

ISTITUTO ELETTRTECNICO NAZIONALE GALILEO FERRARIS

L'ACUSTICA NELL'EDILIZIA

ATTI DEL CONVEGNO – TORINO 5-6 Giugno 1979

A cura di R. PISANI

COLLANA DEGLI ATTI DELLA RIVISTA ITALIANA DI ACUSTICA

VOLUME III

1979



ESA-EDIZIONI SCIENTIFICHE ASSOCIATE-ROMA

POTERE FONOIOLANTE DI DIVISORI: CONSIDERAZIONI
SU 560 RISULTATI SPERIMENTALI

Raffaele PISANI

Istituto Elettrotecnico Nazionale Galileo Ferraris - Torino

PREFAZIONE

L'isolamento acustico negli edifici viene attuato in modi diversi poichè diversi sono i modi di propagazione del rumore. Si intende trattare, nella presente esposizione, l'isolamento dei divisori rispetto alla propagazione del suono per via aerea tralasciando la propagazione per via strutturale.

La tecnica di costruzione degli edifici ha subito, negli ultimi decenni, una considerevole evoluzione specialmente nel campo della prefabbricazione: ai divisori in laterizi e cemento armato si sono affiancati numerosi elementi a strutture più o meno complesse che impiegano i più svariati materiali. Esigenze di risparmio energetico, di carattere strutturale di facilità di posa, hanno imposto l'impiego, in molti casi, di pareti portanti, particolarmente curate sotto il profilo dell'isolamento termico-acustico.

Le soluzioni elaborate sono molteplici e le prestazioni, specialmente per quanto riguarda l'isolamento, si differenziano notevolmente: non di rado si riscontrano soluzioni ottime dal punto di vista termico ed insufficienti dal punto di vista acustico.

Per questo molti costruttori si preoccupano di sottoporre i loro prodotti a prove sia di isolamento termico che acustico.

Il Reparto di Acustica dell'Istituto Elettrotecnico Nazionale "G. Ferraris" sin dal 1938 certifica le prove sui prodotti inviati presso il suo laboratorio. Tra le altre vengono effettuate prove di potere fonoisolante di divisori e serramenti, misure del coefficiente di assorbimento dei materiali e prove di riduzione del livello di rumore di campestio per sottofondi e rivestimenti di pavimenti.

L'elevato numero di prove, eseguite in laboratorio tutte alle medesime condizioni, consente di ricavare, dai risultati ottenuti, utili informazioni sul comportamento di numerosi divisori che, a volte, si differenziano tra loro per piccole variazioni di composizione della struttura.

Per poter meglio estrarre, dalla massa dei dati forniti dalle numerose misure, quei parametri che possono interessare per uno specifico scopo, tutti i risultati sono stati immagazzinati nella memoria di un calcolatore.

Per ogni divisorio provato sono riportati i dati relativi alla costituzione della struttura: numero di strati, materiali, masse specifiche di ogni componente, massa frontale dell'intera struttura, ecc. e quelli acustici ricavati dalle prove eseguite: potere fonoisolante in funzione della frequenza, indice di valutazione ISO, ecc. Altri dati consentono la rapida individuazione, nell'archivio, dei certificati rilasciati sul componente preso in considerazione. La banca dei dati consente anche, mediante opportuni programmi di lettura, il confronto dei risultati dei divisori che sono accomunati da uno o più parametri. Ad esempio si possono rilevare tutte le strutture che si avvicinano, per l'isolamento, ad una curva asse-

gnata; studiare il comportamento dei divisori che hanno la stessa massa frontale, lo stesso indice di valutazione, ecc.

Nel presente lavoro si riportano i risultati di isolamento ottenuti su un certo numero di divisori, classificati secondo un determinato criterio, al fine di evidenziare le variazioni del comportamento in funzione di un particolare parametro, quale ad esempio lo spessore, il peso, il numero di strati, ecc.

1.- CLASSIFICAZIONE DEI DIVISORI

La grandissima varietà di divisori provati sia per conto della committenza esterna sia ai fini di ricerca scientifica, consente di individuare quelli studiati per impiego prevalentemente edilizio e quelli studiati per un impiego industriale (pareti di copertura per silenziamento delle macchine, schermi fonoisolanti da impiegare tra macchine ed operatori nell'ambiente di lavoro, ecc.).

I divisori ad impiego edilizio possono essere suddivisi in due grandi categorie: Divisori Monolitici e Divisori Stratificati (fig. 1).

Per divisori monolitici si intendono i divisori costituiti da un solo materiale (ad esempio getto unico di cemento) o da due materiali pienamente integrati (getto di cemento armato con argilla espansa, mattoni forati, ecc.). Per divisori stratificati, invece, si intendono quelli ottenuti affiancando a "sandwich" strutture omogenee. Avremo così divisori doppi costituiti da due pareti monolitiche con intercapedine vuota o riempita di materiali ad alto isolamento termico; divisori singoli a tre strati affiancati e pareti stratificate multiple studiate per esigenze di isolamento particolari (cabina di silenziamento delle macchine industriali, pareti o pavimentazio-

CLASSIFICAZIONE DELLE PARETI

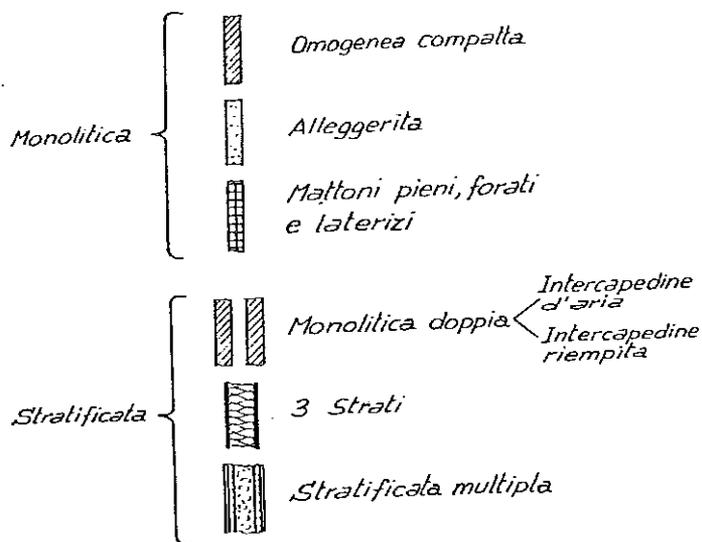


Fig. 1 - Classificazione delle pareti

ni di veicoli, ecc.). Non sono state considerate le pareti composite, quelle cioè che frontalmente si presentano con due o più strutture diverse quali ad esempio pareti con serramenti, pareti in parte opaca (in generale stratificata) ed in parte vetrata (vetri doppi, stratificati, ecc.).

La fig. 2 fornisce una idea dell'orientamento dei costruttori nella sperimentazione di nuovi prodotti. Le percentuali si riferiscono a prove su 560 divisori diversi e, come si può rilevare, la più alta percentuale di prove si riferisce alle pareti stratificate quasi tutte leggere. Una presenza abbastanza significativa è quella dei vetri: si tratta di strutture vetrate costituite da vetri singoli, stratificati e vetro-camera sempre più utilizzati nelle pareti di facciate "curtain-wall", in edifici adibiti ad uffici, laboratori, ecc.

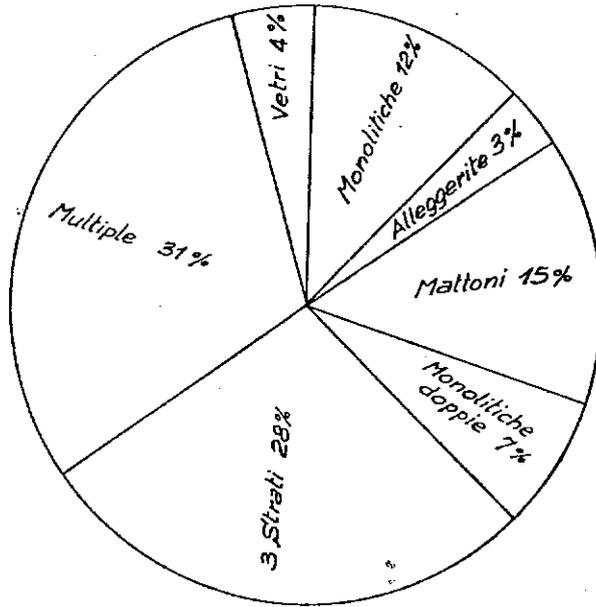


Fig. 2 - Prove sui divisori

Per quanto riguarda le prove sulle murature tradizionali, molte si riferiscono a pareti normali da 8 o da 12 cm. sulle quali verrà applicato un particolare tipo di intonaco o di rivestimento: l'oggetto delle prove è quindi il rivestimento applicato e la sua efficacia è valutata confrontando i risultati ottenuti per una parete tradizionale con quelli della stessa parete trattata con il prodotto in prova.

Altre volte i divisori in muratura riguardano le pareti di facciata, per le quali si impiegano diversi isolanti termici o particolari mattoni di per sé già isolanti.

La fantasia dei costruttori è particolarmente fertile per quanto riguarda lo studio e la realizzazione di pareti stratificate

leggere. I prodotti sono generalmente orientati in tre campi di applicazione distinti: divisori per l'edilizia, pareti di cabine per silenziamento di macchinari rumorosi, pianali e pareti per veicoli ed in particolare per convogli ferroviari.

I primi, a prevalente impiego edilizio, sono costituiti essenzialmente da lastre rigide alternate a pannelli di materiale poroso a densità più o meno elevata.

In generale la bontà di isolamento di un divisorio costituito da una struttura a sandwich dipende anche dal tipo di telαιο impiegato per sostenere i pannelli. La particolare cura nell'evitare ponti acustici tra una lastra e l'altra riduce largamente la trasmissione delle vibrazioni e quindi migliora l'isolamento. Varianti ad una struttura a tre strati sono ad esempio quelle che prevedono, su ciascun lato, l'impiego di due lastre al posto di una, oppure la diversa densità del materiale poroso, l'inserzione di due pannelli a diversa densità con setti di carta catramata, ecc.

