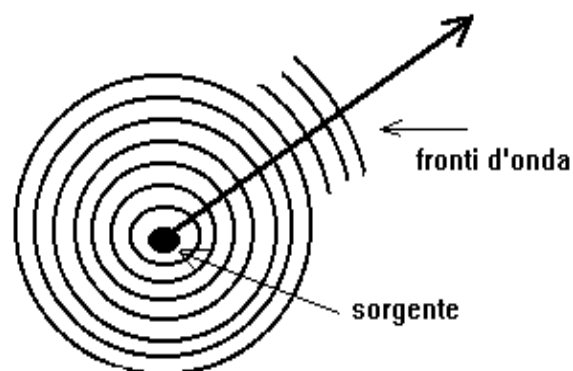


CAPITOLO 19

CENNI SULLA PROPAGAZIONE DEL SUONO

19.1 GENERALITÀ

In questo capitolo si richiameranno brevemente alcune problematiche relative alla propagazione del suono all'interno degli ambienti confinati (**acustica ambientale**) e sulla propagazione del suono attraverso elementi strutturali di separazione tra ambienti diversi (**isolamento acustico**). In figura è rappresentata una **sorgente sonora puntiforme isotropa** che emette onde sonore secondo superfici sferiche.



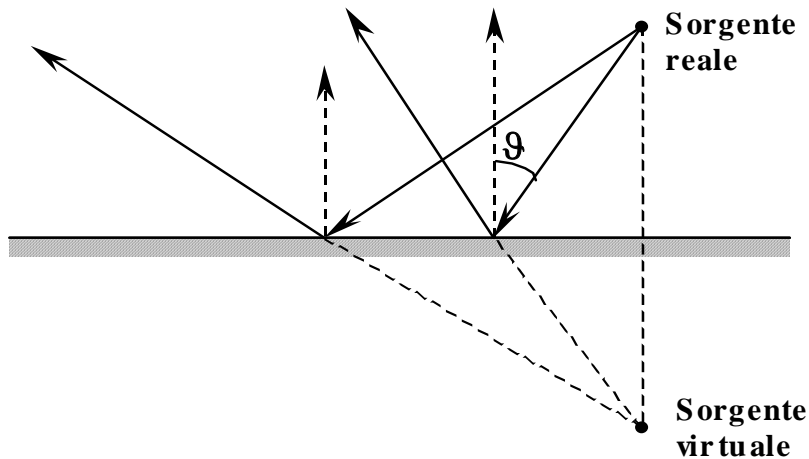
Si noti che un elemento del fronte d'onda, a sufficiente distanza dalla sorgente (in assenza d'ostacoli), può essere considerato come un'onda piana che si muova in linea retta, la cui propagazione può essere rappresentata graficamente mediante raggi sonori normali ai fronti d'onda stessi, come rappresentato nella precedente figura.

In presenza di ostacoli, come si ricorderà, e in dipendenza della lunghezza d'onda del suono e delle dimensioni dell'ostacolo, si verificheranno fenomeni di:

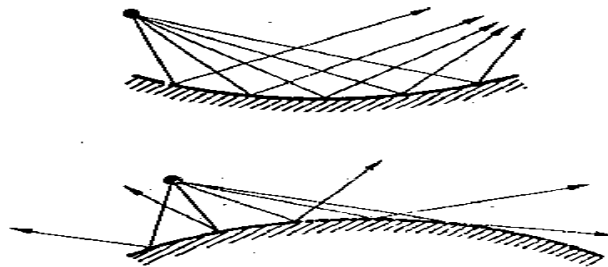
- *riflessione*;
- *diffrazione*;
- *rifrazione*.

19.2 RIFLESSIONE

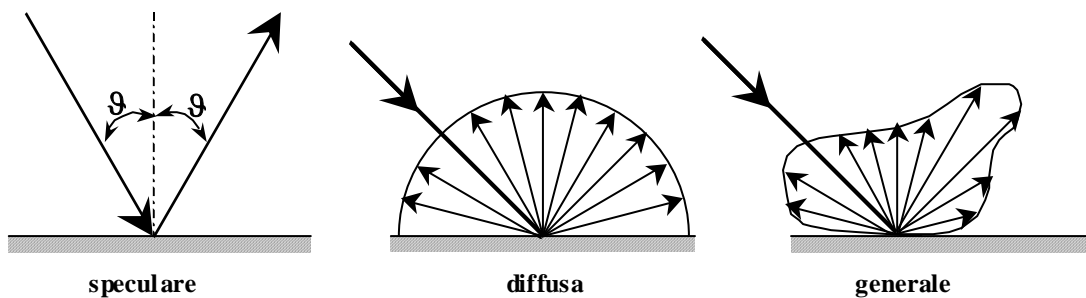
Se le dimensioni dell'ostacolo sono grandi rispetto alla lunghezza d'onda dell'onda sonora e le irregolarità presenti sulla superficie sono molto piccole sempre rispetto alla lunghezza d'onda, e cioè la superficie stessa appare "liscia", le leggi che descrivono la riflessione delle onde sonore sono simili a quelle già note che regolano la riflessione delle onde elettromagnetiche e luminose.



In particolare, come rappresentato in figura, il raggio riflesso forma lo stesso angolo θ con la normale alla superficie del raggio incidente e i due raggi giacciono sullo stesso piano. Si parla, in questi casi di riflessione speculare o regolare. Si osservi come l'onda riflessa si propaghi come se fosse emessa da una sorgente virtuale simmetrica alla sorgente reale. In questi casi, (λ molto minore delle dimensioni lineari dell'ostacolo), si possono adottare i semplici metodi grafici dell'acustica geometrica). È interessante ricordare che nel caso di riflessione regolare su superfici lisce concave si verifichi una concentrazione dei fronti d'onda, mentre nel caso queste siano convesse si verifichi invece una loro dispersione.



Se la superficie dell'ostacolo non risulta sufficientemente liscia, rispetto alla lunghezza d'onda delle onde sonore incidenti, la riflessione non è più di tipo regolare, bensì diffusa, come nell'esempio schematizzato in figura.



Nei riguardi della riflessione è ancora opportuno ricordare che il comportamento delle superfici reali risulta sempre intermedio tra le due situazioni limite già note ossia tra la riflessione speculare su una superficie liscia e la riflessione perfettamente diffusa, qualora la superficie risulti opportunamente "rugosa".

Si precisa che, ovviamente, i termini "liscia" e "rugosa" vanno intesi in senso relativo e cioè in relazione alla lunghezza d'onda delle onde sonore.

In modo simile alle onde elettromagnetiche, anche per un'onda sonora d'intensità I_i (vedi figura) incidente su una lastra si definiscono **fattori di riflessione, assorbimento e trasmissione**. Questi fattori, in generale variano con:

- angolo di incidenza delle onde sonore;
- frequenza delle onde sonore.

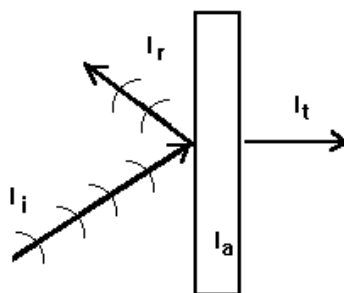
Per le applicazioni più comuni nell'acustica tecnica è in genere sufficiente riferirsi solo a valori medi per le varie bande d'ottava o a terzi d'ottava, specificando talvolta anche le condizioni d'incidenza delle onde sonore.

