

**Patrizio Bellucci**  
**Roberta Sanguinetti - Chiara Filattiera**

# Acustica in edilizia

*calcolo e valutazione delle prestazioni acustiche  
di edifici a partire dalle prestazioni dei prodotti*

*(D.P.C.M. 5/12/1997 e normativa UNI)*

**Edizioni Geo Network srl**  
Prima Edizione - Ottobre 2006

## **Geo Network srl**

Via Giuseppe Mazzini 64  
19038 Sarzana (SP) - Italia  
Tel. 0187 622198 - Fax 0187 627172  
Ass. Tecnica 0187 629894  
[www.geonetwork.it](http://www.geonetwork.it)  
e-mail: [info@geonetwork.it](mailto:info@geonetwork.it)

Tutti i diritti sono riservati

© Copyright 2006 - Geo Network srl

È vietata la riproduzione anche parziale e con qualsiasi strumento, senza l'autorizzazione scritta di Geo Network srl e dell'autore. I testi, anche se curati con scrupolosa attenzione non possono comportare specifiche responsabilità per involontari errori, inesattezze o un uso scorretto.

Geo Network srl e l'autore non si assumono alcuna responsabilità per danni diretti od indiretti causati dall'uso delle informazioni contenute in questa pubblicazione.

## **Premessa**

Il presente libro è dedicato a tutti coloro che, per motivi professionali o di studio, si trovano nella necessità di affrontare le problematiche legate alle prestazioni acustiche di componenti edilizi ed impiantistici, senza tuttavia avere dimestichezza con le complesse conoscenze teoriche che stanno alla base di esse.

Ad oggi, infatti, tutti i tecnici che operano nel settore dell'edilizia non possono più esimersi dal confrontarsi con questo aspetto che, essendo entrato ormai a pieno titolo a far parte dell'insieme delle tematiche inerenti le costruzioni in genere, deve essere sviscerato per arrivare ad una progettazione corretta ed il più possibile completa sotto ogni profilo.

## **Gli Autori**

## **Gli Autori**

**Patrizio Bellucci** – Ingegnere Civile – opera da tredici anni nel campo della progettazione edilizia; titolare di uno studio che si occupa dei molteplici aspetti dell'ingegneria civile e ambientale ed ha all'attivo numerosi interventi sia in ambito pubblico che privato; svolge anche attività formativa in qualità di docente ai corsi per l'abilitazione al ruolo di coordinatore nei cantieri temporanei e mobili. Autore degli archivi base del programma Euclide Piani di Manutenzione in applicazione dell'art.40 del D.P.R.554/99.

**Roberta Sanguinetti** – Ingegnere per l'Ambiente e il Territorio – collabora da diversi anni con lo studio dell'Ing. Bellucci occupandosi in primo luogo degli aspetti ambientali legati alla progettazione edilizia.

**Chiara Filattiera** – Ingegnere Civile – collabora da diverso tempo con lo studio dell'Ing. Bellucci all'interno del quale si occupa prevalentemente dello sviluppo degli aspetti strutturali legati alla progettazione edilizia.

Gli autori ringraziano

I collaboratori dello studio dell'Ing. Bellucci di Sarzana

I collaboratori della Geo Network di Sarzana

# INDICE

---

<b>INTRODUZIONE.....</b>	<b>1</b>
--------------------------	----------

<b>CAPITOLO 1. ACUSTICA IN EDILIZIA.....</b>	<b>6</b>
--	----------

1.1 Definizione delle grandezze fondamentali.....	6
1.1.1 Potere fonoisolante apparente di partizioni interne ( $R'$ ) .....	6
1.1.2 Isolamento acustico di facciata normalizzato rispetto al tempo di riverberazione ( $D_{2m,nt}$ ) .....	9
1.1.3 Livello di rumore da calpestio normalizzato ( $L_n'$ ) .....	10
1.1.4 Livello continuo equivalente di pressione ponderato A ( $L_{A,eq}$ ).....	11
1.1.5 Livello massimo di pressione sonora misurato con costante temporale slow, ponderato A ( $L_{A,S,max}$ ) .....	13
1.2 Gli indici di valutazione .....	13

<b>CAPITOLO 2. METODOLOGIE DI CALCOLO.....</b>	<b>16</b>
--	-----------

2.1 Indice del potere fonoisolante apparente di partizioni interne $R'_w$ .....	16
2.1.1 Il calcolo del potere fonoisolante di una partizione R .....	16
2.1.2 Osservazioni .....	19
2.2 Indice dell'isolamento acustico standardizzato di facciata $D_{2m,n}T'_{w}$ ...	20
2.2.1 Potere fonoisolante di infissi.....	21
2.3 Indice del livello di rumore di calpestio di solai, normalizzato $L_{n,w}$ .....	22
2.3.1 Interventi per la riduzione del livello di rumore di calpestio .....	23
2.4 Conclusioni.....	25

<b>CAPITOLO 3. INDICE DI VALUTAZIONE DEL POTERE FONOISOLANTE APPARENTE DI PARTIZIONI INTERNE <math>R'_w</math>.....</b>	<b>26</b>
---	-----------

3.1 Potere fonoisolante (R) di pareti semplici monostrato .....	26
3.1.1 Calcolo con i valori indice .....	26
3.1.2 Calcolo in frequenza.....	27

3.2	Potere fonoisolante (R) di pareti semplici multistrato.....	28
3.2.1	Calcolo con i valori indice .....	28
3.2.2	Calcolo in frequenza.....	28
3.3	Pareti semplici doppie.....	29
3.3.1	Calcolo con i valori indice .....	29
3.3.2	Calcolo in frequenza.....	29
3.4	Pareti semplici rivestite.....	32
3.4.1	Calcolo con i valori indice .....	32
3.4.2	Calcolo in frequenza.....	33
3.5	Pareti composte .....	33
3.5.1	Calcolo con i valori indice .....	34
3.5.2	Calcolo in frequenza.....	34
3.6	Potere fonoisolante apparente di una partizione .....	35
3.6.1	Valore indice del potere fonoisolante per percorso di trasmissione laterale..	37
3.6.2	Potere fonoisolante apparente .....	41

**CAPITOLO 4. INDICE DI VALUTAZIONE DELL'ISOLAMENTO ACUSTICO DI FACCIATA NORMALIZZATO RISPETTO AL TEMPO DI RIVERBERAZIONE  $D_{2M,NT}$  ..... 43**

4.1	Considerazioni generali .....	43
4.2	Calcolo in frequenza.....	44
4.3	Calcolo diretto dell' indice di valutazione.....	48
4.4	Verifica di norma.....	49

**CAPITOLO 5. INDICE DI VALUTAZIONE DEL LIVELLO DI RUMORE DA CALPESTIO NORMALIZZATO ( $L_N'$ ) ..... 50**

5.1	Considerazioni generali .....	50
5.2	Calcolo in frequenza.....	51
5.3	Calcolo diretto dell' indice di valutazione.....	53
5.4	Verifica di norma.....	54

<b>APPENDICE A: ESEMPIO DI CALCOLO .....</b>	<b>56</b>
<b>APPENDICE B:NORMATIVA DI RIFERIMENTO .....</b>	<b>63</b>
<b>APPENDICE C: D.P.C.M. 5/12/1997 “DETERMINAZIONE DEI REQUISITI ACUSTICI PASSIVI DEGLI EDIFICI” .....</b>	<b>65</b>
<b>BIBLIOGRAFIA.....</b>	<b>70</b>



## Introduzione

L'entrata in vigore della legge quadro del 26 ottobre 1997 n°447 "Legge quadro sull'inquinamento acustico" ha sancito definitivamente a livello normativo l'equivalenza "rumore = danno oggettivo", inducendo a considerare il controllo del disturbo da rumore alla stregua di un requisito igienico minimo richiesto ad un'unità immobiliare, indipendentemente dalla sua destinazione d'uso. Si sta praticamente arrivando ad equiparare, a giusta ragione, la richiesta del rispetto dei requisiti acustici (attivi e passivi), a quella dei requisiti termici, illuminotecnici, idro-sanitari ecc.

La legge quadro ha avuto un seguito di decreti attuativi, ognuno dei quali finalizzato alla normazione di specifici aspetti legati all'inquinamento acustico. Il D.P.C.M. 14/11/97, tra gli altri, è quello che fissa i valori massimi di immissione ed emissione delle sorgenti sonore nell'ambiente. Tra questi, il più importante nell'ambito dell'acustica in edilizia è indubbiamente il D.P.C.M. del 5 dicembre 1997, "*Determinazione dei requisiti acustici passivi degli edifici*", poiché è quello che sancisce di fatto i parametri ed i relativi loro limiti da rispettare nelle costruzioni.

Il decreto è strutturato in quattro articoli ed un allegato; a quest'ultimo si deve fare espressamente rinvio per quanto attiene la definizione delle grandezze di riferimento, le metodologie di calcolo e la misura delle stesse, ovvero per comprendere le modalità con cui affrontare la problematica della protezione acustica degli edifici. In questa breve introduzione si cercherà, pertanto, di esaminare sinteticamente il contenuto del D.P.C.M. 5 dicembre 1997, al fine di chiarire al lettore i passaggi concreti da effettuare e gli obiettivi a cui tendere in fase di progettazione di un edificio.