I vantaggi, nell'impiego pratico di tali divisori, vanno ricercati nell'alto isolamento conseguibile in relazione al peso, relativamente modesto, delle strutture ed al suo ridotto ingombro. A questi si aggiungono quelli riguardanti la facilità di praticare aperture per porte, finestre, ecc., quella di chiudere aperture esistenti o di spostare il divisorio, tutti dovuti alla modularità del sistema costruttivo.

La composizione delle pareti impiegate nelle costruzioni di cabine di silenziamento ad uso industriale, invece, è diversa dalle precedenti. Le lastre rigide sono costituite da lamiera di ferro saldate a telai in profilato o scatoletto. A volte la faccia interna della lamiera viene antirombata; l'intercapedine tra le due la-

stre è riempita con lana di vetro ad alta densità; il lato della parete rivolto verso la sorgente di rumore è quasi sempre costituito da una lamiera forata o da una rete metallica che consente anche l'assorbimento del suono nell'ambiente in cui è generato.

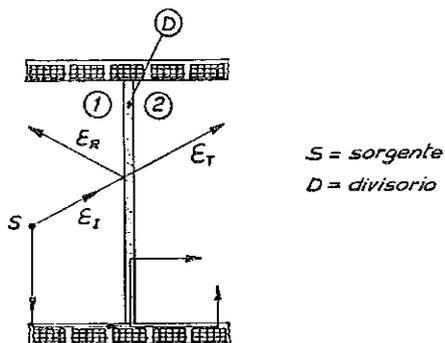
Anche in questo caso le varianti introdotte sono diverse: il materiale fonoassorbente può essere costituito da due diversi pannelli di materiale poroso separati da un setto bituminoso o da un pannello di truciolare di legno. Per le cabine che proteggono l'individuo in un ambiente rumoroso i pannelli sono a volte costituiti da fogli di truciolare o compensato alternati a pannelli di lana di vetro; il rivestimento della faccia interna, in generale fonoassorbente, è attuato impiegando particolari materiali porosi rivestiti con fogli di materiale sintetico forato. I pianali e le cabine per veicoli, infine, sono generalmente costituiti da lamiere grecate ed antirombate fissate su pannelli in truciolare o in lamiera ai quali seguono uno o più strati di materiale fonoassorbente. A seconda dell'utilizzazione, la faccia interna può essere o in lamiera cieca o in lamiera forata.

Negli ultimi anni vengono sperimentate strutture per impieghi particolari e tra queste sempre più numerosi sono i pannelli di metallo uniti tra loro mediante film plastici, sostanze bituminose, adesivi sintetici, resine eposidiche, ecc. Lo strato di legante funziona, generalmente, da elemento smorzante delle vibrazioni per effetto dell'elevato attrito interno; si ottengono così interessanti materiali stratificati che possono essere stampati e quindi impiegabili nel campo aeronautico, automobilistico, ecc.

2.- IL POTERE FONOIOLANTE DI UN DIVISORIO

I risultati presentati si riferiscono a prove in laboratorio eseguite tutte sugli stessi impianti e con lo stesso metodo di misura.

Il potere fonoisolante R di un divisorio D (fig. 3) che



$$\bar{\tau} = \frac{E_T}{E_I} \quad (\text{coefficiente di trasmissione})$$

$$0 < \bar{\tau} \leq 1$$

$$R = 10 \lg \frac{1}{\bar{\tau}} \quad (\text{dB});$$

$$R_n = L_1 - L_2 + 10 \lg \frac{S}{A} \quad (\text{dB});$$

$L_1 =$ Livello di pressione sonora nell'ambiente 1 (sorgente)

$L_2 =$ Livello di pressione sonora nell'ambiente 2

$S =$ Superficie divisorio

$A =$ Unità assorbenti nell'ambiente 2

$R_n =$ Potere fonoisolante

Fig. 3 - Potere fonoisolante di un divisorio

separa i due ambienti (1) disturbante e (2) disturbato è, per definizione, proporzionale al logaritmo del reciproco del coefficiente di trasmissione. Nei casi pratici, quando cioè il divisorio è messo in opera, può succedere che una aliquota dell'energia sonora prodotta dalla sorgente di rumore S raggiunga lo ambiente (2) attraverso le pareti laterali, il pavimento e il soffitto (trasmissione laterale) oppure

mediante le canalizzazioni per gli impianti o attraverso le controsoffittature. In questo caso all'energia propria trasmessa dal divisorio, \mathcal{E}_T , si aggiunge l'energia trasmessa lateralmente, o mediante particolari vie, provocando una perdita apparente dell'isolamento del divisorio.

Gli impianti di laboratorio dell'Istituto Elettrotecnico Nazionale Galileo Ferraris, costituiti da due camere riverberanti affacciate e comunicanti attraverso un'apertura di circa 4 m^2 , sono stati particolarmente studiati per evitare la trasmissione laterale del suono così che l'energia sonora rilevata nell'ambiente disturbato proviene unicamente dal divisorio. I nuovi impianti per le misure del potere fonoisolante, secondo le più recenti disposizioni ISO, sono stati già realizzati presso la nuova sede dell'Istituto. L'apertura tra le due camere riverberanti è di 10 m^2 ; particolari accorgimenti per la messa in opera dei divisori consentiranno le prove su pareti molto pesanti e prefabbricate.

Il potere fonoisolante, in laboratorio, è rilevato mediante la relazione di fig. 3 nella quale compare il termine di correzione dovuto all'assorbimento dell'ambiente di ricezione e alla superficie del divisorio. Ovviamente la relazione è valida in assenza di trasmissione laterale.

Il potere fonoisolante, per le applicazioni pratiche, deve essere visto in funzione della frequenza: esso in generale aumenta all'aumentare della frequenza (fig. 4) e può presentare marcate deviazioni dalla retta che rappresenta l'isolamento teorico del divisorio per l'effetto della sua massa. L'isolamento teorico di un divisorio omogeneo, per un suono ad incidenza normale, è riportato in fig. 5; per un suono ad incidenza diffusa è riportato in

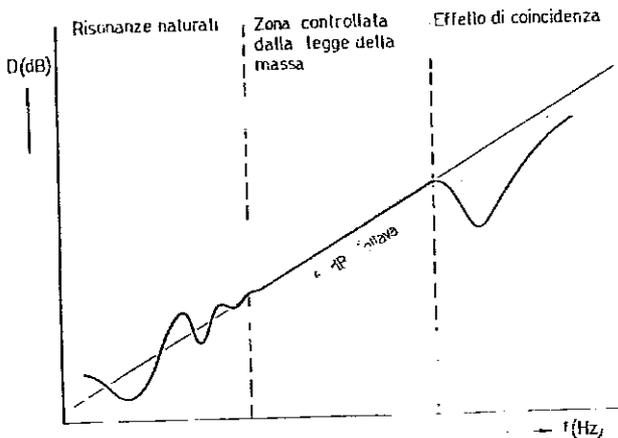
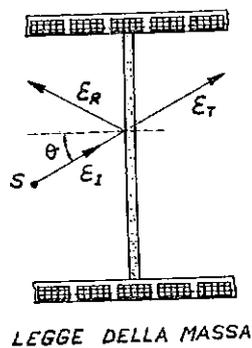


Fig. 4 - Isolam. acustico in funz. della frequenza



Incidenza normale ($\theta = 0$) ed $f < f_c$

$$R_0 = 10 \lg \left[1 + \left(\frac{\pi W_p f}{m_v c} \right)^2 \right] \quad (\text{dB})$$

R_0 = Potere fonoisolante per incidenza normale

W_p = Massa/unità di superficie (kg/m^2)

m_v = Massa volumica dell'aria (kg/m^3)

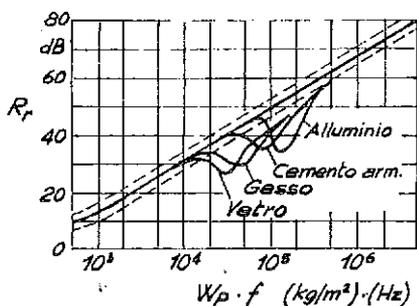
c = Velocità del suono nell'aria (m/s)

f = Frequenza (Hz)

f_c = Frequenza critica (Hz)

Fig. 5 - Legge della massa

fig. 6. Si ha l'incidenza normale quando il fronte d'onda al quale è associata l'energia \mathcal{E}_I incide perpendicolarmente sulla parete. Si ha l'incidenza diffusa quando sulla parete incidono fronti d'onda provenienti da diverse direzioni, tutte ugualmente probabili. Tale caso è quello che maggiormente si verifica in pratica poichè i fronti d'onda sonora che investono il divisorio sono quelli riflessi dalle pareti laterali, il soffitto ed il pavimento. Considerando ancora l'andamento del potere fonoisolante in funzione della frequenza (fig. 4), si



POTERE FONISOLOANTE PER INCIDENZA DIFFUSA

incidenza diffusa $0 < \theta < 80^\circ$

$$R_r = R_0 - 10 \lg(0.23 R_0) \quad \text{per } f < f_c$$

$$R_r \approx -47.2 + 20 \lg W_p f \quad (\text{dB}) \quad f < f_c$$

$$R_r = R_0 + 10 \lg \frac{2\eta}{\pi} \frac{f}{f_c} \quad (\text{dB}) \quad f > f_c$$

W_p = massa/unità di superficie (kg/m^2)

f_c = frequenza critica (Hz)