In questa ipotesi si può porre:

$$\mathbf{r} = \frac{I_r}{I_i}$$

$$\mathbf{a} = \frac{I_a}{I_i}$$

$$\mathbf{t} = \frac{I_t}{I_i}$$



ove: I_r , I_a , I_t indicano le *intensità relative rispettivamente all'onda riflessa, assorbita* (nello spessore del materiale) e *trasmessa* (al di là della lastra).

Tra i tre fattori esiste, ovviamente, la seguente relazione:

$$\mathbf{a} + \mathbf{r} + \mathbf{t} = \mathbf{1}$$

ad esempio, se la lastra è perfettamente riflettente ($\mathbf{r} = \mathbf{1}$), risulterà anche:

$$\mathbf{a} = \mathbf{t} = \mathbf{0}$$

È opportuno precisare che, spesso, interessa solo l'energia acustica riflessa verso l'ambiente, per cui si definisce *fattore di assorbimento apparente* \mathbf{a}' :

$$\mathbf{a}' = \mathbf{a} + \mathbf{t}$$

per cui si scrive abitualmente:

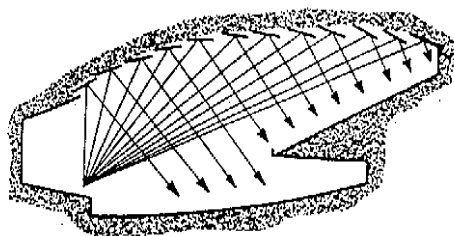
$$\mathbf{a}' + \mathbf{r} = \mathbf{1}$$

Spesso, per semplicità, si indica il fattore d'assorbimento apparente a' semplicemente con a , scrivendo quindi:

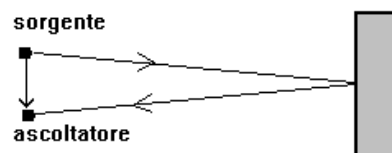
$$a + r = 1$$

Oltre a ciò, è opportuno ricordare che se le superfici delimitanti l'ambiente sono sufficientemente lisce ed estese (ovviamente, rispetto a λ del suono incidente) i raggi sonori incidenti saranno riflessi specularmente mentre nel caso opposto (superfici poco estese, presenza di profili irregolari, ecc.) anche a causa dei citati fenomeni di diffrazione, la riflessione avverrà in forma più o meno diffusa.

Ad esempio, come rappresentato in figura, la riflessione da parte di superfici lisce (specchi acustici) può essere utilizzata nella progettazione di sale e auditorium al fine di meglio distribuire le onde sonore evitando la formazione di zone d'ombra in alcune zone dell'ambiente.



La riflessione delle onde sonore da parte delle pareti di un ambiente può essere origine di particolari fenomeni detti **eco** e **near-eco**. In riferimento alla figura, si osservi come il cammino percorso dal suono diretto (tra sorgente e ascoltatore) risulta sempre inferiore al



cammino percorso dal suono riflesso, che giungerà in **A** con un ritardo $\Delta\tau$ rispetto al primo. In relazione all'entità del ritardo $\Delta\tau$ possono presentarsi casi diversi:

$\Delta\tau > \frac{1}{10}$ [s] l'ascoltatore distingue chiaramente i due impulsi;

$\frac{1}{20}$ [s] $< \Delta\tau < \frac{1}{10}$ [s] l'ascoltatore avverte sempre un unico suono, ma alquanto prolungato nel tempo;

$\Delta\tau < \frac{1}{20}$ [s] l'ascoltatore avverte un unico impulso rafforzato.

Ovviamente i due suoni provengono da differenti direzioni e cioè dalla sorgente acustica effettiva e dalla sorgente virtuale per il suono riflesso. Si può precisare che nei due ultimi casi la provenienza direzionale del suono stimata dall'orecchio coincide con la

direzione effettiva in quanto l'orecchio assegna la direzione di un suono in base alla direzione del primo impulso che giunge all'ascoltatore (**effetto Haas**).

Si può ancora osservare che la condizione $\Delta\tau > 1/10$ [s] (percezione di due suoni distinti o **eco**) si verifica se la differenza di cammino tra i due percorsi è:

$$\Delta l > c\Delta\tau = 340/10 = 34 \text{ [m]}.$$

Ossia, si percepirà eco se la distanza sorgente-parete riflettente sarà pari $\Delta l / 2 = 17$ [m].

Ovviamente, perché il fenomeno dell'eco si verifichi, è necessario che il suono riflesso sia caratterizzato da un'intensità sufficiente a essere chiaramente percepito.

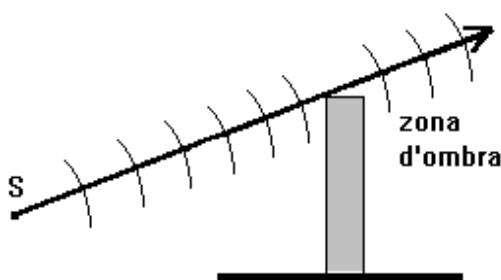
Quanto detto richiede, perché si possa verificare, un'eco apprezzabile, che la parete riflettente sia caratterizzata da un elevato fattore di riflessione oppure sia adeguatamente concava così da poter focalizzare le onde riflesse in prossimità del punto d'ascolto.

In particolari situazioni potranno anche verificarsi **echi multipli** dovuti a riflessioni successive tra pareti affacciate, distanti e molto riflettenti (**eco fluttuante**).

19.3 DIFFRAZIONE

Fenomeni di diffrazione sono comuni a tutti i tipi di onde e, pertanto, si verificano anche nel caso delle onde sonore.

Nella situazione rappresentata in figura, che si riferisce al caso in cui la lunghezza d'onda λ di un'onda sonora sia molto più piccolo delle dimensioni dell'ostacolo (muro), la propagazione delle onde sonore verrà ad essere nettamente delimitata con formazione di una zona d'ombra ove il suono non è percepibile.

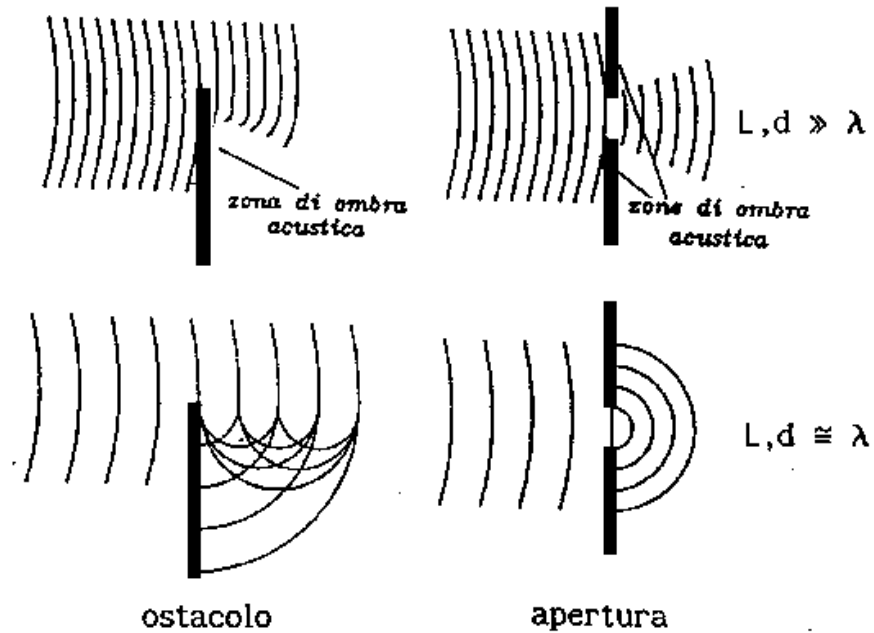


A causa della diffrazione, però l'ombra acustica del muro risulterà in genere molto meno definita del caso rappresentato in figura.