La premessa da cui il legislatore prende le mosse per trasporre il livello normativo è un problema in realtà piuttosto complesso e legato ad una molteplicità di fattori spesso incontrollabili. Si basa, infatti, sulla definizione di alcuni parametri caratteristici delle prestazioni acustiche di un edificio (o parte di esso) e sulla conseguente imposizione di limiti agli stessi. In questo modo si è pervenuti ad una forma di controllo relativamente semplice, ma non si può certo dire che sia altrettanto facile per gli utenti inquadrare correttamente il problema e giungere alla definizione di tali parametri in maniera univoca e priva di rischi.

Una breve analisi critica di quanto richiesto all'interno della norma consente di chiarire meglio l'affermazione suddetta e di iniziare ad inquadrare gli aspetti più controversi con i quali il progettista dovrà necessariamente confrontarsi per arrivare ad adempiere alle prescrizioni del D.P.C.M. 5/12/97.

“...Gli indici di valutazione che caratterizzano i requisiti acustici passivi degli edifici sono:

Indice del potere fonoisolante apparente di partizioni fra ambienti  $R'_w$ , da calcolare secondo la norma UNI 8270: 1987, parte 7<sup>a</sup> par. 5.1;

Indice dell'isolamento acustico standardizzato di facciata  $D_{2m,nT,w}$  da calcolare secondo le stesse procedure di cui al punto precedente ;

Indice del livello di rumore di calpestio di solai, normalizzato  $L_{n,w}$  da calcolare secondo la norma UNI 8270: 1987, parte 7<sup>a</sup> par. 5.2;...”

<b>TABELLA A: CLASSIFICAZIONE DEGLI AMBIENTI ABITATIVI</b>	
<i>Categoria A:</i>	<i>edifici adibiti a residenza e assimilabili</i>
<i>Categoria B:</i>	<i>edifici adibiti a uffici e assimilabili</i>
<i>Categoria C:</i>	<i>edifici adibiti ad alberghi, pensioni ed attività assimilabili</i>
<i>Categoria D:</i>	<i>edifici adibiti ad ospedali, cliniche, case di cura e assimilabili</i>
<i>Categoria E:</i>	<i>edifici adibiti ad attività scolastiche a tutti i livelli e assimilabili</i>
<i>Categoria F:</i>	<i>edifici adibiti ad attività ricreative o di culto o assimilabili</i>
<i>Categoria G:</i>	<i>edifici adibiti ad attività commerciali o assimilabili</i>

<b>TABELLA B: REQUISITI ACUSTICI PASSIVI DEGLI EDIFICI, DEI LORO COMPONENTI E DEGLI IMPIANTI TECNOLOGICI</b>					
<i>Cat. di cui alla tab. A</i>	<i>parametri</i>				
	$R'_w$	$D_{2m,nT,w}$	$L'_{n,w}$	$L_{ASmax}$	$L_{Aeq}$
<i>D</i>	55	45	58	35	25
<i>A, C</i>	50	40	63	35	35
<i>E</i>	50	48	58	35	25
<i>B, F, G</i>	50	42	55	35	35

Mentre il significato fisico delle grandezze richiamate all'interno del decreto verrà brevemente descritto nel paragrafo successivo, si vuole ora preliminarmente cercare di illustrare cosa comporti, nella pratica, progettare un edificio in modo tale che, per esempio, il potere fonoisolante delle pareti rispetti il limite imposto dalla Tabella B e quali siano le difficoltà oggettive legate alla determinazione corretta di tali parametri.

Prima di addentrarsi nello specifico di tutte le grandezze chiamate in causa dall'Allegato A del D.P.C.M., è doveroso premettere qualche considerazione di carattere generale che deve essere conosciuta dall'utente così da non accingersi al calcolo dei singoli valori ignorando alcune peculiarità la cui cognizione risulterebbe utile per non disperdere energie.

Un primo problema che emerge dalla definizione dei requisiti acustici passivi degli edifici e dei loro componenti, indipendentemente dal significato fisico dei parametri suddetti, è che le grandezze di cui si richiede la verifica fanno riferimento alla reale situazione di posa in opera dei componenti edilizi: ciò sta a significare che devono essere misurate ad edificio completato.

Questo, se da un lato è un vantaggio considerevole per la rilevazione dei valori dei parametri stessi e quindi per controllare il rispetto della normativa, dall'altro è una complicazione non da poco in fase progettuale, poiché obbliga, di fatto, a procedere per "previsioni": l'utente, infatti, si trova a dover supporre, partendo dalle caratteristiche intrinseche comuni dei materiali utilizzati, quale sarà il comportamento tenuto da questi in termini di isolamento acustico una volta posati in opera, a prescindere dagli aspetti connessi alle modalità con le quali sono stati assemblati, dalla reale rispondenza degli stessi alle peculiarità tecniche teoriche attribuite loro e da altri eterogenei elementi incidentali.

E' molto importante sottolineare questo aspetto, poiché è bene che il progettista sia consapevole, sin dalla fase previsionale dei requisiti acustici passivi di un edificio, del fatto che possa presentarsi l'eventualità che misure effettuate in opera diano risultati non soddisfacenti i limiti di norma, seppur lo studio di questi sia stato realizzato e verificato a priori nell'ottica del raggiungimento di tale obiettivo. Infatti, le modalità di realizzazione, la qualità dei materiali, le connessioni dei vari elementi costituenti l'intero edificio e tutta una serie di altri aspetti tecnici prettamente acustici dei quali non si tiene conto nelle modalità di calcolo, causa l'estrema complicatezza, possono influenzare negativamente un risultato che, in fase progettuale, si riteneva aver raggiunto.

Le variabili da cui dipendono i parametri acustici, inoltre, sono molteplici e non tutti i fenomeni fisici inerenti la propagazione del suono nei mezzi sono facilmente traducibili in formule analitiche che descrivano la realtà delle cose: i metodi utilizzati per l'analisi del problema, pertanto, sono soprattutto di carattere semiempirico. Questo implica che certe formule, ricorrenti in fase di calcolo ed universalmente riconosciute, hanno tuttavia una validità limitata a campi di applicazione ben definiti e, talvolta, potrebbero produrre, anche se utilizzate ad uopo, risultati comunque non riscontrabili successivamente alla messa in opera.

Il professionista, pertanto, dovrà fare uso di una certa prudenza nello stimare i requisiti acustici passivi degli edifici o di loro componenti in fase previsionale, onde poter mantenere un coefficiente di sicurezza tale da garantire il rispetto della normativa mettendosi al riparo da eventuali anomalie legate, per esempio, ad una cattiva esecuzione dell'opera oppure a particolari caratteristiche dei materiali impiegati.

Analogamente appare opportuno sottolineare la necessità di prestare molta attenzione anche ai dati forniti all'interno dei cataloghi di prodotti per l'isolamento acustico in edilizia: i valori proposti per i vari indici, infatti, sono, in genere, misurati effettivamente secondo quanto prescritto dalle relative norme UNI e possono, pertanto, essere venduti a tutti gli effetti come certificati.

È bene ricordare, tuttavia, che le condizioni al contorno richieste dalle norme UNI per effettuare le prove sui materiali sono limitative e non aderenti alla realtà nella quale il prodotto si troverà poi ad essere utilizzato: i valori proposti, pertanto, non sempre saranno realmente riscontrabili nella pratica. Per esempio, una parete sulla quale deve essere effettuata una misura del potere fonoisolante viene costruita ad hoc per l'evenienza: da ciò consegue che, innanzi tutto, ha dimensioni limitate, la cura con cui viene realizzata, inoltre, è tale che difficilmente potranno esservi imperfezioni siffatte da compromettere il suo rendimento (non verranno infatti certamente lasciati interstizi considerevoli tra un laterizio e l'altro, anzi la malta sarà utilizzata senza timori di spreco).

Oltre a ciò, poiché la norma non prevede un termine temporale minimo dalla realizzazione della parete decorso il quale sia possibile effettuare le misurazioni in questione, le prove vengono generalmente realizzate immediatamente, quando cioè l'umidità ancora presente all'interno dei materiali varia significativamente la massa della partizione e quindi l'esito del risultato.

Un ulteriore problema che si pone dalla semplice lettura delle definizioni dei parametri suddetti è che la norma UNI 8270, a cui si fa riferimento per le modalità di calcolo dei valori indice di tali parametri, è stata superata da una più recente, la UNI 717 (uscita in seguito all'emanazione dello stesso decreto), a cui si riferiscono anche altre recenti norme UNI in materia di previsione delle prestazioni acustiche degli edifici (tra le altre UNI 12354, UNI 11175). Ne consegue che il decreto fondamentale della legislazione vigente nel nostro paese continua a fare riferimento a norme difatto "obsolete" ponendo quindi il professionista nella condizione di dover verificare se le norme UNI di riferimento sono state sostituite da altre più aggiornate.

