata: sono modi unidimensionali. Possiedono l'energia media più elevata, 2 volte maggiore dei modi tangenziali. I modi assiali possiedono tempi di riverberazione maggiori poiché sono più energici. (tempo di riverberazione: il tempo che il livello di pressione sonora di un modo impiega per diminuire di 60 dB dopo lo spegnimento della sorgente). Muovendosi lungo x , la pressione sonora cambia. Muovendosi lungo y e z , la pressione sonora non cambia.



7.1 Il campo sonoro in regime transitorio in un ambiente chiuso: assorbimento continuo dell'energia sonora e formula di Sabine. Misura del tempo di riverberazione con il rumore stazionario interrotto: T60, T30 e T10

Regime transitorio: una sequenza di impulsi emessi da una sorgente è modificata dall'ambiente. Queste modifiche possono deteriorare la qualità del suono percepito da un ascoltatore, causando il degrado della comunicazione verbale e la fruizione della musica.

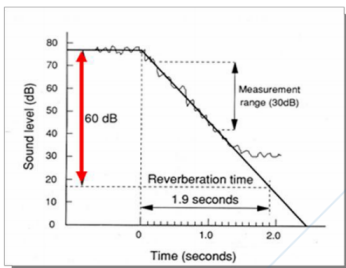
Coda sonora: prolungamento del suono emessa da una sorgente in ambiente chiuso al cessare dell'emissione. È dovuta alle numerose riflessioni successive delle onde sulle pareti, fino alla dissipazione totale dell'energia posseduta dalla massa d'aria contenuta nell'ambiente.

Assorbimento continuo dell'energia sonora:

L'ipotesi di continuità (o di Sabine) equivale a dire che l'energia circolante incide sulle pareti in modo continuo durante tutto l'intervallo di tempo t_m . Tale ipotesi è tanto più approssimata quanto più a_m è basso e la diffusione molto buona. Anche l'assorbimento all'interno dell'ambiente avviene in modo continuo, cioè in ogni intervallo di tempo dt esiste una frazione (infinitesima) dell'energia circolante che incontra le pareti della sala venendo in parte assorbita e in parte riflessa. Questo fenomeno non presenta discontinuità in funzione del tempo. L'assorbimento che si verifica fra due riflessioni successive si distribuisce per ogni intervallo dt all'interno di t_m . L'energia assorbita da tutte le superfici presenti nella stanza in un intervallo temporale dt si ottiene da:

$$a_m DV \frac{dt}{t_m} = a_m DV \frac{cS}{4V} dt = a_m D \frac{cS}{4} dt$$

$$a_m S D \frac{c}{4} dt = A_{tot} D \frac{c}{4} dt$$



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**

Tempo di riverberazione (Sabine):

parametro fisico descrittore della percezione della riverberazione sonora, 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} .

T_{60} : tempo in cui il livello sonoro di regime si riduce di 60 dB

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)

Determinazione del tempo di riverberazione a partire dalla risposta all'impulso:

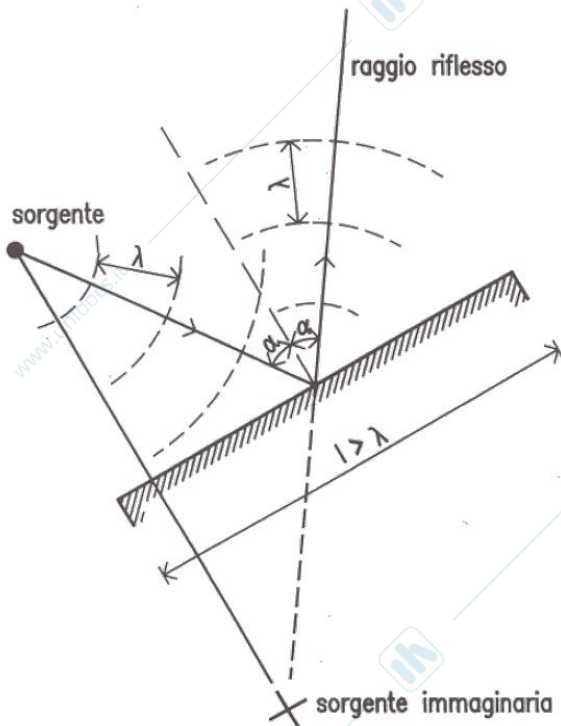
L'integrale di Shroeder è una tecnica numerica che consente, a partire dalla risposta all'impulso dell'ambiente, di ottenere la curva di decadimento che si sarebbe misurata con la tecnica del rumore stazionario.