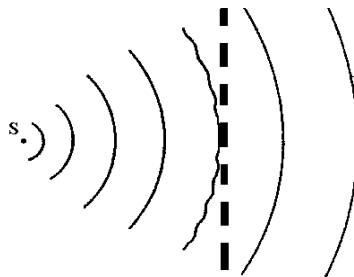
Il fenomeno interesserà soprattutto i suoni con lunghezze d'onda paragonabili alle dimensioni dell'ostacolo (in genere campo medio-basso delle frequenze udibili). Quando la diffrazione condiziona la propagazione delle onde acustiche in modo apprezzabile, lo studio della propagazione non può più essere condotto tracciando linee e segmenti (approccio tipico

dell'**acustica geometrica**) anche se può essere ancora utilizzato un procedimento grafico (**principio di Huygens**). In particolare, ogni punto della zona interessata alla propagazione delle onde può essere considerato una sorgente puntiforme secondaria emettente fronti d'onda sferici.

A seconda della lunghezza d'onda delle onde sonore, in relazione alle dimensioni dell'ostacolo (ove, ad esempio, **L** rappresenta l'altezza di un muro e **d** l'ampiezza di un'apertura nel muro stesso), comportamenti diversi, come illustrato in figura.



Se poi, infine, un'onda sonora interagisce con ostacoli le cui dimensioni fisiche siano decisamente inferiori alla lunghezza d'onda, l'ostacolo può essere considerato trasparente, in altre parole è come se non esistesse.



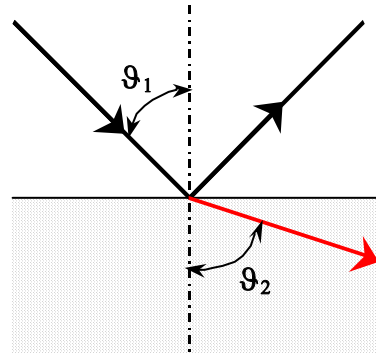
19.4 RIFRAZIONE

Un'onda sonora, rappresentata mediante un raggio sonoro, in conseguenza del passaggio tra un mezzo ed un altro, subisce anche un fenomeno di rifrazione, intendendo per questo una deviazione dei raggi sonori stessi, come rappresentato in figura.

La rifrazione sonora segue una legge analoga a quella dell'ottica geometrica, ovvero:

$$\frac{\sin \vartheta_1}{\sin \vartheta_2} = \frac{c_1}{c_2}$$

ove: c_1 , c_2 rappresentano le velocità del suono nei due mezzi. Fenomeni di rifrazione possono verificarsi nel passaggio tra due strati d'aria a diversa temperatura.



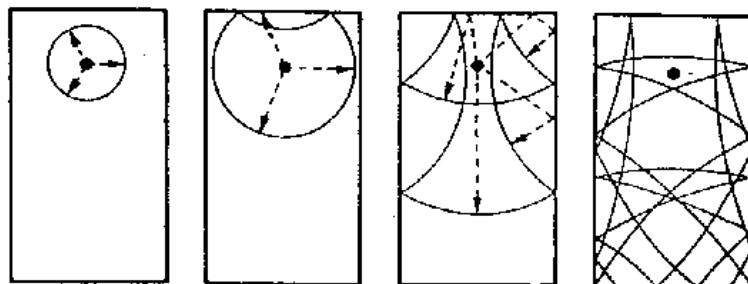
19.5 CENNI SULLA RIVERBERAZIONE

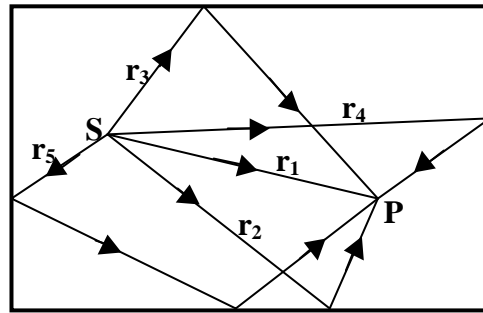
In generale, il campo sonoro che viene a stabilirsi all'interno di un ambiente è formato dalla sovrapposizione di:

- un campo sonoro **diretto**;
- un campo sonoro **riflesso** o **riverberato**.

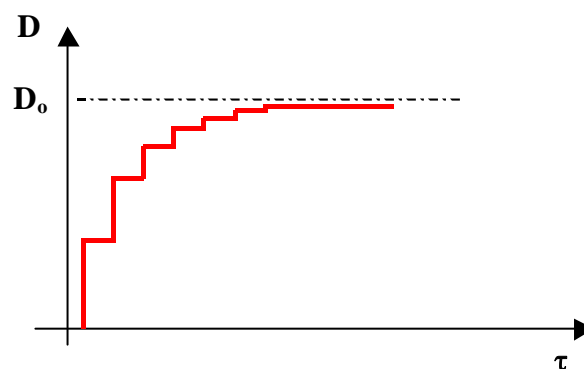
L'entità dei contributi riflessi che pervengono all'orecchio di un ascoltatore (e anche il loro più o meno grande ritardo temporale rispetto al suono diretto) risultano molto importanti al fine definire il comportamento acustico di un ambiente. Questi effetti (sovrapposizione tra i contributi diretti e quelli riflessi, permanenza nel tempo di suoni continuamente riflessi tra le superfici delimitanti l'ambiente) dipendono dalle caratteristiche geometriche dell'ambiente e dai fattori di riflessione che caratterizzano le varie superfici affacciate all'ambiente.

Si consideri una sorgente che inizi ad emettere onde sonore in ambiente (vedi figura); poco dopo l'inizio dell'emissione sonora si verificheranno una serie di riflessioni multiple delle onde che determinano il comportamento acustico dell'ambiente.



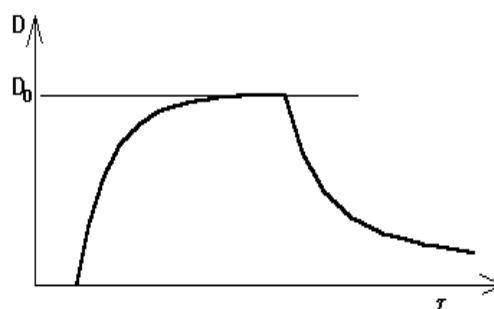


Se si fa uso della rappresentazione mediante raggi sonori (figura), si può osservare che in un punto, situato ad una distanza r_1 dalla sorgente, giunge il suono diretto emesso da questa all'istante $\tau_0 = 0$ dopo un tempo $\Delta\tau_1 = r_1 / c$. In tale istante si avrà, quindi, nel punto considerato, un incremento D_1 della densità sonora D rappresentato nel seguente diagramma. Dopo un altro intervallo di tempo $\Delta\tau_2$ giunge nel punto P un ulteriore contributo d'energia sonora dovuto all'onda riflessa che ha seguito il percorso r_2 . Considerando successivamente anche i contributi di energia sonora dovuti ad altri percorsi possibili, si potranno riportare, sul diagramma prima rappresentato, i successivi incrementi $D_2...D_n$.