In base a questa considerazione il software Euclide Acustica ha scelto di utilizzare, quali modalità di calcolo degli indici di valutazione che caratterizzano i requisiti acustici passivi degli edifici, quelle riportate all'interno della UNI 717 e di non assecondare il "ritardo" del D.P.C.M. 5/12/97 .

Una ulteriore considerazione che appare interessante formulare, non tanto perché strettamente inerente alle problematiche di calcolo che il progettista si trova a dover fronteggiare, ma perché teoricamente costituisce un fatto piuttosto singolare, riguarda l'isolamento acustico di facciata. Non è prevista, infatti, alcuna

differenziazione del valore limite in funzione del livello di rumorosità dell'ambiente esterno, così come invece avviene in altri contesti europei: sia che l'edificio sorga in corrispondenza di un'autostrada o in aperta campagna, quindi, i requisiti richiesti sono identici a parità di categoria di destinazione d'uso dello stesso.

Il D.P.C.M., inoltre, come è agevole rilevare dalla definizione stessa dei requisiti acustici passivi degli edifici richiesti, impone limiti sui “valori indice” di grandezze acustiche che, in realtà, come si vedrà in seguito, dipendono anche dalla frequenza del suono disturbante. Questo è un modo per agevolare notevolmente l'interpretazione dei dati sulle prestazioni acustiche degli edifici.

Si rileva infine che le modalità di calcolo contenute all'interno della normativa prevedono anche la possibilità di utilizzare i valori in frequenza delle grandezze interessate e di pervenire solo in ultima fase al calcolo del valore indice equivalente. Ciò risulta di particolare rilevanza pratica qualora l'obiettivo sia quello di eseguire verifiche in opera, ovvero, effettuate a partire da dati ottenuti mediante rilevazioni acustiche in sito; in fase di progetto ragionare in termini di frequenza e sintetizzare le caratteristiche acustiche in valori indice soltanto alla fine del procedimento non costituisce invece, di fatto, un vantaggio significativo.

# Capitolo 1. Acustica in Edilizia

## 1.1 Definizione delle grandezze fondamentali

I parametri che il D.P.C.M. 5/12/1997 prende in esame quali fattori determinanti i requisiti acustici dei componenti di un edificio sono:

- Il potere fonoisolante apparente di partizioni interne ( $R'$ )
- L'isolamento acustico di facciata normalizzato rispetto al tempo di riverberazione ( $D_{2m,nt}$ )
- Il livello di rumore da calpestio normalizzato ( $L_n$ )
- Il livello continuo equivalente di pressione ponderato A ( $L_{A,eq}$ )
- Il livello massimo di pressione sonora misurato con costante temporale slow, ponderato A ( $L_{A,S,max}$ )

### 1.1.1 Potere fonoisolante apparente di partizioni interne ( $R'$ )

Tale grandezza caratterizza una parete in relazione alla sua capacità di “opporsi” alla trasmissione del suono per via aerea: l'energia associata all'onda sonora che incide su una parete ( $E_i$ ) è infatti parzialmente riflessa ( $E_r$ ), parzialmente assorbita ( $E_a$ ) e parzialmente trasmessa ( $E_t$ );

in termini di potenza sonora:

$$W_i = W_r + W_a + W_t \quad (1.1)$$

dividendo i due termini per la potenza incidente  $W_i$  si ottiene:

$$1 = \frac{W_r}{W_i} + \frac{W_a}{W_i} + \frac{W_t}{W_i} = r + a + t \quad (1.2)$$

in cui  $r$ ,  $a$  e  $t$  sono rispettivamente il coefficiente di riflessione, di assorbimento e di trasmissione.

Il potere fonoisolante  $R$  (misurato in Decibel (Db)) è definito come:

$$R = 10 \log\left(\frac{1}{t}\right) = 10 \log\left(\frac{W_i}{W_t}\right) \quad (1.3)$$

e rappresenta quindi, in termini logaritmici, la differenza dei livelli di potenza sonora incidente e trasmessa.

Il coefficiente di trasmissione può essere espresso dalla seguente relazione:

$$t = \frac{1}{1 + \left( \frac{\pi * m' * f * \cos \vartheta}{\rho_0 * c} \right)^2} \quad (1.4)$$

in cui:

$m'$  (kg/m<sup>2</sup>) è la massa superficiale della parete

$f$  (Hz) è la frequenza dell'onda sonora

$c$  (m/s) è la velocità del suono nell'aria

$\rho_0$  (kg/m<sup>3</sup>) è la densità dell'aria

per cui, sostituendo l'espressione (4) nella (3) si ottiene:

$$R = 10 \log \left[ 1 + \left( \frac{\pi * m' * f * \cos \vartheta}{\rho_0 * c} \right)^2 \right] \quad (1.5)$$

da cui si evince che il potere fonoisolante di una parete dipende dalla forza inerziale che essa oppone alla pressione acustica incidente e quindi dalla sua massa (maggiore è la massa della parete, maggiore è l'inerzia che è in grado di opporre ad un'azione agente su di essa e conseguentemente maggiore è il suo potere fonoisolante), dalla frequenza e dall'angolo di incidenza dell'onda, nonché dalle caratteristiche del mezzo.

A tale relazione conclusiva si è giunti dopo una serie di semplificazioni (l'onda sonora è stata per esempio considerata piana e la parete piana, indefinita e assimilabile ad un oscillatore semplice), trascurando i contributi dovuti alla rigidità e al potere smorzante della parete essendo questi determinanti al di sotto e nell'intorno della prima frequenza di risonanza  $f_0$  e quindi nei campi delle minime frequenze udibili per elementi di massa elevata e scarsa rigidezza per cui la frequenza di risonanza fondamentale  $f_0$  si trova nel campo delle basse frequenze. Introducendo l'ulteriore semplificazione che l'onda incidente sia ortogonale alla parete ed osservando che il termine tra parentesi dell'espressione (5) è molto maggiore dell'unità e trascurando perciò il termine unitario e sostituendo i valori standard alla densità dell'aria e alla velocità del suono nell'aria, si ottiene l'espressione del potere fonoisolante di una parete omogenea per incidenza normale di onde piane, nota come “*Legge della massa*”:

$$R_n = 20 \log(m' f) - 42.4 \quad (1.6)$$

che esprime come ad un raddoppio della massa superficiale della parete (o della frequenza dell'onda incidente) corrisponda un aumento di 6 Db del potere fonoisolante.

Nel caso più generico e realistico di campo sonoro diffuso il *potere fonoisolante* è espresso dalla seguente relazione (ottenuta integrando la (5) su una semisfera, da 0° a 90°):

$$R = R_n - 10 \log(0.23R_n) \quad (1.7)$$

Tale legge resta valida al di sotto della *frequenza critica*  $f_c$  che è quella frequenza per cui si verificano i cosiddetti *effetti di coincidenza*. l'onda flessionale instauratasi nella parete a seguito dell'incidenza dell'onda sonora è in fase con l'onda sonora stessa, requisito che facilita il trasferimento dell'energia sonora attraverso la parete, causando un abbattimento del potere fonoisolante. L'utilizzo di materiali adeguati fa però in modo che la frequenza critica sia spostata alle alte frequenze, al di fuori dal campo delle frequenze del parlato, e che lo smorzamento possa attenuare la succitata perdita di isolamento.

Poiché ad ogni angolo di incidenza corrisponde un determinato valore della frequenza critica, e poiché un campo sonoro diffuso è costituito da onde sonore con diverse direzioni (e quindi diversi angoli di incidenza sulla parete) solo una piccola quantità di energia sonora (quella associata all'onda incidente che subisce il fenomeno di coincidenza) sarà agevolata nel suo percorso attraverso la parete, mentre per tutte le altre onde non si verificherà alcun abbattimento di potere fonoisolante.