T60, T30, T10, se il decadimento fosse lineare tutti questi parametri avrebbero lo stesso valore, che è quello che chiamiamo normalmente T_{60} , cioè il tempo di riverbero di Sabine, in realtà poiché per gli ambienti reali la curva di decadimento è una linea curva che cambia spesso concavità, non necessariamente questi valori sono coincidenti.

La variazione del tempo riverberato in funzione del range di decadimento considerato, è un indicatore del tipo di campo sonoro, più i valori sono vicini tra loro più il campo si dice che ubbidisca alla teoria di Sabine:

8.L'acustica geometrica, la risposta all'impulso e il metodo delle sorgenti immagine.

Per determinare il valore della pressione sonora in un punto di un ambiente chiuso, si utilizzano diversi metodi a seconda della forma dell'ambiente. Nel caso di piccoli ambienti di forma regolare il campo sonoro si descrive in termini matematici e si tratterà di campo modale, nel caso invece di grandi ambienti (se è 10 volte più grande della massima lunghezza d'onda) di forma irregolare si effettuerà una valutazione statica delle condizioni medie e si parla quindi di campo diffuso.



L'applicazione del metodo dell'acustica statistica, pur essendo una base per lo studio del comportamento acustico degli ambienti, non tiene conto di molti fenomeni che spesso possono assumere rilevanza non trascurabile, tra cui le concentrazioni sonore, le prime riflessioni, le zone d'ombra e la presenza di eco. Questi possono essere indagati adottando le semplificazioni dell'**acustica geometrica**.

Questa prevede dei raggi sonori perpendicolari ai fronti d'onda che si riflettono specularmente sulle superfici dell'ambiente. Oltre la parete si realizza una sorgente immagine dalla quale si propaga un raggio riflesso con minore contributo energetico. Così facendo il campo sonoro non sarà più uniforme in tutto l'ambiente

L'approssimazione dell'acustica geometrica è applicabile quando:

- le pareti sono per lo più lisce e di dimensioni nettamente superiori rispetto ai valori delle più grandi lunghezze d'onda in gioco, così si presuppone che le riflessioni avvengano specularmente senza alcun effetto di diffrazione ai bordi e di diffusione dovuta alle asperità;
- le sorgenti sono considerate puntiformi.

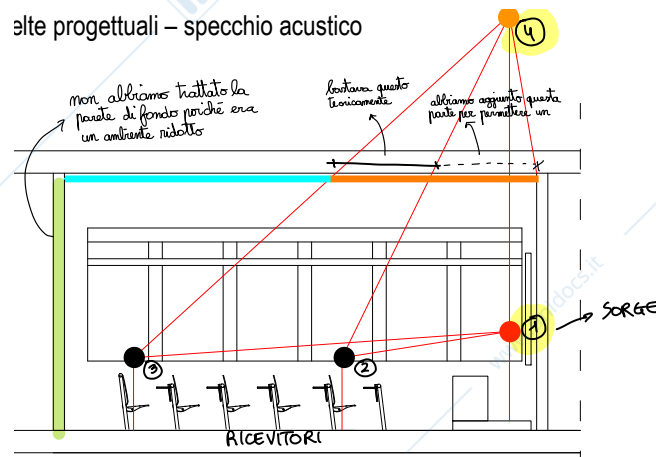
In queste condizioni il campo sonoro varia da punto a punto dell'ambiente e per ciascun punto si può costruire la "**risposta all'impulso**" per un percorso sorgente-ricevitore. Per un ambiente molto semplice e parallelepipedo si può calcolare la risposta all'impulso con il metodo delle "sorgenti immagine".

Questo metodo è applicabile solo ad ambienti con geometrie semplici, in alternativa può essere adottato il metodo del ray-tracing. In questo caso la sorgente non emette dei fronti d'onda sferici, ma dei raggi, ad ognuno dei quali sarà associato un pacchetto di energia, che si ridurrà prima di arrivare al ricevitore, perché ha compiuto un certo percorso e perché ha urtato contro le pareti dell'ambiente.

$$I = \frac{W}{4\pi r^2} (1 - a_k)$$

Per i raggi che colpiscono più di una parete prima di raggiungere il ricevitore si aggiungono tanti fattori $(1 - a_k)$ quante sono le pareti colpite.

elte progettuali – specchio acustico



10. Aspetti soggettivi e criteri oggettivi di valutazione della qualità acustica di una sala da spettacolo per l'ascolto della musica.