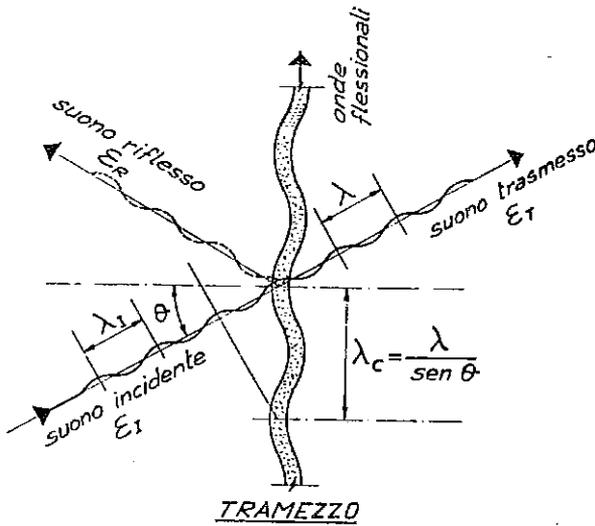
η = fattore di perdita (0.005 ÷ 0.03)

Fig. 6 - Potere fonisol. per incid. diffusa

l'isolamento nella banda centrale di frequenze è controllato dalla legge della massa ed il potere fonisolante per incidenza diffusa R_r è fornito dalla prima delle due relazioni di fig. 6. Nella terza banda, quella delle frequenze più alte, la perdita di isolamento è dovuta all'effetto di coincidenza illustrato in fig. 7. La coincidenza tra la proiezione geometrica sul tramezzo della lunghezza d'onda

del suono incidente λ_I e la lunghezza d'onda λ_c dell'onda flessionale del tramezzo provoca una "fuga di suono", nell'ambiente disturbato, maggiore di quella prevista dalla legge di massa.

distinguono tre bande di frequenza nelle quali il comportamento acustico si scosta dalla retta teorica a pendenza di 6 dB per ottava. Nella banda di frequenze più basse lo scostamento dalla retta è dovuto alle risonanze proprie del divisore di oscillazioni naturali. L'iso-



$$f_c = \frac{0,551}{h} \cdot \frac{c^2}{c_l \sin^2 \theta} \quad f_c = \text{frequenza critica per } \theta = 90^\circ$$

$$c_l = \sqrt{\frac{E}{m_v(1-\nu^2)}}$$

c_l = Velocità di propagazione dell'onda longitudinale

E = Modulo di elasticità

ν = Rapporto di Poisson

m_v = Massa volumica del tramezzo

Fig. 7 - Fenomeno di coincidenza

di frequenze interessate è vasta ed è centrata nel campo delle frequenze per le quali in pratica si riscontra la massima concentrazione dell'energia sonora.

Se la trattazione teorica dell'isolamento di un divisorio omogeneo può ritenersi abbastanza semplice, quella di un divisorio stratificato, invece, è molto più complessa coinvolgendo, tra l'al-

La frequenza f_c più bassa alla quale si verifica la perdita per coincidenza, è detta frequenza critica.

Il fenomeno di coincidenza provoca una variazione del potere fonoisolante secondo la terza relazione riportata nella fig. 6. Il grafico di fig. 8 consente di valutare la frequenza critica, per i materiali elencati, in funzione dello spessore del divisorio. Come si può rilevare la banda

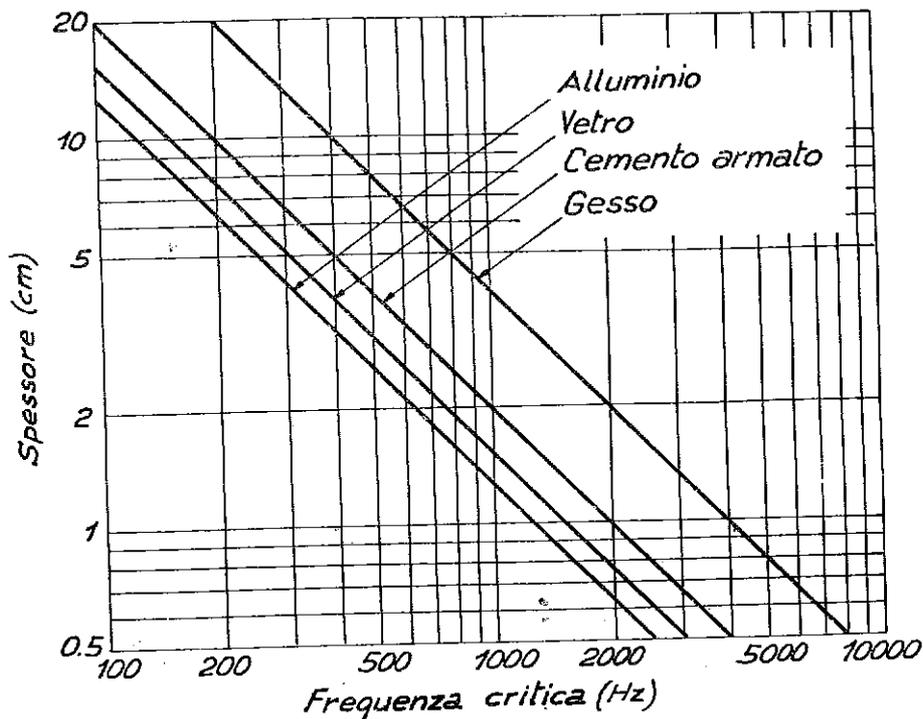
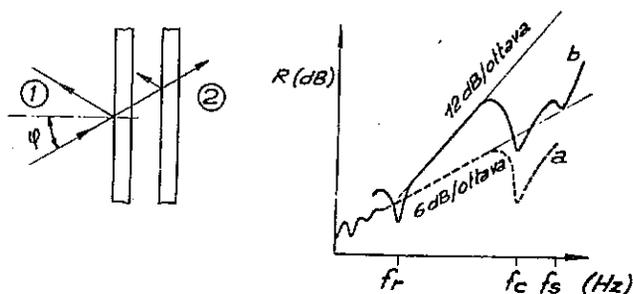


Fig. 8 - Frequenze critiche dei pannelli più comuni

tro, la rigidità, la cedevolezza e lo smorzamento dei singoli componenti presi sia individualmente che accoppiati. Un caso relativamente semplice è quello dei divisori doppi, costituiti da due pareti monolitiche separate da una intercapedine d'aria (fig. 9).

Il suono dell'ambiente (1) che incide sul primo pannello viene trasmesso, attenuato, nell'intercapedine d'aria e quindi, previa eccitazione del secondo pannello, perviene nell'ambiente (2) ulteriormente attenuato. Se i due pannelli sono completamente disaccoppiati e liberi di oscillare indipendentemente l'uno dall'altro, l'isolamento teorico dovrebbe essere quello della curva b del grafi



Risonanza massa-aria-massa e di cavit 

$$\textcircled{1} \quad f_r = \frac{c}{2\pi \cos \varphi} \cdot \sqrt{\frac{m_v}{d} \left(\frac{1}{W_{p1}} + \frac{1}{W_{p2}} \right)} \quad (\text{Hz})$$

$$\textcircled{2} \quad f_s = n \cdot \frac{c}{2d \cos \varphi} \quad (\text{Hz})$$

f_r = frequenza di risonanza massa-aria-massa

f_s = frequenza di risonanza di cavit 

f_c = frequenza critica

W_{p1}, W_{p2} = massa per unit  di superficie dei singoli pannelli (kg/m^2)

d = profondit  dell'intercapedine (m)

φ = angolo di incidenza dell'onda sonora (rad)

c = velocit  di propagazione del suono nell'aria (m/s)

m_v = massa volumica dell'aria (kg/m^3)

n = numero intero

Fig. 9 - Risonanza massa-aria-massa e di cavit 

alle frequenze critiche di ciascun pannello, ed a quelle frequenze per le quali insorgono onde stazionarie nell'intercapedine (risonanze di cavit ).

La relazione 1 della fig. 9 fornisce il valore della frequenza di risonanza f_r dovuta all'accoppiamento delle due lastre per effetto del cuscino d'aria tra esse interposto: risonanza mas-

co di fig. 9. La curva a, invece, si riferisce al potere fonoisolante di uno dei due pannelli supposti identici.

Nel caso ideale di una parete doppia con i pannelli disaccoppiati, il potere fonoisolante dipende dalle masse W_{p1} e W_{p2} dei singoli pannelli, dalla dimensione dell'intercapedine e dall'angolo di incidenza dell'onda sonora. Le pi  importanti perdite si verificano alle frequenze di risonanza massa-aria-massa,

sa-aria-massa. I valori della frequenza critica f_c sono forniti dalla relazione di fig. 7, mentre i valori delle frequenze per le quali risuona la cavità sono dati dalla relazione 2 di fig. 9.

Per quanto riguarda i valori del potere fonoisolante per le frequenze comprese tra i valori di f_r , f_c ed f_s questi sono forniti da espressioni più o meno complicate reperibili nella letteratura.

Un caso di interesse pratico è quello dell'effetto del materiale fonoassorbente disposto nell'intercapedine. La sua azione sui valori del potere fonoisolante è maggiormente rilevabile alle frequenze per le quali le lunghezze d'onda sono piccole rispetto alla dimensione dell'intercapedine ed è praticamente irrilevante se le pareti hanno una massa elevata.

L'esecuzione pratica di una parete doppia comporta l'adozione di particolari provvedimenti per evitare la presenza di ponti acustici tra i due pannelli e la conseguente riduzione dell'isolamento. In particolare le zanchette di ancoraggio tra i due pannelli, il telaio di tenuta delle due lastre, ecc., consentono la trasmissione delle vibrazioni da un pannello all'altro e sono, per questo, i punti più delicati nel progetto della struttura fonoisolante.

I risultati delle misure di laboratorio si riferiscono ad una particolare condizione di "lavoro" del divisorio.