Si può osservare che questi incrementi risulteranno via via d'entità sempre decrescente, a causa della divergenza delle onde sonore (maggiore distanza percorsa) e a causa delle riflessioni subite. Nella realtà il fenomeno, a causa del gran numero di riflessioni possibili, non risulta di carattere discontinuo come qui descritto, ma si assiste ad un graduale e continuo e aumento della densità sonora D fino al raggiungimento asintotico di un valore D_0 detto *densità sonora di regime*.

L'aumento progressivo della densità sonora D in funzione del tempo che si verifica quando una sorgente inizia ad emettere suoni non è il solo effetto provocato dalle pareti riflettenti che debba essere considerato. Infatti, interessa in modo particolare il processo opposto e cioè lo smorzamento progressivo della densità sonora che consegue alla cessazione del funzionamento della sorgente stessa (vedi figura).



La più o meno grande rapidità con cui la densità sonora decade nel tempo o **riverberazione acustica**, esercita una notevole influenza sulla comprensibilità delle parole e sulla qualità dei suoni musicali. Una riverberazione del suono troppo lunga, che avvenga in una sala, non consente una chiara percezione delle singole sillabe del parlato e può portare a confondere i suoni emessi ad un certo istante con le ultime riflessioni dei suoni precedenti. D'altra parte una riverberazione del suono insufficiente non consente di rinforzare adeguatamente le onde dirette con contributi riflessi.

Il problema può semplificarsi sensibilmente se si ipotizza che **l'energia sonora nell'ambiente sia sempre perfettamente diffusa**. In altre parole, il **campo** sonoro che si viene a stabilire è sempre **isotropo**, cioè formato da un gran numero di onde sonore che si propagano in tutte le direzioni, senza che sia possibile individuare una direzione privilegiata di propagazione; in questo caso la **densità energetica** sonora sarà **uniforme in tutto l'ambiente** e si potrà considerare $D = D(\tau)$ funzione solo del tempo τ , anziché come funzione complessa $D = D(x,y,z,\tau)$. In questi casi il comportamento acustico di un ambiente può essere caratterizzato con un **unico parametro** detto **tempo convenzionale di riverberazione** τ_0 o intervallo di tempo perché, al cessare del funzionamento della sorgente, il livello di densità sonora $D(\tau)$ si riduca a **1 milionesimo** del valore iniziale D_0 , e cioè in termini di livello, scenda di **60 [dB]** sotto il valore iniziale. Se le pareti che delimitano una sala (volume V) sono caratterizzate da un fattore di assorbimento acustico a il tempo convenzionale di riverberazione può valutarsi con relazione di **Sabine**:

$$\tau_c = 0.16 \cdot \frac{V}{aS} = \frac{0.16V}{A^*}$$

Qualora le superfici delimitanti l'ambiente siano di diversa natura, ad esempio siano presenti superfici S_1, S_2, S_3 caratterizzate da fattori di assorbimento a_1, a_2, a_3 , si potrà sempre considerare un assorbimento totale A^* dell'ambiente pari a:

$$A^* = \sum a_i S_i = a_m S$$

ove, ovviamente, il fattore di assorbimento medio a_m coincide con la *media pesata dei singoli fattori di assorbimento*:

$$a_m = \frac{\sum a_i \cdot S_i}{S}$$

Se all'interno dell'ambiente esistono poi arredi (poltrone, persone, ecc..) sarà necessario considerare anche questi ulteriori contributi di assorbimento acustico A_i ponendo:

$$A^* = \sum a_i S_i + \sum A_i$$

Queste grandezze $\sum a_i S_i$ e $\sum A_i$ si esprimono in $[m^2]$ detti Sabine.

Ovviamente il tempo convenzionale di riverberazione τ_0 dipenderà dalla frequenza del suono poiché, in generale, da questa dipendono i fattori di assorbimento delle superfici che delimitano il volume V dell'ambiente.

Nella seguente tabella si riportano i fattori medi d'assorbimento sonoro nelle bande d'ottava per alcuni comuni materiali e per materiali fonoassorbenti e cioè per superfici caratterizzate da elevati valori del fattore di assorbimento.

Materiale	frequenza centrale di banda f_c					
	125	250	500	1000	2000	4000
Parete intonacata	0.01	0.01	0.02	0.04	0.04	0.04
Marmo	0.01	0.01	0.02	0.03	0.03	0.03
Asfalto	0.02	0.03	0.03	0.03	0.03	0.02
Poliuretano espanso (spessore 2 cm)	0.07	0.20	0.40	0.55	0.70	0.70
Moquette	0.05	0.13	0.2	0.42	0.48	0.48
Pannello fibre di legno	0.15	0.25	0.45	0.60	0.60	0.50
Pannello forato di legno (foratura 6 % ; spessore 0.5 cm; intercapedine 4.5 cm con 2.5 cm di lana di vetro)	0.15	0.35	0.82	0.52	0.23	0.22
Pannello in compensato di legno (spessore 0.5 cm ; intercapedine 5cm)	0.40	0.25	0.15	0.10	0.10	0.05

Tabella dei fattori di assorbimento di alcuni materiali

In generale, materiali e pannelli fonoassorbenti sono classificati in tre differenti categorie in relazione alle modalità prevalenti di assorbimento del suono:

- a) materiali porosi o fibrosi (in genere messi in opera su una superficie rigida);
- b) materiali con cavità (risuonatori);
- c) pannelli vibranti.

Nei **primi** l'assorbimento acustico è principalmente legato alla dissipazione di energia acustica per attrito tra l'aria e le pareti interne dei pori (poliuretani espansi, feltri, lana di

roccia etc.) e sono più efficaci per assorbire le **frequenze medio-alte** dello spettro acustico. I **materiali con cavità (pannelli forati)**, più efficaci per assorbire le **frequenze medie** dello spettro acustico, sfruttano un particolare **effetto fisico** detto **di risonanza**.

Questo fenomeno determina un **assorbimento acustico massimo** in corrispondenza ad una ben **determinata frequenza** (frequenza di risonanza) che dipende dal volume delle cavità retrostante il collo dell'apertura e dalle caratteristiche geometriche di questo. I **pannelli vibranti** sfruttano anch'essi un effetto di risonanza e sono costituiti da lastre non porose montate su supporti rigidi che le tengono distanziate dalla parete da trattare. I **pannelli vibranti** sono efficaci per assorbire le **frequenze basse** dello spettro acustico.