Da sempre in acustica architettonica le misure sono mirate oltre ad una caratterizzazione di tipo oggettivo, anche ad una valutazione di tipo soggettivo, legata alla percezione dell'acustica degli spazi.

Descrizione soggettiva della qualità acustica di uno spazio = Attributi soggettivi

Quantificazione della qualità acustica di uno spazio = Parametri acustici oggettivi

1. TEMPO DI RIVERBERAZIONE

TR è il tempo necessario affinché il livello di pressione acustica nell'ambiente diminuisca di 60 dB in seguito allo spegnimento della sorgente: $T_{60} = 0,16 V/Atot$ [s]

I valori ottimali di tempo di riverberazione sono stabiliti in relazione alla destinazione d'uso degli ambienti.

Un'altra tecnica di indagine sono le misurazioni binaurali: permettono di studiare in modo più accurato la percezione umana (binaurale) del fenomeno sonoro.

Il metodo di misura che si adotta è la risposta all'impulso, analizzando la propagazione nel tempo del suono diretto, prime riflessioni e ultime riflessioni (coda sonora).

La norma ISO 3382 individua cinque attributi percettivo/soggettivi principali:

- Livello del suono soggettivo, INDICE DI INTENSITÀ G [dB]

All'aperto il suono emesso da un'orchestra risulta più debole rispetto allo stesso suono percepito all'interno di una sala. L'indice "Guadagno relativo normalizzato", G, è il parametro che descrive la percezione dell'intensità di un suono. G rappresenta l'effetto di "amplificazione della sala" e si ottiene dalla differenza fra il livello sonoro misurato in un punto della sala e il livello sonoro emesso dalla stessa sorgente, all'aperto, alla distanza di 10 m. L'indice G si può anche determinare usando un segnale stazionario proveniente da una sorgente omnidirezionale dalla seguente equazione:

- Riverberazione percepita, EDT EARLY DECAY TIME [s]

Tempo necessario perché il livello sonoro decada di 60 dB, estrapolato sulla curva di decadimento tra 0 e -10 dB

- Chiarezza del suono percepita, CHIAREZZA C80 [dB]

A metà degli anni '70 a Dresda alcuni ricercatori individuarono il parametro oggettivo "Chiarezza" a 80 ms, per descrivere la sensazione di percepire nitidamente note suonate in successione rapida e note suonate contemporaneamente da più strumenti musicali. La C80 si ottiene dal rapporto tra l'energia diretta più quella riflessa, che arriva 80 ms dall'arrivo del suono diretto, e l'energia riflessa che arriva oltre gli 80 ms.

- Ampiezza apparente del suono, EARLY LATERAL ENERGY FRACTION LF [-]

SPAZIALITÀ: La spazialità è la sensazione di sentirsi all'interno dell'evento sonoro, e non di guardarlo da una finestra. Sono evidenziati due aspetti della spazialità (Marshall, 1967):

- La "larghezza apparente della sorgente", cioè la sensazione che in sala la sorgente appaia più ampia di quanto appaia all'aperto.
- L'"avvolgimento sonoro", cioè la sensazione di essere circondati dal suono.

Entrambi gli aspetti soggettivi di spazialità sono legati all'energia delle riflessioni che arrivano da direzioni laterali.

Un parametro proposto da Jordan nel 1981 è l'"efficienza laterale", LE, che descrive la quota di prima energia riflessa che arriva lateralmente rispetto alla quota globale.

Un altro parametro è il "coefficiente di correlazione mutua interaurale", IACC, (1970), che misura la somiglianza dell'energia sonora che arriva nel tempo alle due orecchie di un ascoltatore.

RIFLESSIONI INIZIALI E SPAZIALITÀ:

L "impressione spaziale", fa riferimento alla sensazione di essere in uno spazio tridimensionale, di sentirsi avvolto dal suono e di percepire la fonte sonora più estesa di quanto può apparire all'aperto.

LF: prima frazione energia laterale, presuppone l'utilizzo di un microfono con configurazione a 8

- Avvolgimento sonoro, LATE LATERAL SOUND LEVEL LG [dB]

RIFLESSIONI TARDIVE E SPAZIALITÀ

LG: livello (guadagno) relativo dell'ultima energia sonora laterale, presuppone l'utilizzo di un microfono con configurazione a otto.

11. Il comfort acustico negli ambienti destinati all'ascolto della parola: indici acustici per il controllo del rumore e tempo di riverberazione ottimale. Caratterizzazione acustica della voce umana: livelli di sforzo vocale e direttività.