Nei casi pratici il progettista, partendo dai risultati di laboratorio, deve prendere numerosi accorgimenti nella elaborazione dell'esecutivo per conservare i valori di isolamento propri del divisorio. Molte volte si riscontrano perdite di isolamento per effetto di canalizzazioni che servono più ambienti, per effetto dei ponti acustici, dello scarso isolamento dei serramenti, ecc.

L'effetto della trasmissione laterale del suono comunque è sempre presente e in pratica si riscontra tra le prove in laboratorio e quelle in opera una differenza del potere fonoisolante di circa 5 dB.

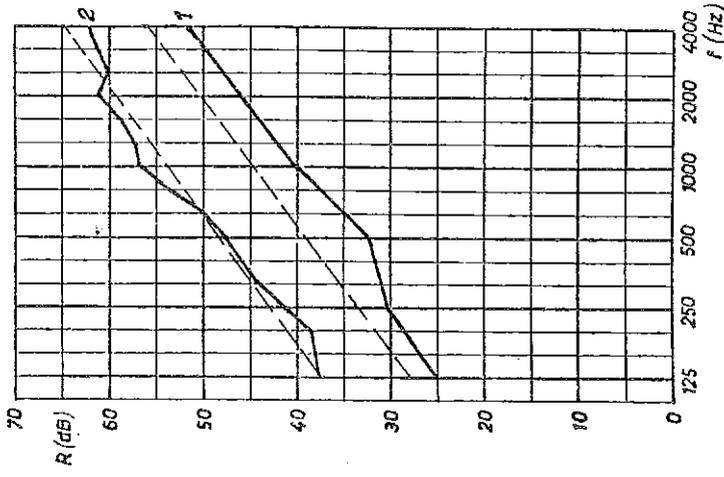
3.- I RISULTATI DI LABORATORIO

Si riportano, di seguito, i risultati più interessanti delle prove eseguite su alcuni divisori raggruppati secondo criteri che risulteranno evidenti per ogni figura. Le prove sono state eseguite seguendo le prescrizioni della norma ISO 140.

3.1.- Pareti monolitiche

In fig. 10 si riportano per un confronto diretto con la legge della massa (retta tratteggiata) le curve del potere fonoisolante di due divisori omogenei, uno costituito da blocchi di gesso, l'altro da conglomerato cementizio. La curva relativa al divisorio in conglomerato si sovrappone con buona precisione alla retta teorica, quella del divisorio in blocchi di gesso si scosta alquanto dalla retta calcolata in base alla legge della massa. Tale anomalia potrebbe attribuirsi a difetti di sigillatura tra i vari blocchi. Per ogni divisorio, oltre alla massa portante, si riporta l'indice di valutazione I calcolato secondo la raccomandazione ISO R 717.

In fig. 11 sono riportati i valori di isolamento in funzione della frequenza, di due divisori omogenei di conglomerato con spessori diversi. E' anche riportata, per un confronto, la curva relativa alla parete costituita dai blocchi di gesso. Il potere fonoisolante dei divisori in conglomerato cementizio è legato molto alla composizione dell'impasto e alla granulometria dei componenti.



① Blocchi di gesso 87 kg/m^2 , $I = 38 \text{ dB}$

② Conglomerato 250 kg/m^2 , $I = 53 \text{ dB}$

--- Legge della massa

— Misura in campo diffuso

Retta teorica e valori sperimentali

Fig. 10 - Potere fonoisolante di pareti monolitiche

① *Conglomerato* spess. 160 mm, 250 kg/m²
 $I = 53 \text{ dB}$

② *Calcestruzzo* spess. 60 mm, 150 kg/m²
 $I = 42 \text{ dB}$

③ *Gesso* spess. 80 mm, 87 kg/m²
 $I = 38 \text{ dB}$

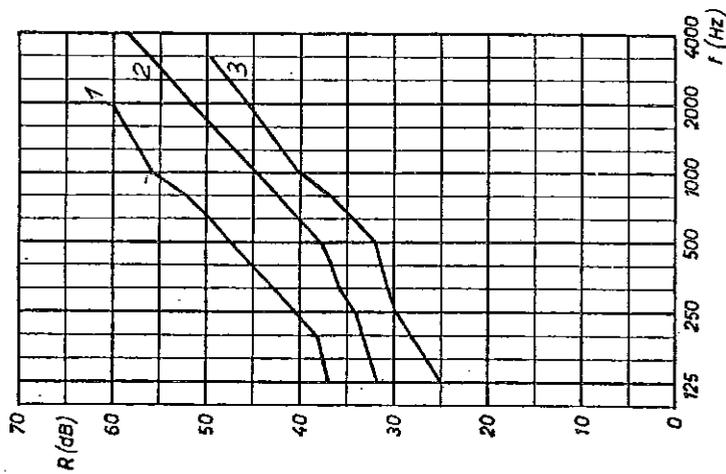


Fig. 11 - Potere fonoisolante di pareti monolitiche

3.2.- Divisori in laterizi

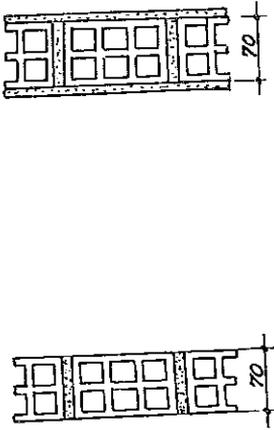
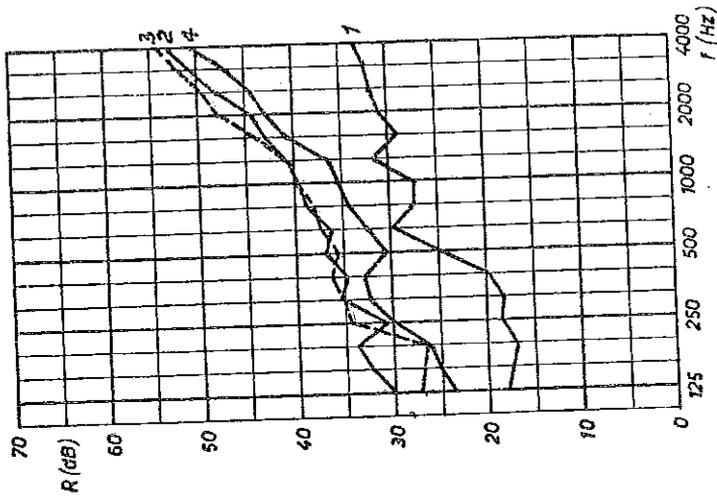
Si confrontano i risultati del potere fonoisolante di alcuni divisori in mattoni forati di impiego più comune nella edilizia tradizionale.

In fig. 12 si riportano, per un confronto diretto, i valori del potere fonoisolante di una parete finita con tre intonaci diversi. Il potere fonoisolante del muro con l'intonaco in sola scagliola, è minore di quello finito con intonaco in malta di calce e cemento.

Un comportamento anomalo è quello di una parete in mattoni forati non intonacata. In questo caso è determinante, ai fini dell'isolamento, la qualità di esecuzione del muro e la quantità di malta che viene depositata su un lato e sulla testa del mattone durante la posa. Pochi fori prodotti per mancanza di legante provocano una brusca caduta dell'isolamento del divisorio.

Nella fig. 13 si confrontano i valori del potere fonoisolante di un muro in mattoni forati da 12 cm e di uno doppio costituito da mattoni da 6 cm con intercapedine vuota. E' importante notare che un lato interno della parete è stato rinzaffato: questo accorgimento migliora l'isolamento poichè riduce l'inconveniente dei fori tra i mattoni dovuti alla mancanza di malta.

Nella fig. 14, invece, vengono confrontati i valori ottenuti per una parete doppia con quelli ottenuti per una parete in mattoni pieni da 25 cm. La parete (2) è costituita da una fila di mattoni pieni da 12 cm ed una di mattoni forati da 8 cm; quella (3) è costituita da due file di mattoni forati da 6 cm.



- ① Parete in mattoni forati 70 kg/m², I = 28 dB
- ② Parete in mattoni forati con intonaco in malta di calce e cemento 110 kg/m², I = 41 dB
- ③ Parete in mattoni forati con intonaco in malta di calce e cemento rasatura in scagliola 112 kg/m², I = 41 dB
- ④ Parete in mattoni forati con intonaco in scagliola 95 kg/m², I = 37 dB