19.5.1 Tempo ottimale di riverberazione

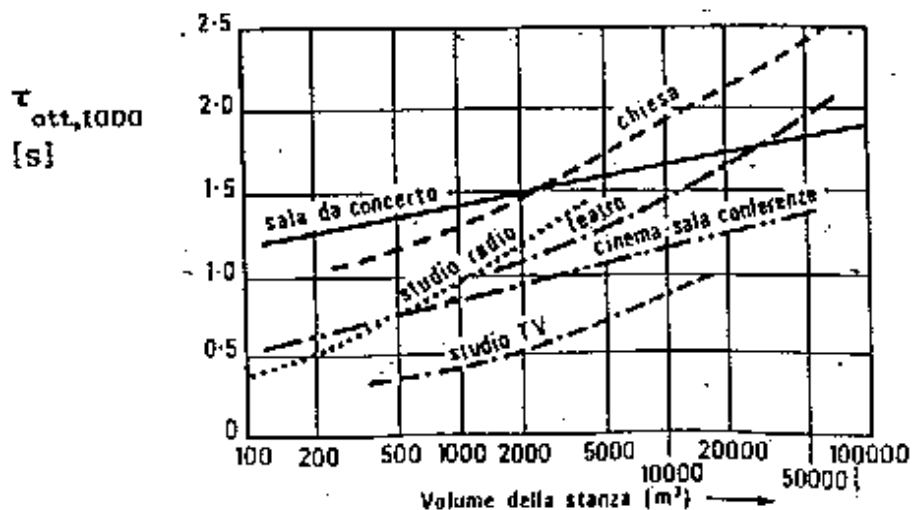
Il **tempo convenzionale di riverberazione** τ_0 , come già visto, fornisce un'indicazione essenziale circa l'accettabilità acustica dell'ambiente stesso. Per **tempo ottimale di riverberazione** s'intende il valore del tempo di riverberazione più conveniente in relazione alla destinazione della sala. Il valore del tempo di riverberazione considerato ottimale $\tau_{\text{ott},1000}$ alla frequenza di **1000 [Hz]** per le varie destinazioni, dedotto dall'esperienza, può essere valutato in funzione del volume **V** della sala mediante la seguente relazione empirica:

$$\tau_{\text{ott},1000} = K \cdot V^n$$

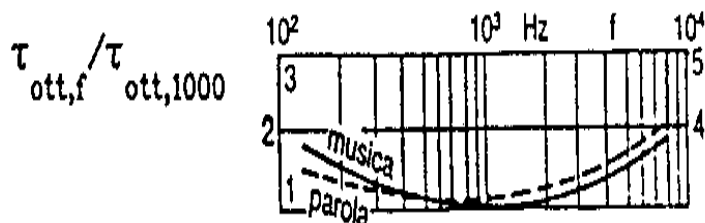
ove le costanti **K** ed **n** da considerarsi nei vari casi sono:

parola	K = 0.3 - 0.4	n = 6 - 9
musica leggera	K = 0.5 - 0.6	n = 6 - 9
musica organistica	K = 0.7 - 0.8	n = 6 - 9

Tempi di riverberazione considerati ottimali per varie destinazioni sono anche riportati nella seguente figura.



I tempi ottimali di riverberazione $\tau_{\text{ott},f}$ a frequenze $f \neq 1000$ [Hz] possono essere indicativamente valutati in relazione al valore ottimale $\tau_{\text{ott},1000}$ a **1000 Hz**, in base alla seguente figura che fornisce il rapporto $\frac{\tau_{\text{ott},f}}{\tau_{\text{ott},1000}}$.



Si può osservare come risulti difficile progettare ambienti adatti a destinazioni diverse: ad esempio, una sala da conferenza richiede tempi di riverberazione diversi da quelli per una sala da concerto. Anche in quest'ultimo caso vi sono notevoli differenze secondo il genere musicale (concerto, opera italiana, opera Wagneriana, musica da camera, ecc.).

19. 6 CENNI SULL'ISOLAMENTO ACUSTICO DELLE STRUTTURE EDILIZIE

L'isolamento acustico studia come contenere l'entità di suoni e rumori trasmessi in ambienti confinati attraverso pareti perimetrali, tramezzi e solai da **sorgenti acustiche esterne** agli ambienti stessi. L'origine del rumore può essere traffico veicolare, ferroviario, sorgenti industriale etc. oppure anche radio, TV elettrodomestici o impianti. In generale, si può affermare che una **accettabile qualità acustica** degli edifici potrà essere ottenuta solo con una preventiva pianificazione urbanistica e con un'adeguata progettazione degli edifici. In questo ambito, trova ovviamente conferma sul campo il concetto che è molto meglio prevedere in fase di progettazione piuttosto che dover poi intervenire con interventi tampone spesso di relativa efficacia. Ad esempio, strade di scorrimento mal progettate su cui si affacciano edifici non "pensati" per offrire una sufficiente protezione acustica, ad esempio con camere da letto munite di serramenti leggeri.

Una tipica modalità d'immissione di suoni o più propriamente di rumori all'interno degli ambienti è la **via aerea**. Più in particolare le onde sonore incidenti sui divisori (pareti, tramezzi e solai) trasmettono a questi una perturbazione fluttuante, che ne determina la vibrazione e, quindi, anche una parziale ri-emissione di onde sonore dalla parte opposta. È evidente che maggiore è la massa della parete più contenuta sarà l'ampiezza della vibrazione e minore la trasmissione. Infine, non va trascurata la trasmissione del suono per via aerea diretta, nei casi (molto comuni) di una **non perfetta chiusura** di infissi (porte e finestre). Un

altro caso è rappresentato dalla trasmissione aerea di rumore negli ambienti attraverso i **condotti di impianti di condizionamento dell'aria**, ad esempio intercomunicanti tra diversi ambienti. In tali casi il rumore trova una via preferenziale di propagazione senza apprezzabile riduzione della sua intensità.

Altra importante modalità di trasmissione del rumore è legata al fatto che le sorgenti sonore, oltre ad emettere onde sonore nell'aria, molto spesso trasmettono anche per "**via solida**" vibrazioni alle strutture dell'edificio. Un simile effetto può anche conseguire a urti e sollecitazioni meccaniche agenti sulle strutture, quali ad esempio il calpestio di persone su una scala ecc. La vibrazione delle strutture si trasmette a sua volta attraverso i divisori determinando l'immissione di suoni e rumori in altri locali.

Può osservarsi che, a differenza dei suoni trasmessi per via aerea, i quali interessano in genere solo i locali adiacenti, i suoni trasmessi per via strutturale possono raggiungere anche ambienti più lontani. Questi fenomeni possono essere controllati solo interrompendo opportunamente il percorso delle vibrazioni, ad esempio mediante inserti di materiali cedevoli (resilienti).

19. 6.1 Fonoisolamento

Allorché un'onda sonora incontra la superficie di una divisorio tra ambienti contigui (ad esempio ambiente esterno-ambiente interno nel caso di una parete perimetrale, ambiente interno-interno nel caso di un tramezzo interno), una frazione dell'energia dell'onda viene riflessa e la restante è in parte assorbita e in parte trasmessa attraverso la parete. L'assorbimento di energia nella parete è dovuto a effetti di attrito interno (fenomeni di smorzamento) che determinano una trasformazione continua di energia meccanica in calore. Poiché le onde sonore incidono anche con diversa angolazione la parete potrà anche essere soggetta ad un tipo diverso di vibrazioni e cioè a vibrazioni flessionali che trasmettono parte dell'energia sonora in direzione parallela al piano della parete fino ai suoi bordi e da questi alle strutture confinanti. Questa porzione di energia trasmessa lateralmente in alcuni casi può in taluni casi limitare seriamente l'isolamento acustico.

Per caratterizzare la trasmissione del suono attraverso un elemento divisorio, ad esempio un tramezzo che separa due ambienti, è necessario fare riferimento al suo fattore di trasmissione **t**. Dal punto di vista del comportamento del divisorio, come elemento atto a ridurre il livello sonoro indotto in un ambiente, interessa solo il fattore di trasmissione **t**. Per caratterizzare, a questo riguardo, la prestazione del divisorio, anziché riferirsi al fattore **t** si preferisce utilizzare un'opportuna unità logaritmica detta **potere fonoisolante R**.