Comfort acustico: condizione psicofisica di soddisfacimento delle esigenze acustiche espresse dall'utente nello svolgimento di una determinata attività. Può essere inteso come controllo del rumore e della riverberazione sonora dell'ambiente in modo da evitare disturbo e fastidio. Nel caso di ambienti civili destinati all'ascolto della parola esso si esplicita nel controllo dell'intelligibilità.

Per una buona ricezione i requisiti sono: adeguato livello sonoro L_p , uniformità spaziale di L_p , contenimento della riverberazione sonora. Per migliorare la nitidezza è necessario: ridurre la coda sonora, intensificare il contributo energetico delle prime riflessioni

Controllo del rumore:

Effetti del rumore:

- DANNO: alterazione irreversibile (o non del tutto reversibile) oggettivamente riscontrabile dal punto di vista medico a carico dell'apparato uditivo o di altri apparati (cardiocircolatorio e neurologico).
- DISTURBO: alterazione temporanea delle condizioni psicofisiche chiaramente attribuibile al rumore con: riduzione di comprensione del parlato; interferenza con il sonno; ridotta capacità di concentrazione.
- FASTIDIO: sentimento di scontentezza riferito al rumore attribuibile all'effetto combinato del rumore e di altri fattori di natura psico-sociologica.

Gli effetti dell'esposizione umana al rumore dipendono dalle caratteristiche di intensità media, durata e tipologia dello stimolo sonoro

Indici di valutazione del disturbo del rumore:

Nello studio degli effetti del rumore sull'uomo occorre tenere presente il carattere soggettivo e individuale della risposta al rumore. È per tale ragione che l'approccio metodologico seguito è di natura statistica, basato sul comportamento medio di una comunità di persone, ma rimane comunque una valutazione complessa. Si è definito però un indice di LIVELLO CONTINUO EQUIVALENTE DI PRESSIONE SONORA PONDERATO A (L_{AeqT}) che caratterizza la risposta soggettiva del rumore di un individuo descrivendo la composizione sonora in frequenza e l'andamento temporale del fenomeno. Con questo indice il disturbo viene associato al contributo energetico medio in un intervallo di tempo.

Il livello sonoro del rumore si misura attraverso il LIVELLO SONORO CONTINUO EQUIVALENTE (L_{eq}) E' il livello costante nel tempo che si avrebbe a parità di energia sonora.

INDICI DISCRETI NC, NCB, NR, RC

Parametri di riferimento di un rumore di fondo, le curve:

NC: Noise Criteria

Queste curve ricordano come andamento quelle isofoniche e rappresentano una famiglia di spettri in bande di ottava ad ognuno dei quali è associato un indice di valutazione NC rappresentato da quello corrispondente alla curva più alta toccata.

NR: Noise rating

Allo stesso modo delle curve NC, si basano sulla tangenza del punto più elevato dello spettro di rumore interessato. Le curve uniscono i punti che generano, per ogni frequenza lo stesso disturbo fisiologico. Il valore di ogni curva è individuata al valore che assume la curva a 1000 Hz.

RC: Room criteria

Valutano il rumore prodotto da impianti a funzionamento continuo in ambienti non occupati (riscaldamento, condizionamento).

NCB: Balanced Noise Criteria

Queste curve sono indicate per la valutazione del rumore di fondo in ambienti occupati, prodotto da un impianto di climatizzazione. Queste curve sono individuate dal valore del SIL (Speech Interference Level), secondo la più recente definizione (ISO 9921) che corrisponde alla media aritmetica dei livelli di pressione delle quattro bande con centro di banda a 500 Hz, 1 KHz, 2 KHz, 4 KHz.

Controllo della riverberazione: caratteristica di riflessione sonora dell'ambiente

Una sequenza di impulsi emessi da una sorgente è modificata dall'ambiente. Queste modifiche possono deteriorare la qualità del suono percepito da un ascoltatore, causando il degrado della comunicazione verbale.

Il tempo di riverberazione ottimale è definito come il tempo necessario affinché il livello sonoro in un punto dell'ambiente decada di 60 dB, dall'istante di spegnimento di una sorgente sonora che emette un segnale stazionario, e si indica come $T60 \rightarrow T60 = 0,16 V/At\alpha$

Il valore ottimale del tempo convenzionale di riverberazione dipende dal volume e dalla frequenza. T è inversamente proporzionale all'assorbimento totale e direttamente proporzionale al volume.