Fig. 12 - Potere fonoisolante di pareti in laterizio. Effetto dell'intonaco

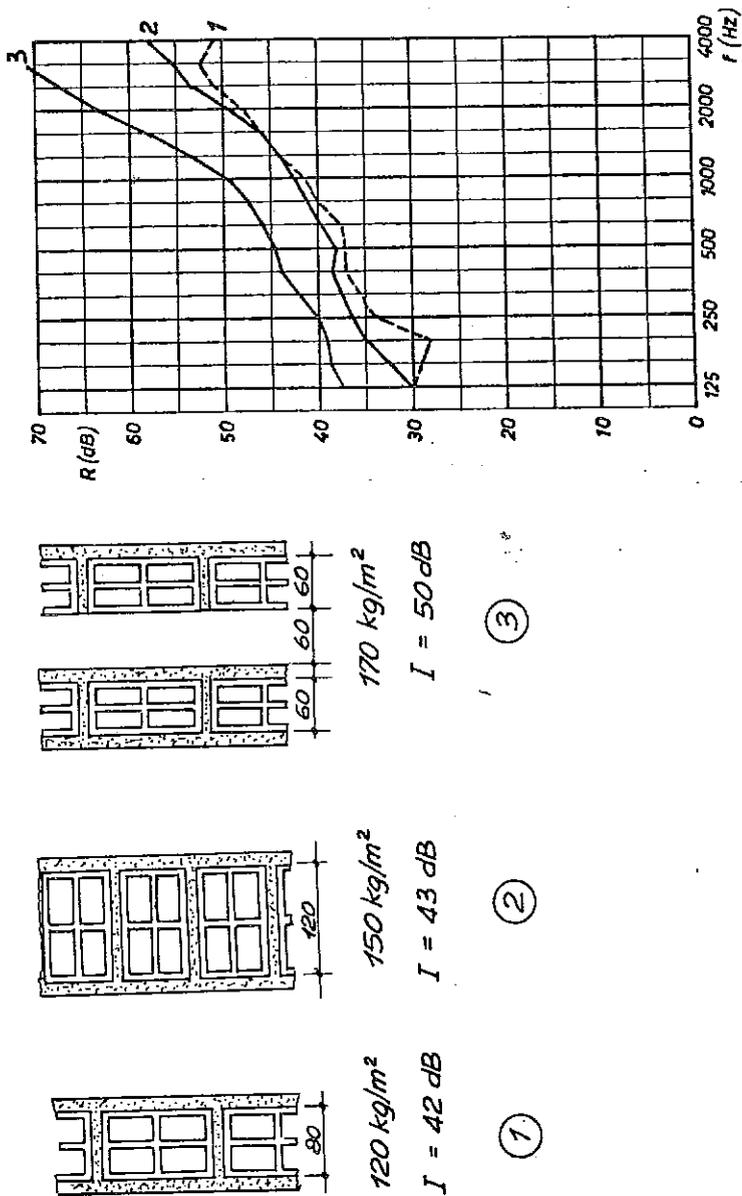
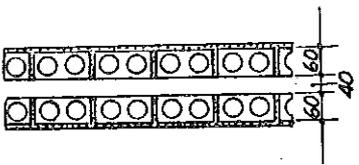
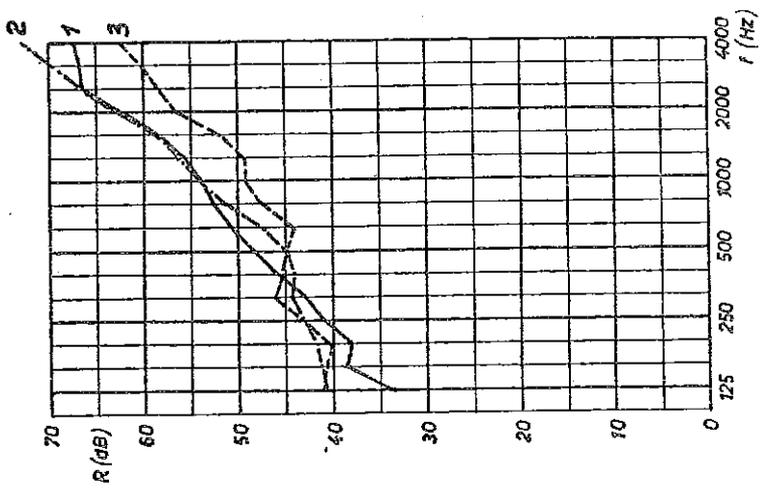


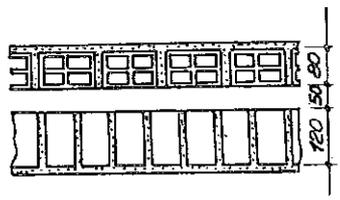
Fig. 13 - Potere fonoisolante dei muri più comuni in laterizio



145 kg/m²

I = 51 dB

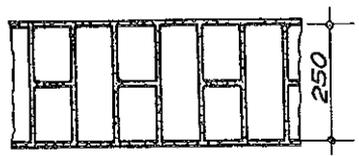
③



300 kg/m²

I = 52 dB

②



400 kg/m²

I = 52 dB

①

Fig. 14 - Potere fonoisolante di pareti pesanti

3.3.- Pareti monolitiche alleggerite

Esigenze di peso o, molte volte, esigenze di isolamento termico consigliano alcuni costruttori ad inglobare nell'impasto di cemento grani di argilla espansa, di polistirolo, ecc.

Nella fig. 15 si confrontano tre diverse pareti con impasto di sabbia-cemento ed argilla espansa a diverse proporzioni e granulometria. La parete (1) presenta un bassissimo potere fonoisolante per la elevata percentuale di argilla espansa: il cemento agisce solo da legante tra uno sferoide e l'altro. I diversi sferoidi sono quasi tutti a contatto creando in tal modo numerose vie di maggior propagazione del suono per effetto sia dei bassi valori della massa dell'argilla sia per i probabili passaggi liberi negli interspazi tra gli sferoidi.

Un altro modo molto comune di alleggerire le pareti è quello di inglobare, nella massa cementizia, cascami di recupero di diverse lavorazioni quali ad esempio trucioli di legno, lolla di riso, cannuce vegetali, ecc. Alcuni costruttori impiegano, per la costruzione del divisorio, particolari blocchi di cemento, o gesso, le cui cavità interne sono riempite con materiale poroso.

In fig. 16 si riportano i valori del potere fonoisolante di tre pareti di pari spessore costruite con blocchi alleggeriti con materiali diversi. Nella parete di tipo (1) è esaltato il fenomeno della coincidenza che si verifica a 1600 Hz in accordo con il grafico di fig. 8.

3.4.- Pareti stratificate

Le pareti stratificate, specie quelle leggere, costituiscono un capitolo a parte nell'isolamento dei divisori. Questo perchè

Pareti monolitiche alleggerite in argilla espansa a diversa granulometria.

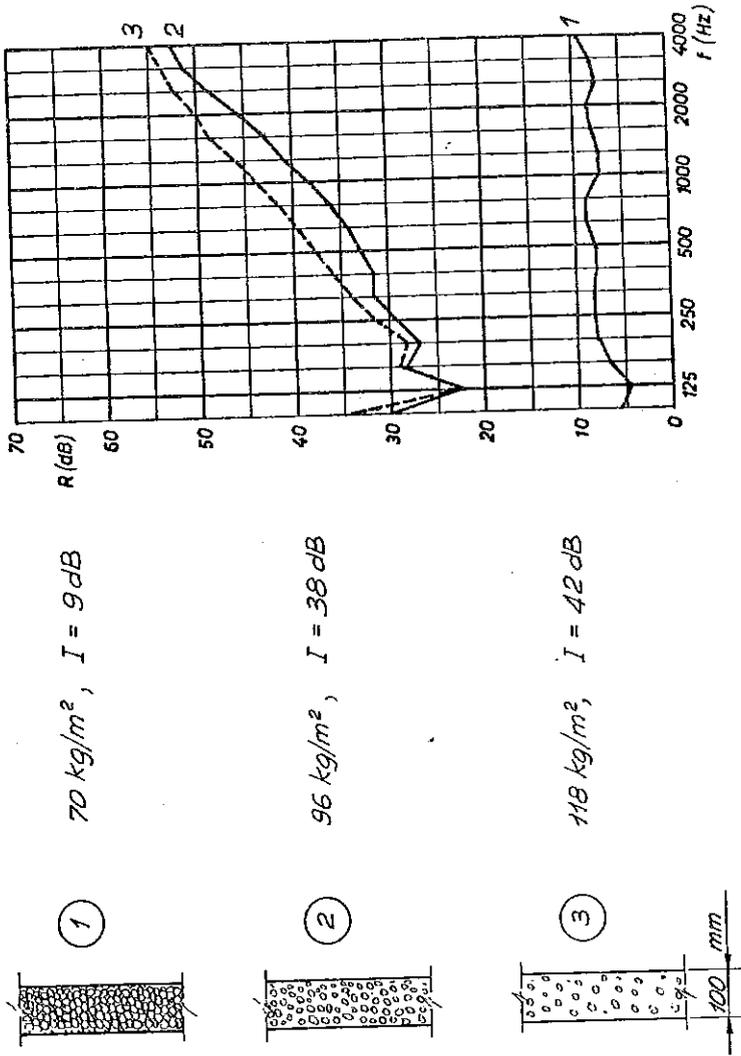


Fig. 15 - Potere fonoisolante di pareti alleggerite con argilla espansa

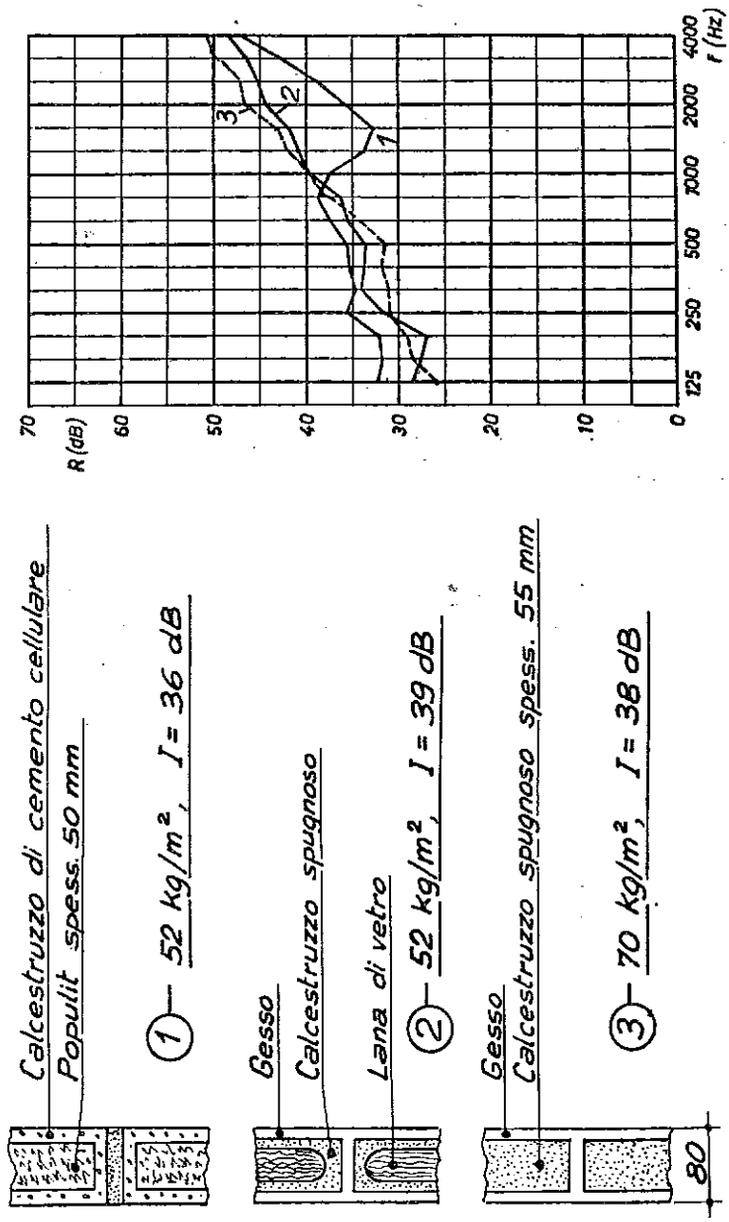


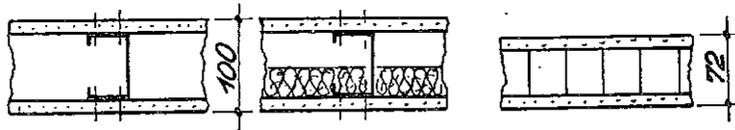
Fig. 16 - Potere fonoisolante di pareti in blocchi alleggeriti

la struttura propria del divisorio, riunendo materiali diversi assemblati a sandwich, poco si presta ad una trattazione teorica nella quale le assunzioni di casi ideali vengono ridotte al minimo.