Si definisce **potere fonoisolante R** la differenza dei livelli di potenza sonora incidente e trasmessa:

$$R = 10 \cdot \text{Log} \frac{\Pi_i}{\Pi_o} - 10 \cdot \text{Log} \frac{\Pi_t}{\Pi_o} = 10 \cdot \text{Log} \frac{\Pi_i}{\Pi_t} = 10 \cdot \text{Log} \frac{1}{t}$$

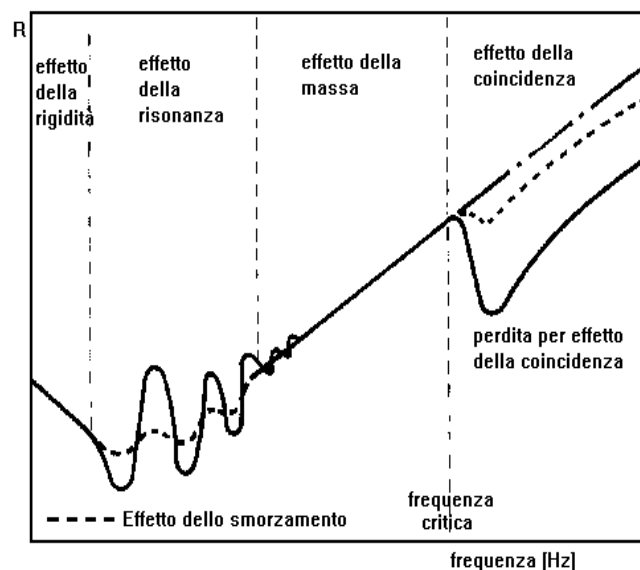
ove l'argomento del logaritmo rappresenta l'inverso del fattore di trasmissione **t** sopra definito. Nel casi pratici si ha una situazione di campo acustico mediamente diffuso per cui il potere fonoisolante **R** è:

$$R = 20 \text{ Log} (m f) - 47.2$$

Questa relazione va sotto il nome di "**legge della massa**". Secondo tale legge ad un raddoppio della massa specifica del pannello, ovvero della frequenza, si ottiene un aumento del potere fonoisolante di 6 [dB].

Se si rappresenta l'andamento di **R** in funzione della logaritmo della frequenza si ha un andamento lineare.

Nella pratica si osservano deviazioni da questo andamento teorico.



In figura è mostrato un siffatto diagramma con l'indicazione d'intervalli di frequenza caratteristici. Si noti come la legge della massa descriva correttamente l'effettivo andamento di **R** solo in un campo limitato di frequenza.

Esternamente all'intervallo di validità della legge della massa intervengono altri effetti alquanto complessi come illustrato in figura.

Tramezzi composti

Se la parete ha complessivamente un numero i di porzioni (di superficie S_i) con fattore di trasmissione t_i diverso, allora ci si può riferire a un fattore t_m medio pesato, definito da:

$$t_m = \frac{\sum_i S_i t_i}{\sum_i S_i}$$

Il potere fonoisolante R della parete composta potrà allora essere espresso da:

$$R = 10 \text{ Log} \left(\frac{1}{t_m} \right)$$

Pareti doppie

Una tecnica per migliorare il potere fonoisolante di una parete, senza aumentare la sua massa per unità d'area, consiste nel suddividere il materiale in due strati paralleli, separati da un'intercapedine d'aria e possibilmente resi indipendenti.

Attraverso questa parete il suono si trasmette secondo modalità diverse:

- il primo strato, posto in vibrazione dall'onda sonora incidente, irradia suono nell'intercapedine ponendo in vibrazione il secondo strato. Quest'ultimo, infine, emette nell'ambiente confinante;
- il secondo meccanismo riguarda la trasmissione per via solida attraverso i vincoli strutturali che collegano i due strati; tale modalità di trasmissione viene di solito definita percorso di fiancheggiamento per via strutturale.

In prima approssimazione, il potere fonoisolante di una parete a due strati può raggiungere valori anche dell'ordine di:

$$R \cong R_1 + R_2 + 6 \quad [\text{dB}]$$

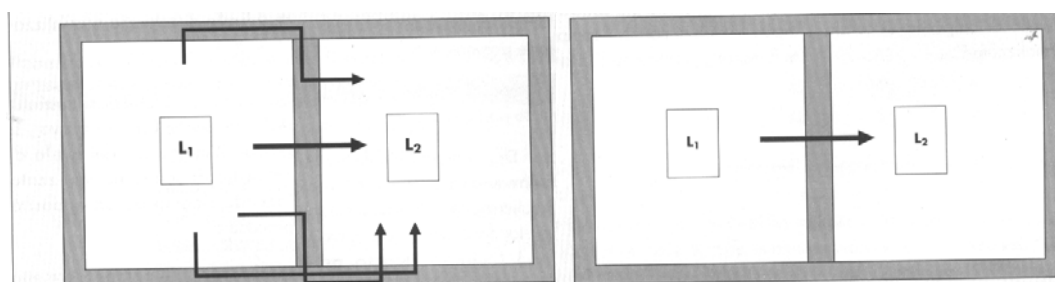
nella quale R_1 e R_2 sono relativi ai due strati considerati separatamente.

Nella seguente tabella si riportano, a titolo indicativo, valori del potere fonoisolante alle varie bande d'ottava di alcune comuni strutture edilizie.

Frequenze dei divisori [Hz]	Potere fonoisolante [dB]					
	125	250	500	1000	2000	4000
Parete in mattoni pieni intonacata (spessore 12 cm, 220 kg/m ²)	34	35	40	50	55	57
Parete in mattoni pieni intonacata (spessore 24 cm, 440 kg/m ²)	40	44	50	56	57	57
Parete in mattoni forati (spessore 28 cm)	37	43	52	60	64	65
Parete in calcestruzzo (2 strati 5 cm + intercapedine 7.5 cm)	37	40	50	54	56	63
Parete in calcestruzzo (2 strati 7.5 cm + intercapedine 7.5 cm)	37	40	50	54	56	63
Divisorio in gesso-perlite (spessore 5 cm, 49 kg/m ²)	26	28	30	31	42	47
Divisorio in gesso-perlite (spessore 6.3 cm, 107 kg/m ²)	31	30	29	35	45	52
Finestra vetro singolo (3mm)	11	17	23	25	26	27
Finestra a doppio vetro (6mm; intercapedine 120mm)	25	32	38	45	49	57

19.6 Isolamento acustico per rumori aerei

Il **potere fonoisolante** è una proprietà della parete che, come tale, non tiene conto dell'influenza degli ambienti contigui né di possibili ulteriori vie di trasmissione del suono (trasmissione laterale). Per descrivere più compiutamente l'effetto di riduzione del livello sonoro determinato da una parete o da un divisorio interposto tra ambienti diversi adiacenti si definisce **isolamento acustico** la differenza tra il livello sonoro L_1 esistente nell'ambiente in cui è posta ad esempio la sorgente acustica (ambiente disturbante) e quello L_2 misurabile nell'ambiente ricevente oltre il divisorio (ambiente disturbato).



In genere, come rappresentato in figura, si realizza una trasmissione di contributi sonori anche per vie diverse da quella diretta attraverso il tramezzo.