Il tempo di riverberazione ottimale coniuga due esigenze contrapposte: buona intelligibilità e sufficiente livello di intensità. È il giusto compromesso tra il raggiungimento del livello sonoro sufficiente (senza sforzo) e la situazione di disturbo provocata dall'eccesso di riverberazione (code sonore).

Si indicano valore di T diversi a seconda della destinazione d'uso: ambienti destinati alla parola meno di 1s; sale per ascolto musica più di 2s.

Caratterizzazione acustica della voce umana:

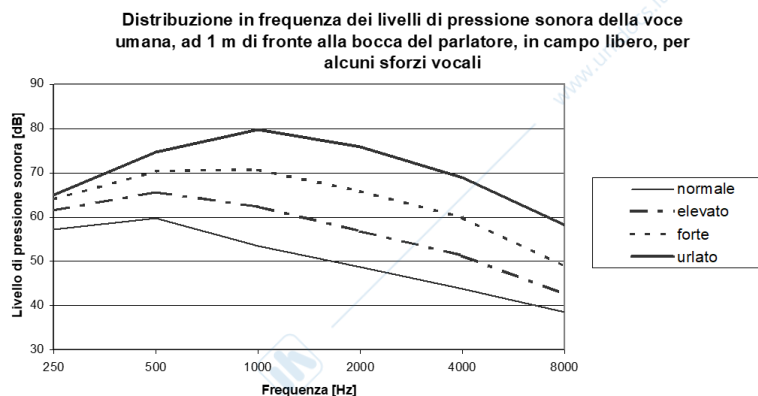
La voce umana varia in intensità secondo lo sforzo vocale del parlatore e in frequenza a seconda dei fenomeni pronunciati e alla configurazione dell'apparato fonatorio del parlatore. La voce umana è caratterizzata da diversi livelli di pressione sonora (opportunamente ponderati) che vengono raggruppati in bande di ottava e suddivisi in sforzi vocali: normale, elevate, forte e urlato, misurati alla distanza di 1 m dalla bocca del parlatore in campo libero.

Sforzo vocale	$L_{SA,1m}$ [dB(A)]
<i>rilassato</i>	54
<i>normale</i>	60
<i>elevato</i>	66
<i>forte</i>	72
<i>molto forte</i>	78

Il parlato subisce continue fluttuazioni di livello relative al linguaggio: i suoni vocalici sono più forti e lunghi e corrispondono ai livelli massimi, rispetto ai suoni delle consonanti (livelli minimi).

La direzionalità della sorgente è dovuta principalmente alla diffrazioni causata dalla testa ed è accentuata alle alte frequenze dove la lunghezza d'onda d'emissione diventa paragonabile alle sue dimensioni.

La norma ANSI 53.5 pone l'indice di direttività da 1 a 3 dB sull'asse di massima emissione in corrispondenza degli angoli 0° e azimutale, per valori di frequenza minori di 1kHz e da 2 a 5 dB per valori superiori.



12. Intelligibilità della parola: definizione, indici di intelligibilità e strategie per la sua massimizzazione in ambienti dedicati all'ascolto del parlato.

L'esigenza fondamentale nella comunicazione verbale è la comprensione corretta del messaggio trasmesso. Le caratteristiche acustiche dell'ambiente in cui avviene la comunicazione possono perturbare la qualità della trasmissione. Oltre che dalle caratteristiche acustiche degli ambienti, l'intelligibilità del parlato dipende dalle caratteristiche di emissione della voce umana, in particolare dall'intensità di emissione variabile secondo lo sforzo vocale del parlatore, dalla composizione in frequenza, dall'andamento temporale e dalla direzionalità, e da altri fattori tra i quali quelli di natura linguistica.

L'intelligibilità è definita come la percentuale di parole o frasi capite sulla totalità di quelle pronunciate durante una comunicazione verbale. Gli indici di valutazione dell'intelligibilità del parlato sono funzione di:

1) CARATTERISTICHE ACUSTICHE DELLA VOCE UMANA (potenza, direttività, composizione in frequenza); DISTANZA FRA PARLATORE ED ASCOLTATORE Livello del segnale L_s .

2) PRESENZA DI RUMORE DI FONDO; DISTANZA FRA ASCOLTATORE E SORGENTE DI RUMORE SPECIFICHE Livello del rumore L_N .