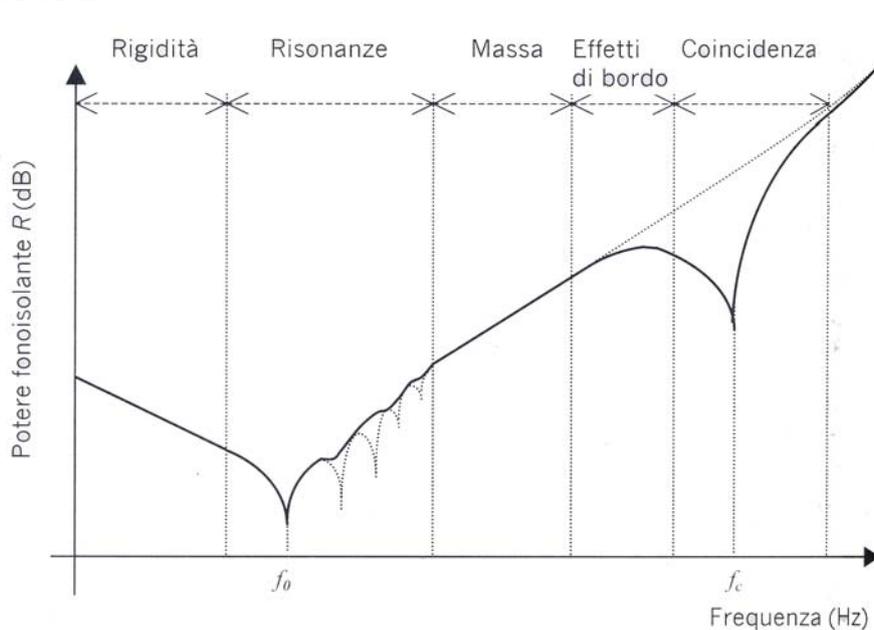


Fig.1.1: Andamento del potere fonoisolante in funzione della frequenza

Il D.P.C.M. 5/12/1997 utilizza la definizione di potere fonoisolante “*apparente*” ( $R'$ ) per dare l'opportuno rilievo al fatto che misurando in opera i livelli di pressione sonora incidente e trasmessa per il calcolo dell'indice (con i metodi stabiliti dalla UNI EN ISO 140) non si otterrà un valore effettivo di tale grandezza ma un valore che non può prescindere delle trasmissioni laterali attraverso le giunzioni tra pareti.

Per misure in opera (da eseguirsi al fine di verificare il rispetto del D.P.C.M. 5/12/1997) il valore del *potere fonoisolante apparente* si ottiene applicando la relazione:

$$R' = L_1 - L_2 + 10 \log \frac{S_s}{A} \quad (1.8)$$

in cui:

$L_1$  (Db) è il livello medio di pressione sonora nell'ambiente emittente;

$L_2$  (Db) è il livello medio di pressione sonora nell'ambiente ricevente;

$A$  ( $m^2$ ) è l'area di assorbimento equivalente nell'ambiente ricevente;

$S_s$  ( $m^2$ ) è l'area dell'elemento di separazione.

### ***1.1.2 Isolamento acustico di facciata normalizzato rispetto al tempo di riverberazione ( $D_{2m,nt}$ )***

Tale indice esprime la capacità di una parete di facciata di abbattere rumori aerei provenienti dall'esterno. Si definisce infatti, genericamente, *isolamento acustico*, la differenza tra il livello di pressione sonora generato dalla sorgente nell'ambiente in cui essa si trova e il livello di pressione sonora dell'ambiente ricevente.

Nel caso di cui si sta trattando l'ambiente disturbante è quello esterno in cui si trova la sorgente (traffico o altoparlante, pensato incidente a  $45^\circ$  sulla facciata), il livello sonoro di tale ambiente ( $L_{1,2m}$ ) è misurato a due metri di distanza dalla facciata (da qui il pedice “ $2m$ ” dell'indice) e il livello sonoro dell'ambiente ricevente ( $L_2$ ) è quello rilevabile all'interno dell'edificio.

$$D_{2m,nt} = (L_{1,2m} - L_2) + 10 \log \frac{T}{T_0} \quad (1.9)$$

L'isolamento acustico di facciata dipende, principalmente, dal potere fonoisolante apparente della parete di facciata in esame, così come già definito, e degli elementi che la costituiscono, nonché dalla forma della facciata stessa e dal suo indice di assorbimento, della trasmissione attraverso i giunti con le pareti adiacenti e dalle caratteristiche dell'ambiente ricevente interno.

Il D.P.C.M. 5/12/1997 prevede che tale valore di isolamento acustico venga “*normalizzato rispetto al tempo di riverberazione*”, intendendo come *tempo di riverberazione* il tempo necessario perché, dal momento in cui una sorgente cessa di emettere, il livello di pressione sonora si riduca di 60 Db. È proprio questo, infatti, il parametro che permette di descrivere le caratteristiche acustiche dell’ambiente ricevente, dipendendo dal suo volume e dal suo coefficiente di assorbimento.

L’ultimo termine della (1.9) mette in conto tale fattore:  $T$  è il tempo di riverberazione dell’ambiente ricevente e  $T_0$  è il tempo di riverberazione di riferimento che per le abitazioni è assunto pari a 0.5 secondi.

Per misure in opera (da eseguirsi al fine di verificare il rispetto del D.P.C.M. 5/12/1997) il valore dell’*isolamento acustico di facciata normalizzato rispetto al tempo di riverberazione* si ottiene applicando la stessa relazione (1.9).

### ***1.1.3 Livello di rumore da calpestio normalizzato ( $L_n'$ )***

A differenza dei due indici precedentemente descritti, l’indice in esame non riguarda i rumori aerei ma quelli di tipo impattivo, come quelli causati dai passi, dalla caduta di oggetti e da ogni tipo di urto su una parete, ma soprattutto (ed a questo fa stretto riferimento il D.P.C.M. 5/12/1997) su un solaio.

Il diverso meccanismo fisico di trasmissione di tali rumori fa sì che ci si debba cautelare diversamente nei loro confronti: l’urto fra due materiali rigidi causa un veloce trasferimento di forza impattiva elevata, generando rumore e vibrazioni nel mezzo di propagazione dell’onda sonora. Se i materiali (nel nostro caso quelli che costituiscono il solaio) sono resilienti la forza impattiva risulta inferiore ed il trasferimento avviene in tempi più lunghi a causa delle deformazioni del materiale resiliente: il rumore e le vibrazioni generate in questo secondo caso hanno uno spettro spostato verso le basse frequenze.

L’utilizzo di materiali resilienti e la realizzazione di giunti non rigidi tra i solai e le pareti (come l’utilizzo del “pavimento galleggiante”) possono quindi indurre fenomeni di smorzamento in grado di ridurre notevolmente il trasferimento di vibrazioni e onde sonore all’interno delle strutture ed il loro conseguente irradiazione all’interno dei locali di un edificio.

Tale parametro è espresso dalla seguente relazione:

$$L_n' = L_i + 10 \log \frac{A}{A_0} \quad (1.10)$$

in cui:

$L_i$  (Db) è il livello di pressione sonora di calpestio nell'ambiente ricevente;

$A$  (m<sup>2</sup>) è l'area di assorbimento dell'ambiente ricevente;

$A_0$  (m<sup>2</sup>) è l'area di assorbimento equivalente di riferimento (assunta pari a 10 m<sup>2</sup>).

Come nel caso del potere fonoisolante l'apostrofo sull'indice ( $L_n'$ ) ricorda che è necessario tener conto anche della inevitabile trasmissione laterale attraverso i giunti.

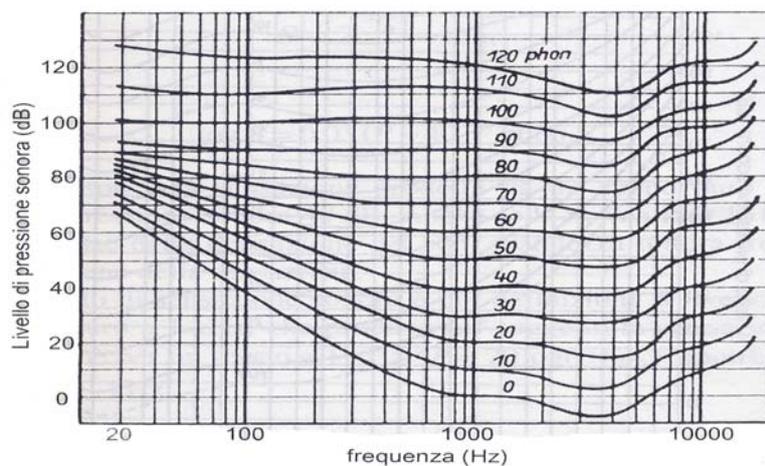
Per misure in opera (da eseguirsi al fine di verificare il rispetto del D.P.C.M. 5/12/1997) il valore del *livello di rumore da calpestio normalizzato* si ottiene applicando la stessa relazione (1.10).

#### ***1.1.4 Livello continuo equivalente di pressione ponderato A ( $L_{A,eq}$ )***

L'indice in oggetto fa riferimento ai rumori generati da impianti a funzionamento continuo: il D.P.C.M. 5/12/1997 fissa dei valori massimi per il livello sonoro da misurarsi nell'ambiente (diverso da quello in cui è presente la sorgente) in cui il livello di rumore risulta essere più elevato.