Per poter fornire una idea del comportamento acustico di alcuni divisori utilizzati in pratica, si considerano tre tipiche strutture: i divisori doppi, i divisori stratificati a tre componenti ed i divisori stratificati multipli.

I divisori doppi, costituiti da due pannelli rigidi separati tra loro con un telaio o con zanchette in legno o lamiera, si diversificano per i materiali impiegati e per le soluzioni tecniche adottate per i giunti e per i telai. Nella fig. 17 si confrontano i risultati ottenuti su tre divisori che impiegano lastre rigide di cartongesso. La parete (1) è costituita da due lastre unite mediante zanchette metalliche. La parete (2) è simile alla (1) ma con l'intercapedine riempita parzialmente con un materassino di lana di vetro per aumentare l'assorbimento nella cavità. La parete (3) adotta la soluzione dell'alveolare in cartone per tenere i due pannelli rigidi. La bassa densità del materiale fonoassorbente nella intercapedine influisce poco sul risultato ottenuto per la parete (1). La struttura (3), che impiega l'alveolare di cartone, ha un potere fonoisolante più basso della (1) soprattutto perchè le due lastre sono rigidamente collegate attraverso l'alveolare che funziona da ottimo ponte acustico mentre si ritiene sia poco influente la minore distanza tra le due lastre.

Buoni risultati si ottengono legando tra loro i due pannelli rigidi mediante un materiale poroso ad alta densità: comunemente lana di vetro o di roccia, poliuretano espanso elastico, ecc. In questi casi i ponti acustici vengono ridotti al minimo ottenendo



Gesso cartonato, spess. 13 mm
 Intercapedine d'aria, spess. 75 mm

① 23 kg/m² I = 38,5 dB

Gesso cartonato, spess. 13 mm
 Lana di vetro, spess. 30 mm
 Intercapedine d'aria, spess. 45 mm

② 23,7 kg/m² I = 42,5 dB

Gesso cartonato, spess. 13 mm
 Alveolare di cartone

③ 23 kg/m² I = 31 dB

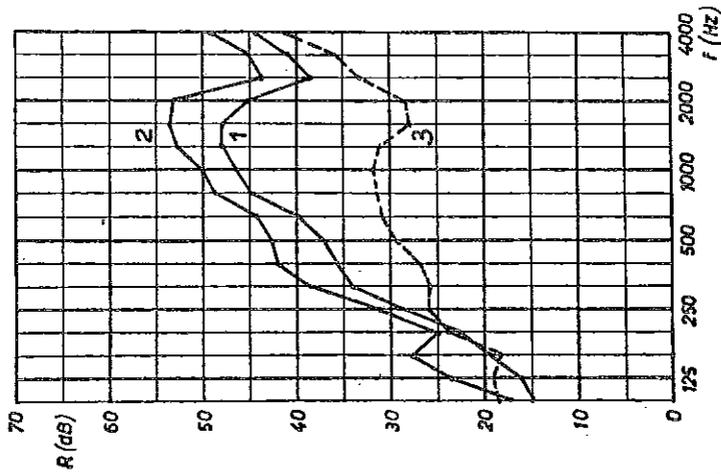


Fig. 17 - Potere fonoisolante di divisori doppi

dei sensibili miglioramenti.

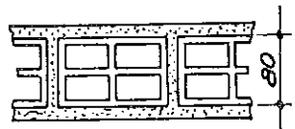
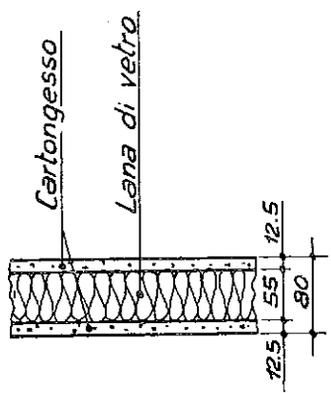
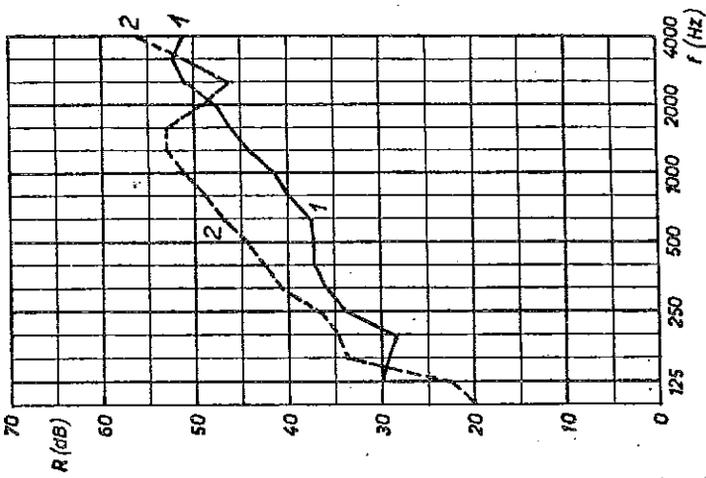
Nella fig. 18 si confrontano i valori del potere fonoisolante di una struttura costituita da due lastre di cartongesso tenute da un pannello interno di lana di vetro con quelli di un muro in mattoni forati ed intonacati. E' evidente il maggiore isolamento del divisorio più leggero su quasi tutta la gamma di frequenze considerata: si osservano perdite provocate dal fenomeno di coincidenza nella banda di 2500 Hz e perdite per effetto della risonanza massa-poroso-massa intorno a 100 Hz.

Per meglio evidenziare il ruolo del materiale poroso che lega i due pannelli rigidi, nella fig. 19 si confrontano i risultati ottenuti su un pannello costituito da due lastre di alluminio unite da un pannello di polistirolo e da uno di lana di roccia. E' evidente la scarsa azione del polistirolo: la sua leggerezza e rigidità consentono un buon accoppiamento meccanico delle lastre e quindi una perdita di isolamento.

Per quanto riguarda le pareti stratificate multiple, c'è da rilevare che alla complessità della loro composizione non corrisponde, il più delle volte, un risultato adeguato. A titolo indicativo si riportano in fig. 20 i risultati di due strutture multiple impiegate come divisori e come pianali di carrozze ferroviarie.

3.5. - Strutture vetrate

Il vetro oggi è largamente utilizzato nell'edilizia sia per la costruzione dei serramenti sia per le facciate di edifici o per le pareti in "vetrocemento" utilizzate per lo più nei capannoni industriali. In questa sede si considerano solo le lastre vetrate a prescindere cioè dal serramento che le sosterrà in pratica. Le lastre possono essere riunite in tre gruppi distinti: le lastre sempli-



120 kg/m^2 $I = 42 \text{ dB}$ ①
 50 kg/m^2 $I = 46 \text{ dB}$ ②

Fig. 18 - Potere fonoisolante di un tramezzo leggero confrontato con quello di un muro tradizionale

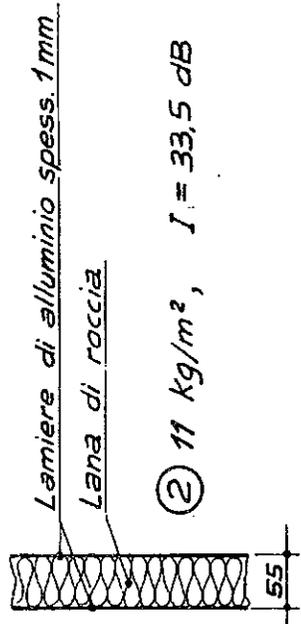
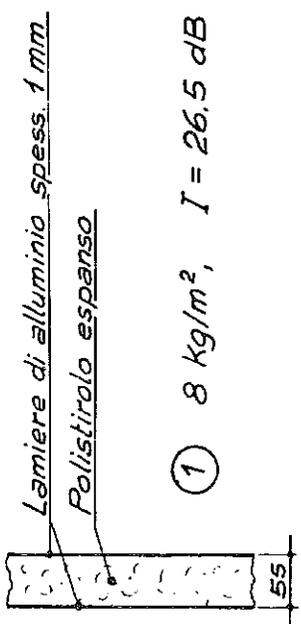
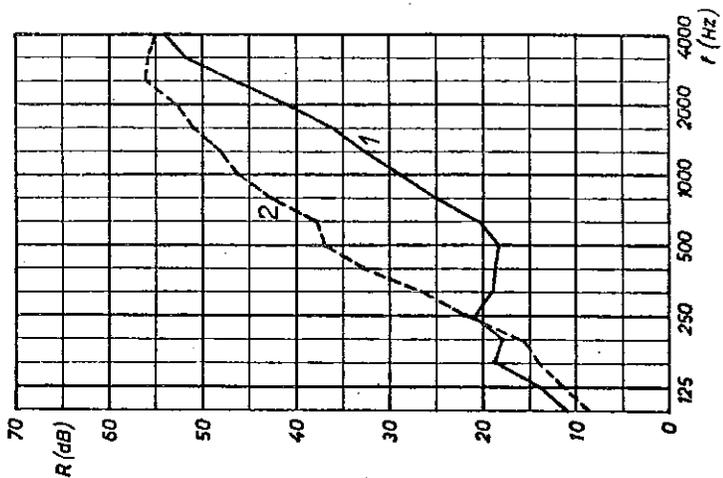