Rapporto segnale/rumore, $L_s - L_N$

La norma ISO 9921 specifica i livelli di qualità della comunicazione verbale richiesti per una soddisfacente comprensione del messaggio parlato in diverse applicazioni, che variano dagli allarmi verbali, ai segnali di pericolo, ai messaggi di informazione e alle comunicazioni verbali in generale. La norma considera la comunicazione diretta persona-persona, senza l'utilizzo di dispositivi elettroacustici; la comunicazione pubblica, in generale indirizzata ad un gruppo di persone in uno o più ambienti utilizzando un sistema elettroacustico; i sistemi di comunicazione personale, che includono l'utilizzo di telefoni, telefoni mobili, citofoni etc.

SIL, Speech interference level

L'applicazione del metodo SIL è limitata alla comunicazione diretta tra parlatore e ascoltatore, senza l'ausilio di dispositivi elettroacustici, in ambienti rumorosi con minima riverberazione (ISO 9921). Il metodo dovrebbe essere adottato solo quando altri metodi di valutazione dell'intelligibilità del parlato non possano essere applicati. Il livello di interferenza sul parlato SIL si ottiene dalla seguente relazione:

$$SIL = L_{SAL} - L_{SIL} \text{ [dB]}$$

SII, Speech Intelligibility Index

Viene reso applicabile al caso di ascolto binaurale. è correlato alla percentuale di intelligibilità della comunicazione tra un parlatore e un ascoltatore posti ad una certa distanza. Si calcola in base al rapporto tra il segnale utile e il rumore di fondo. Questo metodo è applicabile alla valutazione dell'intelligibilità in campo libero o in ambienti con minima riverberazione. Si applica per stimare l'intelligibilità nel caso di sistemi di comunicazione lineare, anche quando l'ascolto, monoaurale o binaurale, avviene attraverso un canale di trasmissione lineare (ad esempio microtelefono) oppure attraverso sistemi di attenuazione lineare (protettori dell'udito). L'Indice d'intelligibilità del parlato SII è definito al fine di produrre un valore del parametro che è altamente correlato con l'intelligibilità della parola in diverse condizioni avverse per l'ascolto quali il rumore ambiente, la riverberazione, la parziale menomazione uditiva dell'ascoltatore, l'uso di protettori dell'udito di chi ascolta, l'uso di protesi acustiche etc

C50, chiarezza

Applicabile in ambienti non rumorosi, ad esempio i teatri, da una misura della nitidezza del segnale vocale ricevuto dall'ascoltatore. È ottenuto dal logaritmo del rapporto fra l'energia del suono utile e l'energia del suono disturbante, secondo la seguente relazione.

$$C50 = 10 \log \frac{\int_0^{50ms} p^2(t) dt}{\int_{50ms}^{\infty} p^2(t) dt} \text{ [dB]}$$

Valori consigliati dalla norma UNI11367:2010

Ambienti adibiti al parlato

$C50 > 0$

$STI \geq 0.6$

Ambienti adibiti ad attività sportiva

$C50 \geq -2$

$STI \geq 0.5$

STI, speech transmission index

Rappresenta la qualità della trasmissione della parola dal punto di vista dell'intelligibilità. Applicabile in ogni tipo di ambiente, e in particolare nei grandi ambienti come le sale conferenze. La procedura per la determinazione dello STI si applica per valutare l'intelligibilità del parlato, con e senza sistemi di amplificazione sonora. La misura si effettua con la sorgente nella posizione dell'oratore e il microfono in corrispondenza della testa dell'ascoltatore. Il metodo di misura più rigoroso o «diretto», richiede l'emissione in sequenza di 98 segnali di test, ciascuno ottenuto da un rumore rosa filtrato nelle 7 bande di frequenza d'ottava (f) da 125 Hz a 8 kHz, modulato sinusoidalmente in intensità, con indice di modulazione pari a 1, secondo 14 frequenze di modulazione (F), ai valori di frequenza, ad intervalli di un terzo d'ottava.

ogni posizione di ascolto (98 → 7 bande di ottava x 14 freq. di modulazione)
 I valori di m tengono conto del mascheramento uditivo e dell'assoluta ricezione che determinano una riduzione del fattore di modulazione.

- questi valori vengono convertiti in segnale / rumore apparente $SNR_{p,F}$ ($L_s - L_n$):

$$SNR_{p,F} = 10 \log \frac{m_{p,F}}{1 - m_{p,F}} \text{ [dB]}$$

- I rapporti segnale / rumore vengono limitati a ± 15 dB.
- ognuno di questi rapporti viene convertito in indice di trasmissione $TI_{p,F}$:

$$TI_{p,F} = \frac{SNR_{p,F} + 15}{30}$$

- Per ciascuna banda di ottava si calcola l'indice di trasferimento della modulazione MTI_p come media degli indici di trasmissione per le 14 freq. di modulazione:

$$MTI_p = \frac{1}{14} \sum_{F=1}^{14} TI_{p,F}$$

- Lo STI si ottiene con la somma degli indici di trasferimento della modulazione per le 7 bande di ottava:

$$STI = \sum_{f=1}^7 \alpha_f MTI_p - \sum_{f=1}^6 \beta_f \sqrt{MTI_p \times MTI_{(p+1)}}$$

α_f e β_f = coef. correttivi per le diverse bande di ottava che cambiano a seconda del sesso.