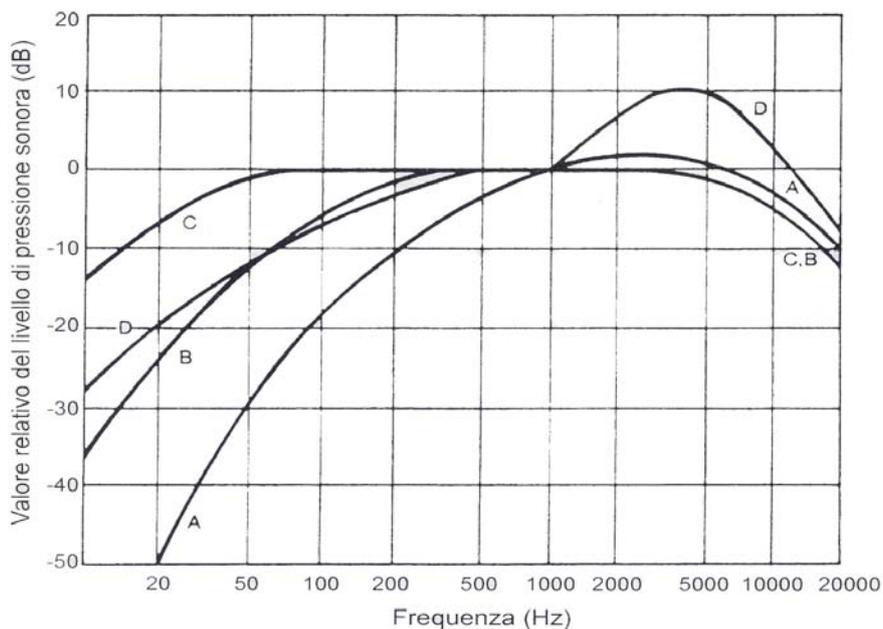
Le curve di ponderazione in frequenza (in questo caso si utilizza la curva A) sono quattro curve (A,B,C,D) studiate appositamente per tener conto della diversa percezione dell'orecchio umano nei confronti dei disturbi sonori, cioè, della diversa sensibilità alle varie frequenze dello spettro sonoro.

Riportando su un diagramma *frequenza* (Hz) - *livello di pressione sonora* (Db) i punti rappresentativi di analoghe percezioni uditive, Fletcher e Munson ottennero delle curve dette "isofoniche": i livelli di pressione sonora a 1000 Hz di ciascuna curva ottenuta rappresentano i valori della corrispondente percezione uditiva, misurata in *Phon*.



*Fig.1.2: Isofoniche di Fletcher e Munson*

La curva A era quella corrispondente all'isofonica a 60 Phon ed è oggi la più utilizzata in Europa per quasi tutte le applicazioni. Gli strumenti di misura del rumore forniscono oggi direttamente il valore ponderato cioè, un dato strettamente legato alla percezione uditiva.



*Fig.1.3: Curve di ponderazione*

### ***1.1.5 Livello massimo di pressione sonora misurato con costante temporale slow, ponderato A ( $L_{A,S,max}$ )***

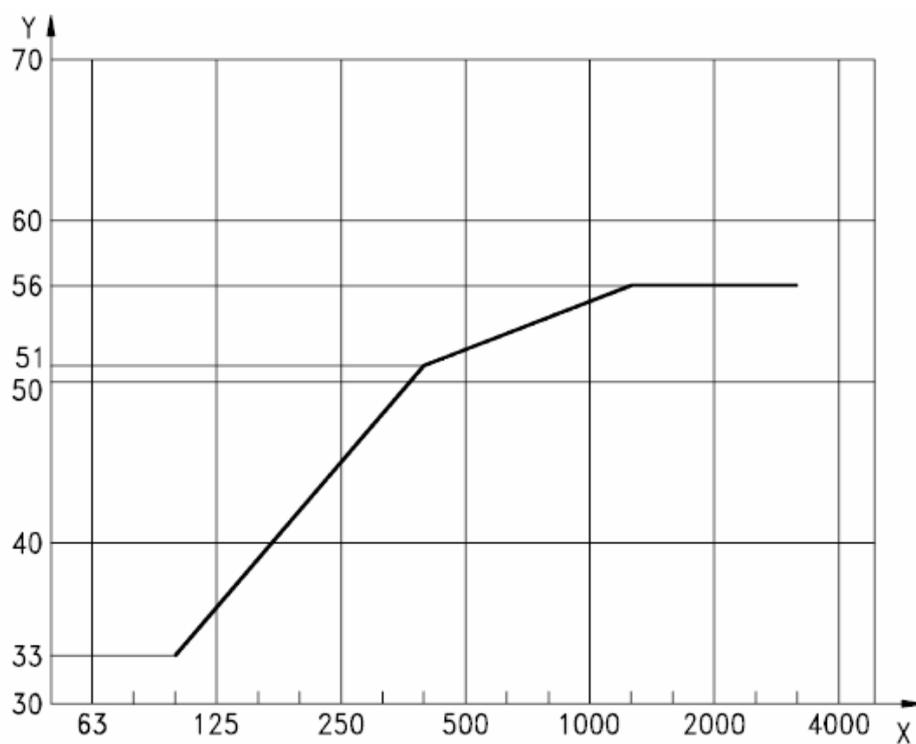
Anche quest'indice fa riferimento ai rumori generati dagli impianti, in questo caso a funzionamento discontinuo, e, come per i rumori generati da impianti a funzionamento continuo, il D.P.C.M. 5/12/1997 fissa dei valori massimi per il livello sonoro da misurarsi nell'ambiente (diverso da quello in cui è presente la sorgente) in cui il livello di rumore è più elevato.

## **1.2 Gli indici di valutazione**

Ciascuna delle grandezze sopra definite andrebbe valutata in funzione della frequenza in bande di 1/3 di ottava nel campo compreso tra 100 e 3150 Hz (campo delle frequenze del parlato) (quindi per le frequenze 100 / 125 / 160 / 200 / 250 / 315 / 400 / 500 / 630 / 800 / 1000 / 1250 / 1600 / 2000 / 2500 / 3150 Hz). Ciò significherebbe avere a disposizione, per ogni parametro, 16 valori numerici che non permetterebbero una valutazione immediata dell'efficienza del divisorio e un confronto tra diverse soluzioni.

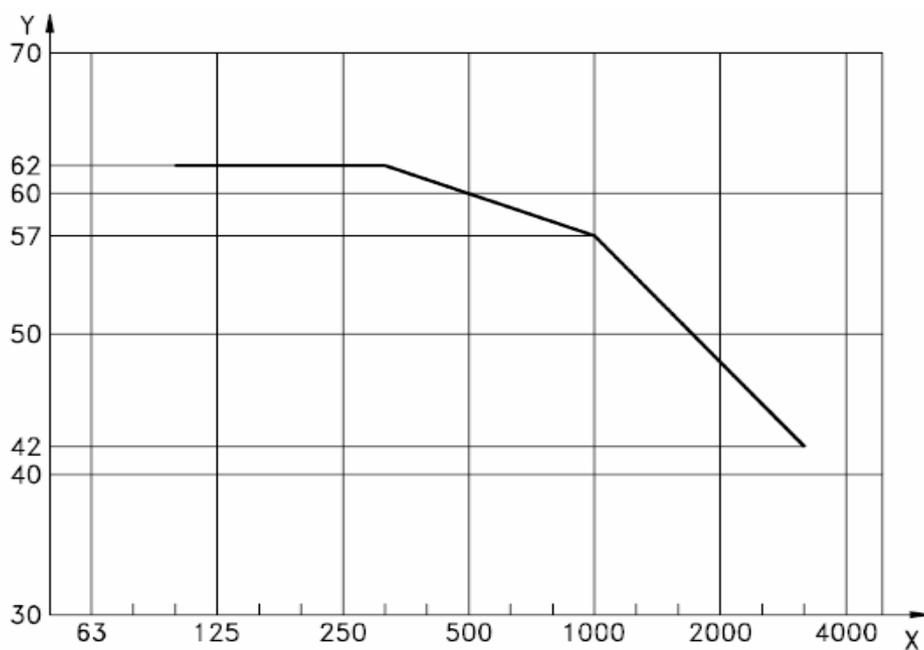
Per questo motivo è stato studiato un metodo normalizzato per ottenere un indice unico per ogni grandezza che tenga conto dei valori alle varie frequenze: la norma UNI EN ISO 717 fornisce una curva di riferimento per il rumore per via aerea (curva 1) ed una per il rumore da calpestio (curva 2): a partire da tali curve, è possibile ottenere i valori indice delle grandezze in esame.

Il metodo utilizzato consiste nel sovrapporre alla succitata curva di riferimento la curva ottenuta da misurazioni in opera (o da calcoli in frequenza) e nel traslare a passi di un Decibel la *curva* di riferimento sino a che la somma degli scarti sfavorevoli (per bande di terzo d'ottava nell'intervallo 100-3150 Hz, intendendo per scarti sfavorevoli quelli per cui il valore della misurazione è minore di quello corrispondente sulla curva di riferimento) sia più grande possibile ma non maggiore di 32 Db; il valore a 500 Hz sulla curva di riferimento rappresenta il *valore indice* della grandezza in esame.