Se si considera però unicamente la trasmissione attraverso il tramezzo e perfettamente diffuso il campo sonoro nei due ambienti, l'**isolamento acustico** $L_1 - L_2$ può esprimersi in funzione del potere fonoisolante R secondo la relazione:

$$L_1 - L_2 = R - 10 \text{ Log} \left(\frac{S}{A_2^*} \right)$$

ove A_2^* = assorbimento dell'ambiente disturbato.

Pertanto, si vede come l'**isolamento acustico**, inteso come riduzione complessiva del livello sonoro tra i due ambienti, dipenda dal potere fonoisolante del divisorio e dalle caratteristiche del divisorio (superficie S) e dell'ambiente ricevente (assorbimento globale A_2^*). Al fine di caratterizzare il comportamento acustico del divisorio, svincolando la misura dalle caratteristiche dell'ambiente ricevente (ad esempio l'arredamento), in luogo dell'isolamento acustico $L_1 - L_2$ ci si può riferire all'**isolamento acustico normalizzato**, D_n , definito come:

$$D_n = R - 10 \text{ Log} \left(\frac{S}{A_0^*} \right)$$

ove A_0^* = valore di riferimento per l'assorbimento totale pari a 10 m^2 .

D_n rappresenta quindi l'isolamento acustico $L_1 - L_2$ che si otterrebbe utilizzando un tramezzo di potere fonoisolante R , con l'ambiente di riferimento e cioè con un ambiente avente un assorbimento totale $A_0^* = 10 \text{ [m}^2\text{]}$.

Risulta quindi:

$$R = D_n + 10 \text{ Log} \left(\frac{S}{A_0^*} \right)$$

Se lo stesso tramezzo costituisse elemento di separazione con un ambiente con A^* risulterebbe:

$$R = L_1 - L_2 + 10 \text{ Log} \left(\frac{S}{A^*} \right)$$

Eguagliando le due espressioni di R si ottiene anche:

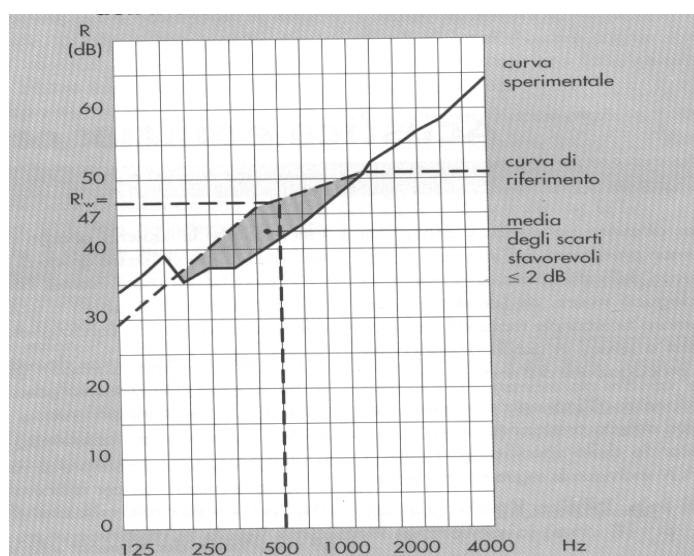
$$L_1 - L_2 = D_n + 10 \text{ Log} \left(\frac{A^*}{A_0^*} \right) = D_n + 10 \text{ Log} (\tau/\tau_0)$$

19. 6.1 Indici di valutazione

Per classificare gli elementi divisorii (pareti perimetrali, elementi di separazione tra unità immobiliari), anziché riferirsi al potere fonoisolante R alle **varie bande di ottava o a terzi d'ottava**, si usa fare riferimento ad opportuni valori medi di tali proprietà detti indici. Questi indici consentono di caratterizzare con un solo numero le proprietà degli elementi divisorii consentendo di confrontare facilmente elementi diversi. Il criterio seguito, sia nel caso di elementi di facciata che di tramezzi prevede un **confronto grafico** tra i valori di R e

curve di riferimento. Le curve di riferimento vengono traslate sul diagramma fino a soddisfare alcune condizioni relative alla media degli scarti sfavorevoli e favorevoli. Una volta che tale condizione sia stata realizzata l'**indice di valutazione** desiderato corrisponde al **valore letto** in corrispondenza alla curva di riferimento ad una particolare frequenza (in genere 500 [Hz]).

Nella figura seguente, a solo titolo illustrativo, si riporta il suddetto confronto grafico tra la curva di riferimento (curva tratteggiata) e i dati misurati (curva continua) per valutare l'indice di valutazione acustica R'_w del **potere fonoisolante apparente** di partizioni, a partire da misure effettuate in opera



Il potere fonoisolante apparente R'_w è legato al potere fonoisolante R_w misurato in laboratorio dalla relazione:

$$R'_w = R_w - a$$

ove a rappresenta la media dei contributi dovuti alle trasmissioni laterali.

19. 6.2 Cenni sulle normativa relativa ai requisiti acustici passivi degli edifici

Il decreto **attuativo DPCM 5/12/97** della **legge quadro n°447** “Determinazione dei requisiti acustici passivi degli edifici” ha introdotto una serie di disposizioni relativi ai requisiti acustici delle sorgenti sonore interne agli edifici, ai requisiti acustici passivi degli edifici e dei loro componenti in opera al fine di ridurre l’esposizione umana al rumore. Il Decreto suddivide gli edifici in **7 categorie in relazione alla loro destinazione d’uso**, ad

esempio, categoria **A** edifici abitativi a residenza o assimilabili, categoria **B** edifici per uffici e assimilabili etc.

Per ciascuna categoria di edifici, il Decreto fissa i **requisiti acustici** seguenti:

- indice di valutazione del potere fonoisolante apparente tra due ambienti;
- isolamento acustico normalizzato di facciata;
- indice del livello di rumore da calpestio per i solai;
- livello di rumore massimo per gli impianti tecnologici a funzionamento discontinuo (in ambienti diversi da dove questi sono posizionati);
- livello di rumore equivalente accettabile per gli impianti tecnologici a funzionamento continuo (in ambienti diversi da dove questi sono posizionati).

Ad esempio, nel caso di edifici di categoria **A**, si hanno rispettivamente i seguenti requisiti:

- indice di valutazione potere fonoisolante apparente tra due ambienti 50 [dB];
- isolamento acustico normalizzato di facciata 40 [dB];
- indice del livello di rumore da calpestio per i solai 63 [dB];
- livello di rumore massimo per gli impianti tecnologici a funzionamento 35 [dB(A)];
- livello di rumore equivalente per gli impianti tecnologici a funzionamento 35 [dB(A)].

ESERCIZI ED ESEMPI

1) Si supponga di dover verificare se il tempo convenzionale di riverberazione τ_c di una sala per conferenze, di forma parallelepipedica con dimensioni **8 x 15 x 4 m**. Le pareti delimitanti l'ambiente sono tutte intonacate ed i pavimenti in marmo. I posti a sedere sono **80**.