SIPA, Speech transmission index for Public Address Systems

Si tratta di una procedura semplificata rispetto a quella dell'indice STI. Il metodo STIPA è validato solo con la voce maschile e la sua misurazione dura approssimativamente da 15 a 20 s. Va sottolineato che la procedura semplificata limita la possibilità di tenere conto di alcune forme di distorsione non lineare.

STRATEGIE PER LA SUA MASSIMIZZAZIONE

Tutti questi metodi derivano dallo stesso principio che vuole la comprensibilità della parola, in ciascun punto dell'ambiente di ascolto, legata al rapporto pesato tra intensità del segnale utile e intensità del rumore di fondo. La riverberazione del locale, la presenza di eco, la distorsione del segnale amplificato, l'effetto del mascheramento uditivo etc. sono concetti che possono essere ricondotti e trattati come apparenti rumore di fondo. Le caratteristiche spettrali del segnale vocale, le fluttuazioni in ampiezza dei singoli foni che compongono le parole e le frasi, il ritmo di eloquio etc. sono inseriti nel calcolo degli indici o come fattori correttivi o come parametri di funzioni analitiche utilizzate per i diversi test.

13.1 materiali fonoassorbenti e fonodiffondenti: caratteristiche acustiche e principi di progettazione.

Tra le caratteristiche dei materiali acustici ci sono l'assorbimento e la diffusione.

Materiali fonoassorbenti: la loro caratteristica principale è quella di trasformare in un altro tipo di energia una parte dell'energia acustica che attraversa il materiale. Il suo compito principale è quello di riflettere il meno possibile l'energia acustica che riceve.

Legge della conservazione dell'energia: $E_i = E_a + E_r + E_t$

E_i : energia incidente E_a : energia assorbita E_r : energia riflessa E_t : energia trasmessa

Il coefficiente di assorbimento è definito come il rapporto tra l'energia assorbita e l'energia incidente su una superficie: $a = E_a/E_i$; $0 < a < 1$

Il coefficiente di assorbimento è in funzione dell'angolo di incidenza θ_i

a_N = coefficiente di assorbimento a incidenza normale; a = coefficiente di assorbimento a incidenza diffusa

Le misurazioni dei materiali fonoassorbenti possono essere effettuate con il Metodo della camera riverberante (2 misurazioni con e senza il campione, più microfoni e più sorgenti), in cui è possibile misurare il coefficiente di assorbimento a incidenza diffusa a ; oppure all'interno del tubo in pendenza in cui si può misurare il coefficiente di assorbimento a incidenza normale a_N .

Categorie materiali fonoassorbenti

1) Materiali porosi

Materiali che presentano cavità (pori) che devono essere aperti e interconnessi tra loro.

Fattore di porosità: $\sigma = V_{pori}/V$

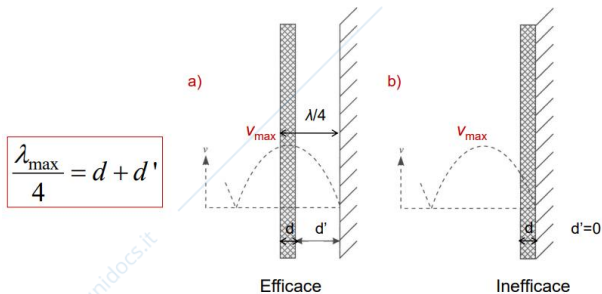
Il principio di assorbimento avviene attraverso un processo dissipativo in cui gli effetti viscosi creano attrito con le pareti dei pori trasformando così l'energia sonora in calore, realizzando così conduzione termica dall'aria al materiale fonoassorbente. L'assorbimento è influenzato dallo spessore del materiale e dalla presenza o meno di un'intercapedine d'aria tra il pannello e il muro.

In prossimità di una parete rigida il maggiore fonoassorbimento si avrà dove la velocità di oscillazione delle

particelle è massima. Se consideriamo un'onda stazionaria di lunghezza d'onda λ , 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 $\lambda < 4d$.