Fig. 19 - Parete stratificata: effetto del materiale impiegato

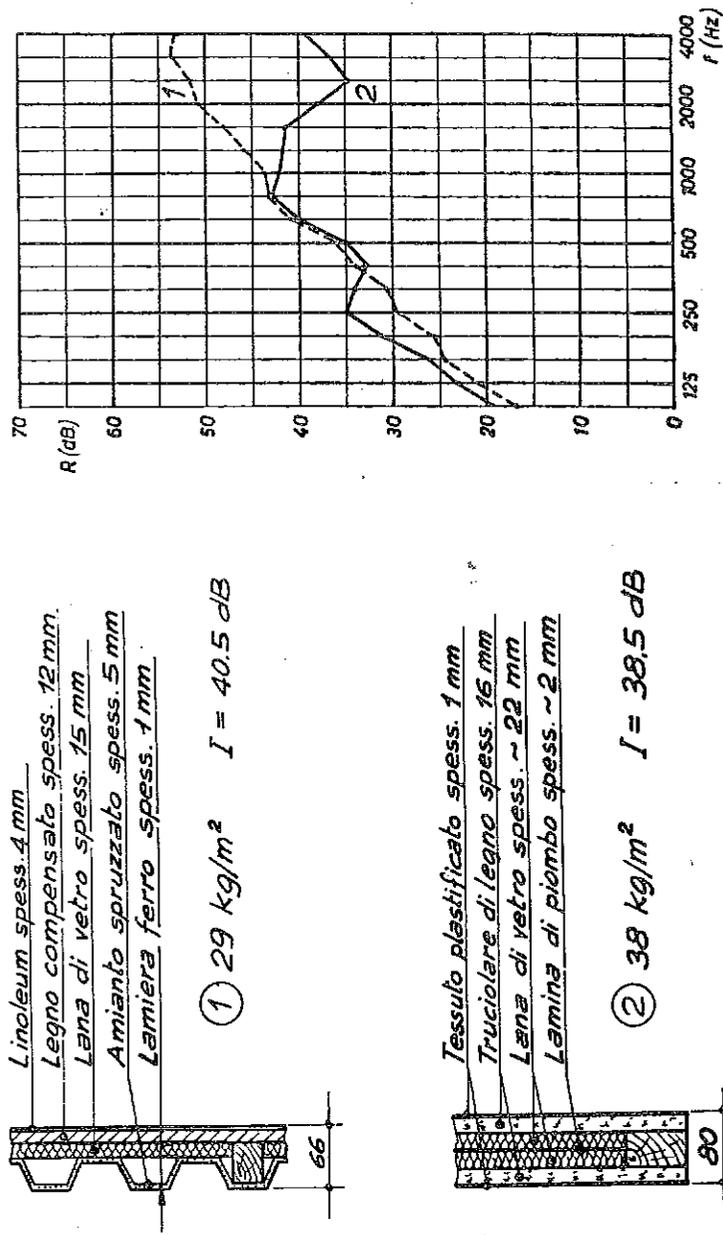


Fig. 20 - Potere fonoisolante di strutture stratificate multiple

ci, le lastre stratificate ed i vetro-camera. Per quanto riguarda l'isolamento termico la qualità del vetro-camera è superiore a quella dei vetri semplici e stratificati. Per l'isolamento acustico, invece, si rileva la qualità superiore del vetro stratificato.

Nella fig. 21 si confronta il potere fonoisolante di tre lastre piane di spessore 4, 8 e 10 mm. In tutti e tre i casi si osserva la perdita di isolamento dovuto al fenomeno di coincidenza alle frequenze previste dalla teoria. Nella lastra da 4 mm il fenomeno è più evidente, presumibilmente per il minor fattore di perdita delle lastre sottili.

Buoni risultati sono ottenuti con i vetri stratificati a 2 o più lastre incollate tra loro mediante film plastici trasparenti. In fig. 22 si confrontano tre vetri stratificati ottenuti incollando due lastre con un film plastico di 2 mm di spessore. È preferibile in pratica incollare tra loro lastre di spessore diverso per ridurre la perdita di isolamento dovuta al fenomeno di coincidenza: si ottiene, in sostanza, una compensazione tra le perdite delle lastre singole che si verificano a frequenze diverse. Di per sé l'attrito interno del film plastico smorza le oscillazioni dell'onda flessionale indotta nella lastra dal suono incidente.

I vetro-camera sono costituiti da due lastre separate tra loro ed unite ai bordi mediante un telaio metallico o di materiale sintetico. L'intercapedine è stagna e l'aria è disidratata per evitare fenomeni di condensa. Risulta importante, ai fini dell'isolamento, la qualità del giunto perimetrale che tiene unite le due lastre. Per le dimensioni, che in pratica possono essere date ai componenti ed all'intercapedine, la frequenza di risonanza massa-aria-massa cade sulla banda più bassa della gamma considerata. Tali bande