X= Frequenza (Hz) Y= Valore di riferimento (dB)

*Fig.1.4: Curva di riferimento per rumori aerei (UNI EN ISO 717-1)*



X= Frequenza (Hz) Y= Valore di riferimento (dB)

*Fig.1.5: Curva di riferimento per rumore da calpestio (UNI EN ISO 717-2)*

Si ottengono in tal modo:

- Indice di valutazione del potere fonoisolante apparente ( $R_w'$ )
- Indice di valutazione dell'isolamento acustico di facciata normalizzato rispetto al tempo di riverberazione ( $D_{2m,nt,w}$ )
- Indice di valutazione del livello di rumore da calpestio normalizzato ( $L_{n,w}'$ )

Il pedice “w” significa “weighted” (pesato) ad indicare la ponderazione di tale coefficiente su tutte le frequenze appartenenti al campo di interesse.

Il D.P.C.M. 5/12/1997, allegato A, fissa dei valori massimi per  $R_w'$  (per pareti che separano due diverse unità abitative) e  $D_{2m,nt,w}$  (per pareti di facciata) e dei valori minimi per  $L_{n,w}'$  (per solai di interpiano) in funzione della destinazione d'uso dell'ambiente.

Nei prossimi capitoli si vedrà come sia possibile ottenere valori soddisfacenti degli indici di valutazione delle varie grandezze senza necessariamente dover eseguire analisi in frequenza, attraverso formule sperimentali che consentono notevoli semplificazioni in fase di progettazione.

## Capitolo 2. Metodologie di calcolo

### 2.1 Indice del potere fonoisolante apparente di partizioni interne $R'_w$

Come già brevemente accennato, il parametro fisico su cui la normativa impone una forma di controllo, è il valore indice del potere fonoisolante apparente  $R'_w$ , ovvero la quantità di energia sonora trasmessa nelle reali condizioni di utilizzo dalla partizione interna di un edificio.

Premesso che il calcolo di questo parametro comporta, innanzi tutto, la determinazione del potere fonoisolante della singola parete oggetto di verifica,  $R$ , poiché nell'analisi del problema, come già indicato, non si considera solo la trasmissione diretta del suono, ma anche quella laterale strutturale ed aerea, si sottolinea che tale valore andrà calcolato anche per tutti gli altri elementi strutturali che delimitano l'ambiente "sorgente del rumore" e quelli che delimitano l'ambiente "ricevente".

Seppure la procedura che porta a calcolare  $R'_w$  a partire dai singoli valori di  $R$  dei vari elementi sia molto complessa, all'utente di Euclide Acustica è semplicemente richiesto di specificare le modalità di giunzione tra le varie pareti: tutta la parte del calcolo successiva, infatti, viene implementata automaticamente dal software, il quale fornirà come output direttamente il valore  $R'_w$  da confrontare con quello imposto dal D.P.C.M.

Si ritiene utile sottolineare, tuttavia, la necessità che l'utente conosca almeno a grandi linee la natura della questione in esame ed i passaggi che non vengono direttamente visualizzati dall'elaboratore, poiché i singoli parametri che entrano a far parte del calcolo si possono determinare in vari modi e si può pervenire ad uno stesso risultato intervenendo su più fattori.

#### ***2.1.1 Il calcolo del potere fonoisolante di una partizione $R$***

Una banale, ma non ovvia, considerazione che consegue da quanto appena detto e che appare tuttavia importante sottolineare ancora una volta, riguarda il fatto che il risultato di tale verifica, non sarà influenzato unicamente dal valore del potere fonoisolante  $R$  della singola parete in esame (derivante da misure in laboratorio riportate su cataloghi o stimato mediante le varie formule semiempiriche disponibili), ma anche da tutte le altre condizioni al contorno. Appare pertanto ragionevole non ostinarsi a massimizzare quel valore, ispessendo magari la parete oggetto di verifica a dismisura, bensì considerare di agire anche su tutti gli altri parametri utili ai fini della verifica, descritti nell'apposito paragrafo di questa pubblicazione.

Il valore del potere fonoisolante  $R$  di una partizione qualsiasi, può essere stimato in diversi modi, tutti contemplati dal software Euclide Acustica, che si analizzeranno in breve qui di seguito:

1. mediante l'utilizzo di formule semiempiriche, per il calcolo tramite i soli valori indice;
  2. mediante l'utilizzo di formule analitiche, per il calcolo in frequenza;
  3. tramite valori sperimentali derivanti da cataloghi di prodotti per l'edilizia (indice ed in frequenza).
1. Nella letteratura di settore, esistono molte **formule semiempiriche** per i vari tipi di partizioni derivanti da numerose prove certificate in laboratorio effettuate su di esse; tuttavia queste formule rimangono affette da alcune variabili tra cui la più importante è senz'altro quella legata ad una problematica di natura fisica già precedentemente accennata: le diverse modalità di trasmissione del suono attraverso una parete.

Questa infatti può avvenire, in base al valore della sua frequenza critica, o in modo puramente massivo oppure in modo risonante: non esistono però modelli di calcolo riconosciuti che valutino correttamente il secondo caso, poiché in tale modalità di trasmissione entrano in gioco tutte le caratteristiche fisico-meccaniche dei materiali che costituiscono la partizione.

Da ciò consegue che tutte le formule suddette sono state studiate ipotizzando una trasmissione del suono in modo puramente massivo, ovvero per frequenze inferiori a quella critica; nella generalità dei casi, tuttavia, la trasmissione del suono in una parete in muratura per esempio, è anche di tipo risonante, per cui il fatto di utilizzare regole che tengano conto solo della massa costituisce di per sé una limitazione. Ciò nonostante, seppure vi sia una dispersione dei risultati ottenuti, le formule semiempiriche sono ritenute universalmente efficaci per una stima del potere fonoisolante in fase progettuale.

In questo panorama, la scelta di Euclide Acustica è stata quella di non esporre incautamente l'utente, proponendogli numerose formule ma estremamente specifiche e di validità comprovata per limitate tipologie di partizioni, bensì di consigliare l'utilizzo delle due formule più generiche, per quanto riguarda il campo di applicabilità, e più cautelative per quanto riguarda i valori proposti: in questo modo, infatti, si ritiene di poter tutelare già adeguatamente l'utente da eventuali anomalie rilevanti in materia di effettiva non perfetta aderenza tra i valori progettati e quelli misurati realmente in opera per la verifica normativa finale.

Una ultima considerazione: i dati necessari al fine del calcolo di R mediante le formule semiempiriche sono relativamente semplici da reperire: si tratta infatti di determinare, oltre le dimensioni geometriche dei locali interessati, la *massa superficiale* degli elementi strutturali che delimitano gli ambienti ricevente e sorgente, misurata in Kg/mq e lo *spessore* misurato in m di un'eventuale intercapedine presente nelle pareti doppie, oppure nelle contropareti.

Per ulteriori chiarimenti circa le formule utilizzate, i parametri di calcolo, le casistiche possibili sulle tipologie di partizioni, si rimanda all'apposito paragrafo della presente pubblicazione.

2. Le **formule analitiche** per il calcolo in frequenza sono naturalmente uniche e derivano da semplificazioni della trattazione teorica del problema della trasmissione del suono, come già brevemente illustrato. Dal punto di vista pratico è difficile stimare se in fase previsionale sia meglio effettuare un calcolo in frequenza facendo affidamento su queste formule piuttosto che su quelle empiriche valide per i soli valori indice; comunque, le differenze di risultato che si presentano con l'utilizzo dei due diversi metodi spesso non sono particolarmente significative.

Nel primo caso il calcolo si presenta lievemente più complesso, questo fatto, tuttavia, non è ravvisabile dall'utente nell'utilizzo del software, poiché i vari passaggi per pervenire al valore indice finale non vengono interamente esplicitati, bensì vengono semplicemente proposti i valori di partenza di R alle varie frequenze ed il valore indice equivalente.

Nel caso di verifiche effettuate in opera, invece, ragionare in termini di frequenza diventa inevitabile, poiché le misurazioni in sito tramite fonometri non possono prescindere da questo parametro fondamentale.

3. Infine, per quanto riguarda i valori, indice od in frequenza, riportati all'interno dei cataloghi dei prodotti per l'isolamento acustico in edilizia, si consiglia estrema cautela nell'assumere per buoni questi dati; riconoscendo l'impossibilità di pervenire in qualsiasi modo ad un valore certo di R.

La presenza di certificazione di tali valori da parte di prestigiosi istituti ufficialmente riconosciuti oppure da centri di ricerca universitari, infatti, garantisce semplicemente che le modalità con cui sono state condotte le sperimentazioni siano conformi a quanto previsto dalle norme UNI relative: è già molto, ma non mette in completa sicurezza l'utente dalle variabili già ormai più volte elencate.

In conclusione, si suggerisce di mantenere un coefficiente di sicurezza significativo in fase di calcolo: sarà, cioè, opportuno che l'utente scelga dei valori di  $R$  per le varie partizioni interessate dalla verifica che non portino ad un valore finale  $R'_w$  troppo al limite rispetto a quello imposto dal D.P.C.M., in modo tale da cautelarsi preventivamente da tutte le incertezze elencate e sottolineate più volte che potrebbero, nella pratica, portare al non raggiungimento del valore minimo prestabilito.