Per semplicità ci si limiterà alla sola la banda di ottava con frequenza di centro banda $f_c = 1000$ [Hz]. I calcoli potranno poi essere ripetuti anche per le tutte altre bande d'ottava (o bande a terzi d'ottava) dello spettro sonoro.

a) tempo di riverberazione ottimale $\tau_{ott,1000}$ a 1000 [Hz]

Il tempo di riverberazione ottimale può essere valutato mediante la relazione empirica prima presentata. In relazione alla destinazione della sala (conferenze) si può assumere $K = 0.35$ ed $n = 8$. Risulta:

$$\tau_{ott,1000} = K V^{1/n} = 0.78 \text{ s}$$

b) tempo di riverberazione effettivo della sala

Per valutare il tempo di riverberazione si può utilizzare la relazione di Sabine:

$$\tau_c = 0.16 V / A^*$$

Si supponga che nella sala siano occupati 1/3 dei posti a sedere (questa situazione sarà anche la più critica). L'assorbimento totale dell'ambiente A^* è :

$$A^* = \sum a_i S_i + \sum A_i$$

I fattori di assorbimento medi per la banda d'ottava **1000 [Hz]** possono essere ricavati da manuali tecnici o dalla tabella prima riportata. Si supponga:

- parete intonacata (indice 1) $a_1 = 0.04$ $S_1 = 304 \text{ [m}^2\text{]}$

- pavimento in marmo (indice 2) $a_2 = 0.03$ $S_2 = 120 \text{ [m}^2\text{]}$

Gli assorbimenti $\sum A_i$ relativi alle persone presenti (si trascurano i contributi di assorbimento dovuti alle sedie) risultano:

$$\sum A_i = 1/3 \cdot 80 \cdot 0.55 = 14 \text{ [m}^2\text{]}$$

L'assorbimento totale A^* risulta quindi pari a:

$$A^* = 30 \text{ [m}^2\text{]}$$

Il tempo convenzionale di riverberazione τ è pertanto:

$$\tau_c = 0.16 V / A^* = 2.56 \text{ [s]}$$

Come si può osservare risulta $\tau_c > \tau_{ott,1000}$ per cui sarà necessario procedere alla correzione della sala aumentando opportunamente l'assorbimento totale A^* .

c) correzione acustica della sala

Si può valutare immediatamente valore dell'assorbimento totale che sarebbe necessario per realizzare la condizione $\tau_c = \tau_{\text{ott},1000}$. In particolare utilizzando ancora la relazione di Sabine si ottiene il valore dell'assorbimento totale che dovrebbe offrire l'ambiente per avere $\tau_c = \tau_{\text{ott},1000} = 0.78$ [s].

Si ottiene immediatamente $A^* = 98$ [m²] e quindi si dovrà incrementare l'assorbimento totale dal valore di circa 30 [m²] al valore di circa 98 [m²].

Si può pensare di rivestire la parete di fondo (e con ciò riduciamo il pericolo di near-eco) ed poi, se necessario, anche parte del soffitto (sempre a partire dal fondo dell'ambiente) con pannelli di rivestimento caratterizzati da un fattore di assorbimento più elevato per la banda con $f_c = 1000$ [Hz]. Ipotizzando al primo tentativo di ricoprire con pannelli assorbenti di fibre di legno (indice 3) tutta la parete di fondo ed il 75% della parte del soffitto si ottiene:

- parete intonacata (indice 1) $a_1 = 0.04$ $S_1 = 182$ [m²]
- pavimento in marmo (indice 2) $a_2 = 0.03$ $S_2 = 120$ [m²]
- pannelli assorbenti (indice 3) $a_3 = 0.6$ $S_3 = 122$ [m²]

e quindi si ottiene un assorbimento totale A^* pari a circa 98 [m²].

Quanto illustrato può essere ripetuto per le altre bande d'ottava. Talvolta per riuscire a realizzare i tempi ottimali richiesti nelle varie bande può essere necessario ricorrere a numerosi tentativi combinando materiali diversi, alcuni ad esempio caratterizzati da un fattore di assorbimento crescente con la frequenza ed altri decrescente.

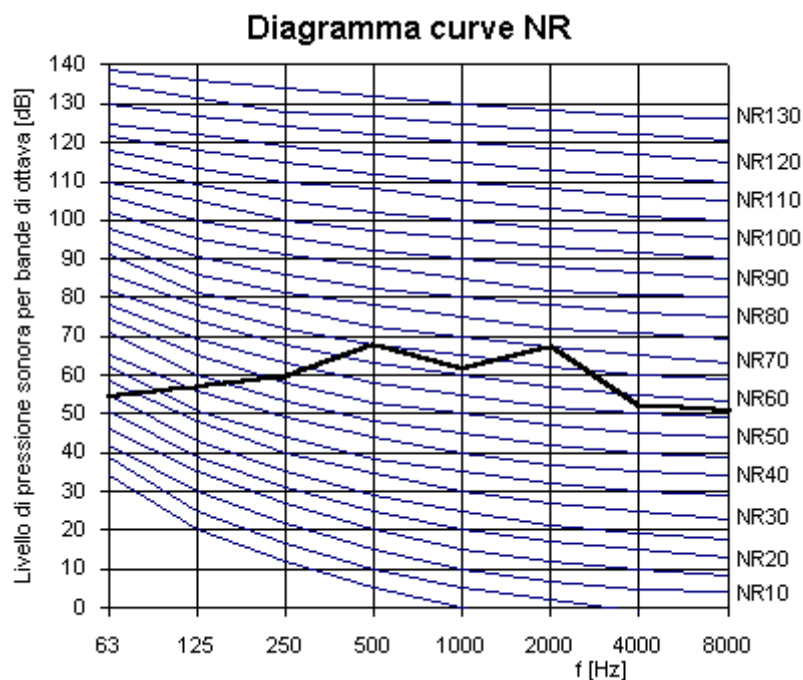
2) La sala conferenze (dimensioni [m]: 8 x 15 x 4) prima considerata ai fini di correzione acustica del tempo di riverberazione è separata da un tramezzo ($S = 8 \times 15 = 120$ [m²]) da un laboratorio di sartoria. Si dispone dello spettro del rumore misurato mediante fonometro nella sartoria. Nell'ipotesi che non esista altra via di trasmissione del suono oltre al divisorio, si desidera valutare quale sia il potere fonoisolante richiesto al tramezzo per ottenere nella sala un indice $NR = 30$.

La seguente tabella riassume i vari assorbimento A_2^* nella sala conferenze e il livello sonoro L_1 misurato nella sartoria.

	Frequenza centrale di banda Hz					
	125	250	500	1000	2000	4000
A_2^* (m ²)	36	67	90	98	92	89
L_1 (dB)	75	73	76	80	78	74

Dal grafico delle curve NR si può leggere il massimo livello L_2 ammissibile nella sala conferenze. La seguente tabella riporta i valori ottenuti.

	Frequenza centrale di banda [Hz]					
	125	250	500	1000	2000	4000
L ₂ (dB)	48	40	36	30	26	24



Il potere fonoisolante **R** richiesto al tramezzo è fornito dalla relazione:

$$R = L_1 - L_2 - 10 \text{Log} \left(\frac{S}{A_2^*} \right)$$

Risulta:

	Frequenza centrale di banda [Hz]					
	125	250	500	1000	2000	4000
L ₁ (dB)	75	73	76	80	78	74
L ₂ (dB)	48	40	36	30	26	24
L ₁ - L ₂	27	33	40	50	52	50
10 Log $\left(\frac{S}{A_2^*} \right)$	-5.2	-2.5	-1.2	-0.8	-1.1	-3.8
R (dB)	21.8	30.5	41.8	50	55	57

In riferimento alla tabella relativa al potere fonoisolante di alcuni comuni tramezzi, si può osservare come le condizioni richieste siano soddisfatte da una parete intonacata in mattoni pieni da 12 [cm].