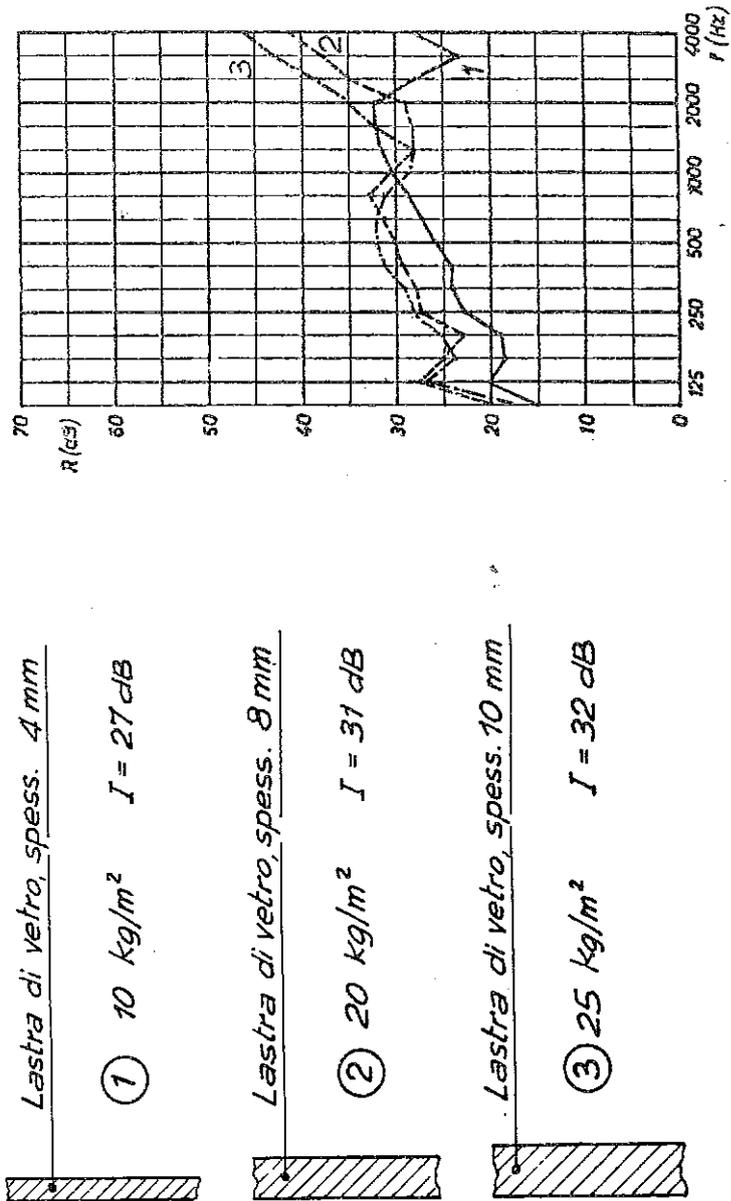


Fig. 21 - Potere fonoisolante di vetri piani

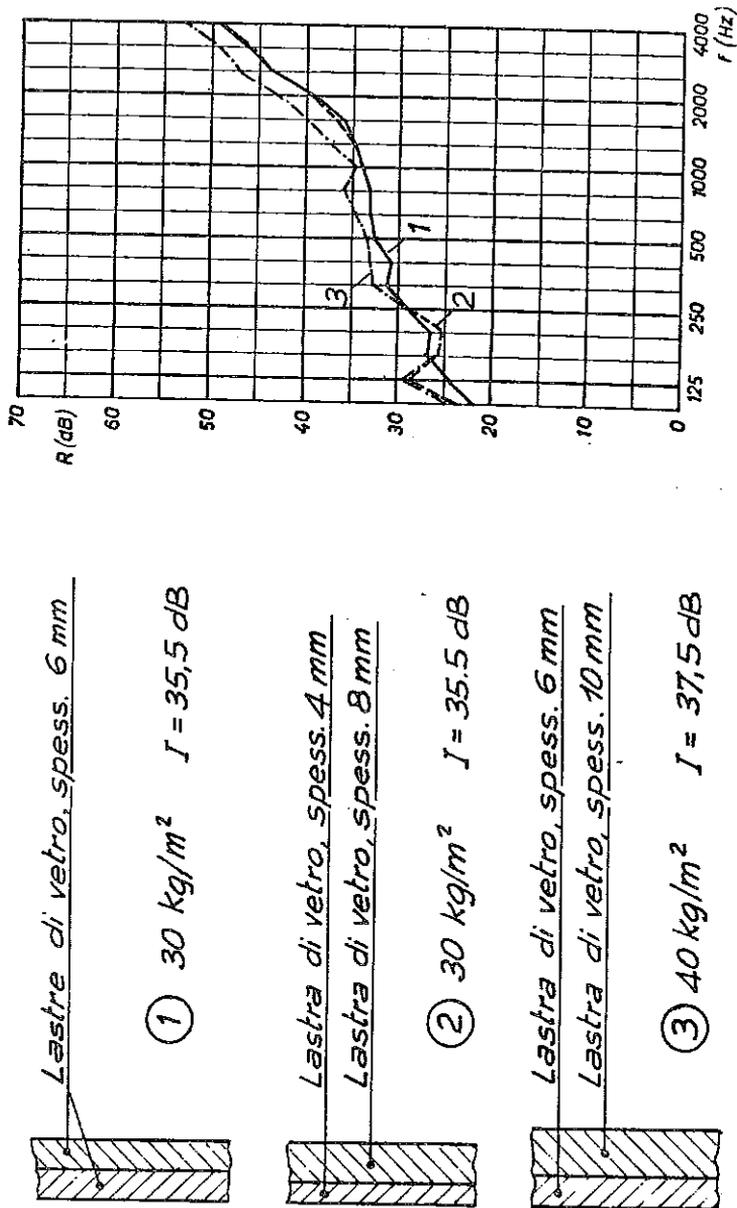


Fig. 22 - Potere fonoisolante di vetri stratificati

in pratica sono quelle per le quali sussiste la maggior concentrazione dell'energia sonora del rumore ambiente quale ad esempio quello del traffico stradale, ecc. E' quindi importante valutare l'isolamento dei vetro-camera in funzione delle applicazioni pratiche.

Nella fig. 23 si confrontano i risultati di due strutture vetro-camera rispettivamente di 6-12-6 mm e 4-12-8 mm. Dai grafici si rileva una maggior regolarità dell'andamento del potere fonoisolante della struttura che utilizza lastre di spessore diverso. In entrambe le curve è comunque evidente la perdita di isolamento dovuta alla risonanza massa-aria-massa.

4.- CONCLUSIONI

E' impossibile sintetizzare in un unico quadro il potere fonoisolante dei diversi divisori utilizzati in pratica. Il calcolo ci può aiutare per previsioni di massima nel caso di pareti omogenee o per strutture semplici; in genere è consigliabile riferirsi ai dati rilevati in laboratorio con procedimenti normalizzati. Ulteriori verifiche possono essere effettuate in opera sempre con procedimenti normalizzati.

A titolo riassuntivo si riportano in fig. 24 i valori dell'indice di valutazione ISO in funzione della massa frontale dei più significativi divisori considerati. Si può osservare che i punti relativi alle pareti stratificate sono più dispersi rispetto ai valori delle pareti monolitiche confermando che, per le prime, la legge di previsione basata sulla massa non è utilizzabile. Nella stessa figura è riportata la retta relativa al potere fonoisolante a 1000 Hz di un divisorio monolitico calcolato con la legge della massa. Può essere ammesso assimilare questo valore all'indice di valutazione ISO

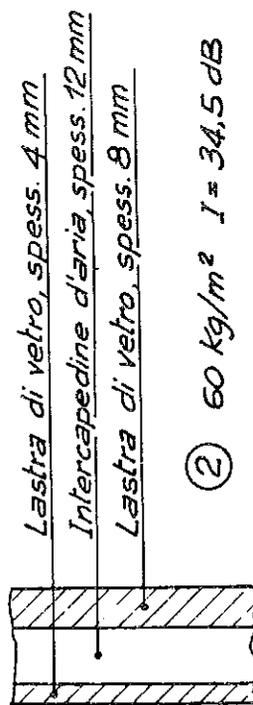
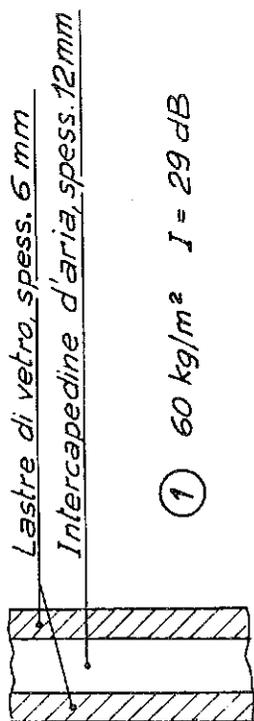
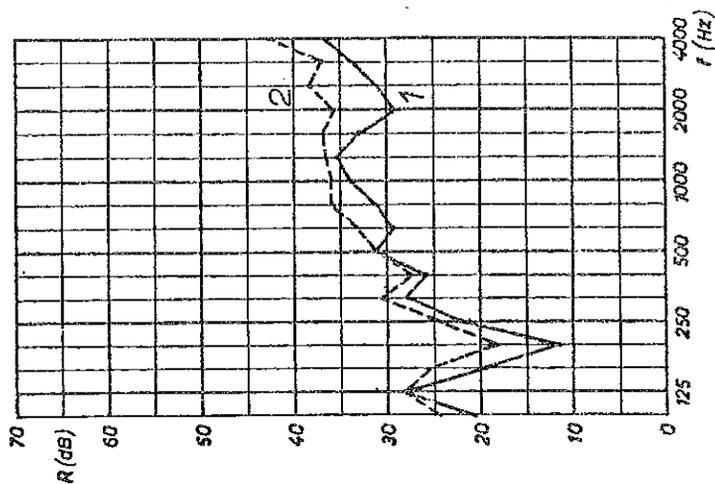


Fig. 23 - Potere fonoisolante di vetro-camera

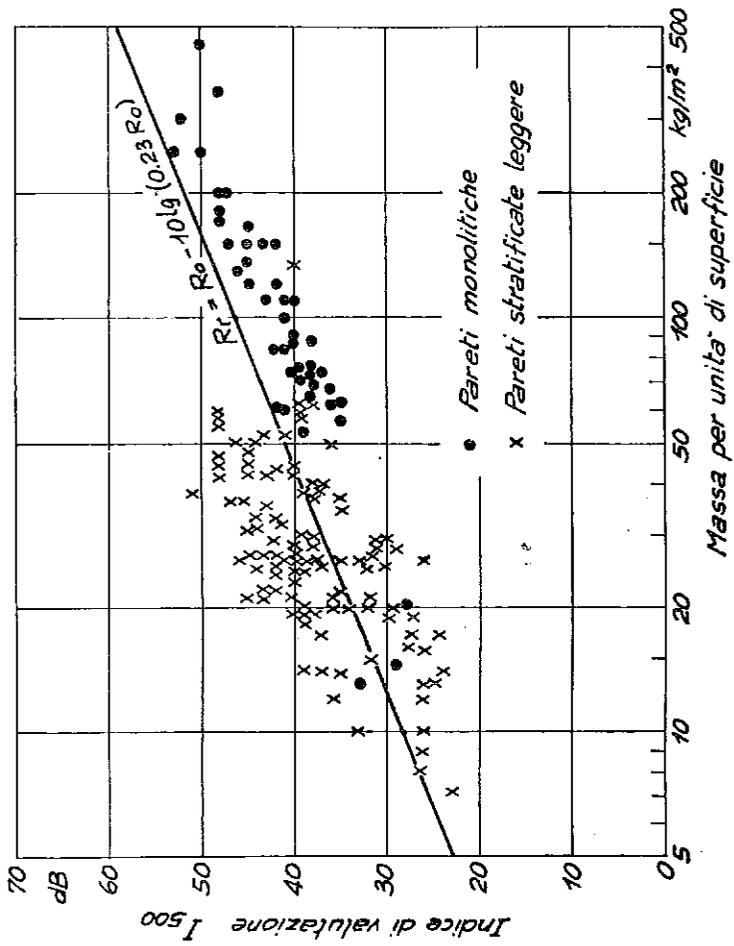


Fig. 24 - Confronto degli indici di valutazione di pareti monolitiche e di pareti stratificate leggere

per i divisori omogenei che presentano una caratteristica di frequenza relativamente regolare con pendenza di circa 5 dB per ottava. Tale asserzione è tanto meno valida quanto più è irregolare l'andamento delle curve, cosa che si verifica frequentemente nei divisori stratificati. Questo è verificato da dati sperimentali e gli scostamenti che si rilevano in figura sono da attribuire ai particolari comportamenti dei divisori considerati.

Il grafico, nei limiti delle approssimazioni considerate, mette in evidenza le migliori prestazioni, a parità di peso, delle pareti stratificate.

BIBLIOGRAFIA

- (1) Leo L. Beranek: "Noise reduction" - 1960, McGraw-Hill Book Company.
- (2) Leo L. Beranek: "Noise and vibration control" - 1971, McGraw-Hill Book Company.
- (3) Edward B. Magrab: "Environmental noise control" - 1975, John Wiley & Sons.
- (4) D.I. Croome: "Noise, buildings and people" - 1977 Pergamon Press.
- (5) E. Brosio: "Potere fonoisolante di vetri piani" - Rivista della Stazione Sperimentale del Vetro, sett.ott. 1972.
- (6) G. Benedetto, E. Brosio: "Comportamento acustico dei serramenti: confronto tra previsioni teoriche e rilievi sperimentali" - Rivista Italiana di Acustica, sett. 1978, vol. II, n. 3.
- (7) E. Brosio: "Confronto fra potere fonoisolante e permeabilità all'aria dei serramenti esterni" - Rivista Italiana di Acustica, genn. 1979, vol. III, n. 1.