### ***2.1.2 Osservazioni***

Riconoscendo le difficoltà oggettive nel comprendere in modo esaustivo le problematiche appena narrate, così da tenerle debitamente a mente nel proseguo della trattazione, appare importante proporre un breve sunto del concetto di potere fonoisolante apparente, evidenziando a grandi linee i principi generali da tenere a mente in fase di progettazione.

Premesso che il calcolo di  $R'_w$  di una qualsivoglia partizione, verticale od orizzontale, dipende, principalmente, dai materiali con cui questa è stata realizzata e dalle modalità di collegamento degli stessi; è però vero che questo discende altresì dalle caratteristiche degli altri elementi strutturali che costituiscono gli ambienti che tale parete separa, nonché dalla connessione delle stesse partizioni tra loro e dall'interferenza che altri elementi non strutturali (in primis le reti impiantistiche, ma anche infissi, prese d'aria ed altri) producono con esse. La verifica di tutti questi fattori, dunque, soprattutto in fase realizzativa, contribuisce al raggiungimento del risultato di isolamento acustico ipotizzato in fase di progetto.

Non esiste un modo, analitico od empirico, che consenta di arrivare all'esatta determinazione del valore di  $R'_w$  di una parete: i vari metodi descritti consentono solamente di effettuare previsioni più o meno attendibili, infatti anche le condizioni al contorno, della cui influenza non si può tener conto in modo esaustivo nei modelli di calcolo, sono variabili fondamentali nella determinazione del risultato effettivo.

Non può che essere cura del progettista, quindi, effettuare una stima preventiva del valore del parametro in questione che da un lato sia il più attendibile possibile, dall'altro preveda un margine di errore tale da assicurare il rispetto della normativa da parte dell'opera una volta realizzata.

Alla luce delle suddette considerazioni si rileva che sebbene i materiali utilizzati, in primis gli isolanti acustici da interporre o accoppiare ai classici laterizi da parete, siano senz'altro importanti, comunque non possono da soli costituire la risoluzione del problema dell'isolamento acustico di una partizione.

Seppur non si sia analizzato nel dettaglio il problema fisico della trasmissione del suono attraverso le pareti, riteniamo comunque opportuno ricordare in questa sede un concetto molto importante: il potere fonoisolante non cresce indefinitamente all'aumentare dello spessore della partizione in esame. Pertanto è inutile concentrarsi solo su tale aspetto, arrivando a progettare pareti dalle dimensioni architettonicamente ed economicamente inaccettabili, poiché in realtà non producono il risultato sperato in termini di isolamento acustico.

Appare utile, perciò, suggerire una certa cautela e soprattutto una certa ponderatezza nell'impiego dei materiali proposti dal mercato per l'isolamento acustico di partizioni interne dal momento che in nessun modo possono costituire la facile soluzione a tutti i problemi del progettista.

## **2.2 Indice dell'isolamento acustico standardizzato di facciata $D_{2m,nT,w}$**

Le considerazioni da farsi su questo parametro imposto dalla normativa vigente, possono senz'altro essere esposte più sinteticamente, in quanto, in realtà, i concetti legati ad esso non si differenziano molto da quelli relativi al potere fonoisolante di una partizione interna; anche  $R'$ , infatti, interviene nella determinazione dell'isolamento acustico standardizzato di facciata ed è uno dei grado di ottimizzarne il valore.

Rimangono valide, pertanto, tutte le considerazioni svolte precedentemente, integrate da alcune specifiche, legate a particolari aspetti specifici dell'isolamento acustico della facciata di un edificio.

L'isolamento acustico della facciata di un edificio dipende principalmente dalla prestazione dei singoli elementi che la costituiscono: generalmente, infatti, la partizione in esame è una parete composta, all'interno della quale si trovano a collaborare al rendimento globale, anche parti piuttosto deboli in termini di prestazioni acustiche, quali gli infissi, i cassonetti delle avvolgibili, le prese d'aria.

Nella realtà dei fatti, sono proprio questi elementi acusticamente più deboli, poiché trasmettono una potenza sonora piuttosto elevata, ad influire significativamente sul risultato, penalizzando pesantemente anche la pur buona prestazione che la muratura costituente la facciata potrebbe fornire. Si sottolinea che anche la presenza o meno di balconi, portici, terrazzamenti, influisce sul calcolo dell'isolamento acustico di facciata, seppur in modo meno significativo rispetto agli elementi di cui sopra. Si può dunque concludere che, poiché la potenza sonora globalmente trasmessa da una facciata è pari alla somma delle potenze sonore trasmesse dalle singole parti che la costituiscono, il suo valore è necessariamente determinato anche e soprattutto dalla prestazione acustica degli

elementi in grado di consentire un maggiore trasmissione, in quanto acusticamente più deboli. L'attenzione del progettista, quindi, dovrà essere rivolta in particolare agli infissi, elementi generalmente abbondanti in facciata, anche in virtù di normative specifiche che ne determinano una quantità minima per ogni ambiente interno, a seconda della destinazione d'uso.

### ***2.2.1 Potere fonoisolante di infissi***

Premesso che le considerazioni in materia di potere fonoisolante di infissi sono di carattere puramente indicativo, ovvero vogliono prescindere completamente da una trattazione teorica ed esaustiva del problema, obiettivo della trattazione è dare, piuttosto, delle semplici linee guida da seguire in fase di progettazione, al fine di contenere l'effetto negativo che tali elementi esercitano sull'isolamento acustico standardizzato di facciata.

Date le caratteristiche fisiche dei materiali utilizzati ed in virtù degli spessori di uso comune nelle vetrate, accade che in tali elementi la frequenza critica si trovi sempre all'interno della gamma di frequenze considerata nel campo dell'edilizia, in posizione più o meno centrale; ne deriva che la trasmissione del suono avviene alle varie frequenze in modo massivo e risonante e che, spesso, è caratterizzato anche da una caduta per effetto di coincidenza.

Le reali modalità fisiche con cui il suono attraversa un infisso sono decisamente complesse e pertanto non facilmente traducibili in formule dirette di uso comune per la progettazione degli edifici; in virtù di questo fatto si richiama ancora una volta l'utente alla prudenza nella stima di questi parametri, al fine di cautelarsi per la verifica normativa in opera.

Un problema non da poco nella stima del potere fonoisolante di un infisso è che questo, per sua stessa composizione, è costituito quantomeno da due elementi sensibilmente diversi tra loro: il telaio (in legno, alluminio, acciaio, pvc etc.) e la vetrata vera e propria.

In letteratura esistono diverse formule semiempiriche per la determinazione del potere fonoisolante di quest'ultima: lo spessore delle singole lastre di vetro, la presenza di eventuali stratificazioni, nonché di camere d'aria, sono i fattori principali che ne influenzano il risultato.

Più complesso da analizzare è il comportamento del telaio: occorre innanzi tutto sottolineare che il materiale da cui è costituito non influisce in modo sensibile sulla prestazione acustica della vetrata; piuttosto è da controllare la superficie percentuale che esso detiene sulla complessiva dell'infisso e quindi il suo rapporto rispetto a quella della vetrata vera e propria. Il telaio, infatti, rappresenta l'elemento

debole del serramento, poiché costituisce l'elemento in grado di consentire il passaggio d'aria e quindi del rumore che si propaga attraverso di essa.

In linea di principio, se la massa del telaio non è inferiore al 70% di quella della vetrata e la sua superficie non è superiore al 25% di quella totale del serramento, allora si può ritenere che il potere fonoisolante del serramento sia sostanzialmente pari a quello della sola vetrata; in caso contrario è bene considerare anche la permeabilità all'aria del telaio, analogamente a quanto si fa ragionando in termini di risparmio energetico.

Un'altra considerazione che appare importante effettuare è quella relativa ai cassonetti delle avvolgibili: questi rappresentano generalmente un punto debole poiché mettono in comunicazione l'esterno con l'interno attraverso passaggi d'aria più o meno importanti. E' difficile quantificare nella pratica tali debolezze, anche in virtù del fatto che numerose sono le varietà di realizzazioni pratiche che si possono trovare.

Nel caso in cui il cassonetto sia rivestito internamente da materiale fonoassorbente (cassonetto silenziato) il suo potere fonoisolante può essere considerato pari a quello del serramento a cui appartiene. Nel caso in cui questo invece non sia silenziato, il suo potere fonoisolante sarà inferiore a quello del serramento e la differenza sarà tanto maggiore quanto più elevato sarà  $R$  di quest'ultimo.

Non vi sono indicazioni certe per tenere conto in fase di calcolo di tali elementi, l'unico suggerimento utile che si ritiene di dare all'utente è quello di considerare comunque la presenza di zone di facciata costituite da lastre di materiale indefinito (purché di massa superficiale paragonabile a quella dei pannelli che delimitano usualmente tali cassonetti) di esiguo spessore.