Se tra lo strato fonoassorbente e le pareti si trova un'intercapedine di spessore d' saranno assorbite con efficacia le onde con $\lambda < 4(d+d')$

→ $F_{min} = c/\lambda_{max}$



2) Risonatori di Helmholtz

Permettono l'assorbimento per risonanza attraverso il principio massa-molla. Processo dissipativo in cui avviene conversione energia sonora in energia vibrazionale che provoca la deformazione elastica dell'aria nel collo, successivamente avviene la trasformazione dell'energia vibrazionale in calore, provocando conduzione termica dall'aria contenuta nel collo all'aria in cavità. 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. I risonatori di H hanno alta efficienza a basse frequenze, senza il materiale poroso accoppiato si ha un'alta attenuazione su una banda ristretta, col materiale poroso accoppiato, si ha un assorbimento minore ma su bande di frequenze più ampie.

3) Pannello vibrante

Sono strutture formate da fogli di materiale non poroso di spessore sottile (compensato, tela gommata) posati su telai di sostegno e distanziati dalla parete da un'intercapedine di qualche centimetro. Assorbimento per risonanza secondo il principio massa-molla in cui avviene un processo dissipativo con conversione dell'energia sonora in energia vibrazionale, ovvero deformazione elastica della membrana e una successiva conversione dell'energia vibrazionale in calore con conduzione termica dalla membrana all'aria contenuta nell'intercapedine tra il pannello e la parete rigida. La pressione agisce su una membrana con una massa frontale M . La struttura si comporta come una massa vibrante (pannello) collegata ad un

sostegno rigido (parete) tramite un elemento elastico (aria nell'intercapedine o materiale poroso nell'intercapedine). La dissipazione dell'energia sonora avviene per deformazione del pannello e del volume d'aria retrostante. I pannelli vibranti hanno alta efficienza a frequenze medio-basse.

Progettazione materiali fonoassorbenti:

Il materiale fonoassorbente non è distribuito uniformemente su una superficie ma si concentra in singoli oggetti o strutture tridimensionali: - Sedute - Sistemi 3D sospesi (baffles) - Bass trap...

Materiali fonodiffondenti:

Anch'esso si basa sulla legge della conservazione dell'energia: $E_i = E_a + E_r + E_t$; $E_r = E_s + E_d$

Il coefficiente di scattering è definito come il rapporto tra l'energia riflessa in modo non speculare e l'energia totale riflessa da una superficie: $s = E_d/E_r$; $0 < s < 1$

una superficie è definita diffondente quando $s > 0.5$

Il coefficiente di diffusione è in funzione dell'angolo di incidenza θ_i .

S: coefficiente di scattering a incidenza diffusa

d: coefficiente di diffusione (in funzione dell'angolo di incidenza)

Un'onda incidente diretta contro una superficie liscia si riflette in modo speculare. Se incontra una superficie molto corrugata tende invece ad essere riflessa in modo diffuso. Ciò accade per l'esistenza di anse e protuberanze che hanno differenti quote. L'energia diffusa in un modello geometrico è normalmente distribuita in accordo con la legge del coseno di Lambert, dove l'energia è proporzionale al coseno dell'angolo di riflessione. Se non c'è una riflessione concentrata in una sola direzione, siamo in presenza di un fenomeno di diffusione. Una superficie convessa, a differenza di una piana, distribuisce l'onda sonora in varie direzioni.

Coefficiente di scattering:

Lunghezza d'onda \rightarrow dimensione degli elementi diffondenti

1. scattering da oggetti
2. scattering da superfici

La misurazione dei materiali diffondenti può avvenire con due metodi:

a. metodo del campo libero (camera anecoica)

b. metodo del campo diffuso (camera riverberante) scala reale INRIM, scala 1:5 Politecnico di torino

Le superfici fonodiffondenti causano incoerenze nella parte tardiva delle riflessioni in una risposta all'impulso.

Progettazione materiali fonodiffondenti:

tipologie: diffusori mono e bidimensionali; superfici concave o convesse; superfici geometriche irregolari

Criteri geometrici, massimizzazione delle proprietà fonodiffondenti:

- a) La densità degli elementi irregolari deve essere circa 50-60%
- b) Le configurazioni irregolari degli elementi migliorano le prestazioni alle medie alte frequenze
- c) Gli elementi più larghi e alti ($>20\text{cm}$) incrementano i valori di scattering alle basse frequenze
- d) Le superfici curve producono uno scattering più uniforme tra frequenze successive e migliorano la distribuzione spaziale