### **2.3 Indice del livello di rumore di calpestio di solai, normalizzato $L_{n,w}$**

Il controllo del livello di rumore di calpestio implica la verifica dell'entità della trasmissione di rumori impattivi attraverso le strutture di partizione orizzontali, ovvero i solai di qualsivoglia natura. La fonte più comune di rumore impattivo è per l'appunto il calpestio dei passi. In effetti però, qualunque sorgente, macchina, dispositivo, elettrodomestico che agisca meccanicamente sulla superficie del pavimento può produrre direttamente nell'ambiente sottostante un suono di analoga natura impattiva.

Generalmente questo è il problema progettuale più significativo da risolvere in termini di protezione acustica di un edificio, dal momento che i solai

utilizzati comunemente nella pratica edilizia hanno caratteristiche prestazionali sensibilmente al di fuori dei limiti previsti dal D.P.C.M., indipendentemente dalle condizioni al contorno in cui si trovano a lavorare (si va dai 72 dB per quelli a lastra in cls e laterizio, ai 75 dB per quelli a lastra in cls e polistirolo, per arrivare sino agli 85 dB per gli altri tipi): è praticamente inevitabile, pertanto, dover intervenire adottando misure appropriate.

Appare opportuno premettere, prima di addentrarsi nella descrizione pratica del problema, una considerazione generale, indipendente dalle questioni tecniche vere e proprie, ma inerente semplicemente il contenuto della norma: il livello di rumore da calpestio è un valore assoluto, ovvero, tanto minore è il suo valore tanto maggiore è l'isolamento offerto dalla partizione orizzontale in esame.

Osservando i limiti imposti all'interno della tabella B del decreto, emerge che **le prestazioni migliori sono richieste agli uffici ed alle attività ricreative e commerciali**: va da sé che il fatto è piuttosto singolare e costituisce un'anomalia nel quadro normativo generale in materia di acustica all'interno del quale ci troviamo ad operare. La normativa di settore, infatti, tende a salvaguardare dall'inquinamento acustico in primis gli ospedali, le scuole e quindi le abitazioni.

Non si è ancora stabilito se tale incongruenza dipenda da un'interpretazione errata del valore indice da parte del legislatore, il quale potrebbe aver supposto che anche per questo parametro, analogamente agli altri definiti, un basso valore numerico corrispondesse a peggiori prestazioni acustiche, oppure se i limiti siano stati imposti, in realtà, all'ambiente disturbante e non a quello ricevente, come accade per gli altri parametri; a onor del vero anche questa seconda ipotesi, tuttavia, genera incongruenze non da poco qualora si vadano a considerare i numerosi casi in cui si trovano sovrapposte due tipologie di ambienti, con destinazioni d'uso diverse. E' bene, quindi, che l'utente sia consapevole di questa particolarità ed analizzi attentamente la situazione in cui si trova ad operare, onde evitare spiacevoli sorprese al momento della verifica normativa.

### ***2.3.1 Interventi per la riduzione del livello di rumore di calpestio***

Il livello di rumore da calpestio è forse il parametro più difficile da stimare in fase previsionale, non tanto per le modalità di calcolo, quanto perché come in nessun altro caso le condizioni al contorno ipotizzate nel calcolo sono difficili da realizzare nella pratica costruttiva. Si suggerisce pertanto all'utente di porre un'attenzione ancora maggiore, se possibile, a quella riposta per il calcolo degli altri parametri.

Il comportamento di una partizione orizzontale riguardo il livello di rumore di calpestio trasmesso all'ambiente ricevente è **sensibilmente influenzato**

**dalla natura del solaio ed anche dal tipo di pavimentazione** con il quale è stato rivestito. La rigidità, in particolare, è il parametro caratteristico che maggiormente influenza le prestazioni acustiche: solai rigidi costituiti da solette in c.a., oppure in laterocemento, hanno un comportamento peggiore di solai dal comportamento più elastico quali quelli in legno; analogamente, a parità di struttura, pavimenti realizzati in materiali rigidi (ceramica, marmo, etc.) danno origine a livelli di rumore da calpestio più elevati di solai con pavimentazioni più elastiche (legno, moquette, etc.).

Le prestazioni di un solaio in termini di livello di rumore di calpestio, di conseguenza, contrariamente a quanto accade per i rumori aerei, migliorano anche se l'orditura è diretta lungo la luce maggiore, poiché diminuisce la rigidità complessiva della partizione. Come già accennato, difficilmente una partizione orizzontale sarà in grado di rispettare i limiti imposti dal D.P.C.M. senza alcun intervento migliorativo.

Il modo più banale per limitare il rumore da impatto consiste nel ridurre l'eccitabilità del pavimento rivestendolo con uno strato di materiale resiliente, molto più soffice del pavimento stesso; tale strato modifica la forza impulsiva e quindi la frazione di potenza meccanica trasmessa al solaio dall'urto. Rivestimenti in gomma, linoleum, sovrapposti a materiali più morbidi come feltri o materiali fibrosi, ottengono riduzioni significative di  $L_{n,w}$  sfruttando proprio questo fatto; si può arrivare a riduzioni di circa 15-20 dB.

Tuttavia risulta spesso più pratico e vantaggioso ricorrere all'utilizzo di pavimenti galleggianti, ovvero la separazione dello strato rigido calpestabile del solaio da quello strutturale sottostante, mediante l'interposizione di uno strato di materiale resiliente. In questo, modo, infatti, si abbatte sensibilmente la trasmissione del suono dalla superficie oggetto di impatto, alla struttura vera e propria che confina con l'ambiente ricevente sottostante. Naturalmente, perché questo sistema risulti efficace, il pavimento galleggiante deve essere separato elasticamente lungo tutto il perimetro anche dalle pareti laterali che lo delimitano, poiché anche in questo caso non si ragiona solo in termini di trasmissione diretta, ma anche in termini di fiancheggiamento strutturale. Analogamente non è ammesso che gli impianti, nel loro percorso, generino ponti acustici, offrendo percorsi non isolati elasticamente al suono.

Questa soluzione nella pratica dovrebbe essere realizzata interponendo tra la struttura del solaio vera e propria ed il massetto di sottofondo della pavimentazione uno strato di materiale elastico, caratterizzato da un certo spessore ed una certa rigidità dinamica; tale parametro, dal quale dipende la frequenza di risonanza del sistema, è quello fondamentale ai fini della caratterizzazione del pavimento galleggiante.

Questa tipologia di soluzione comporta un inevitabile incremento dello spessore della partizione orizzontale: è bene tenere a mente che un'adeguata protezione acustica non è attuabile nell'ordine dei 30 cm di spessore; questo è sicuramente un problema non da poco, considerando il fatto che le altezze interne sono ormai sempre più ristrette in fase di progettazione architettonica.

Tuttavia, realizzare uno strato isolante perfettamente continuo lungo tutta la partizione orizzontale, adeguatamente risvoltato anche sulle pareti verticali e perfettamente integro non è impresa di facile realizzazione. Anche in questo caso il controllo in cantiere delle modalità con cui verrà eseguito quanto indicato a livello progettuale risulta quanto mai indispensabile.

Un'altra soluzione per migliorare ulteriormente l'isolamento del solaio, in affiancamento al pavimento galleggiante o al rivestimento della pavimentazione con materiale soffice poiché da sola non comporta un vantaggio considerevole, è la realizzazione di una controsoffittatura pesante, sospesa a mezzo di elementi elastici al soffitto dell'ambiente ricevente. Il controsoffitto deve essere realizzato con materiale il più possibile continuo: il gesso è l'ideale con l'intercapedine riempita di materiali fibrosi quali le lane minerali, di legno o di fibre di poliestere, per evitare che si comporti come una cassa armonica.

## **2.4 Conclusioni**

Purtroppo, la delicatezza e la complessità dei problemi sin qui affrontati ne impediscono una trattazione ed una risoluzione semplice e diretta in termini progettuali. Pertanto, poiché la vigente normativa di settore non definisce compiutamente tutti gli aspetti necessari, l'utente, tenendo a mente le considerazioni di principio di cui si è trattato, dovrà cercare di cautelarsi autonomamente come egli stesso ritiene più opportuno.

## **Capitolo 3. Indice di valutazione del potere fonoisolante apparente di partizioni interne $R'_w$**

Come già più volte accennato nei paragrafi introduttivi, sono molti i fattori che influiscono nel computo del potere fonoisolante apparente di una partizione e diverse le tipologie di calcolo possibili.

In questo paragrafo, pertanto, si andranno ora ad illustrare le modalità effettive di approccio alla determinazione del valore di  $R'_w$  su cui è improntato il programma Euclide Acustica; naturalmente queste fanno riferimento, per quanto riguarda l'aspetto metodologico, alla normativa vigente, per quanto riguarda gli ambiti di applicazione delle formule, in particolare per quelle semiempiriche, alle tipologie edili riscontrabili nel territorio nazionale.

In primis dunque vengono elencate le formule utilizzate per calcolare il valore del potere fonoisolante  $R$  (indice o in frequenza) delle varie partizioni, a seconda delle casistiche riscontrabili; successivamente viene riportato il metodo di calcolo previsto dalla normativa per arrivare da questi alla definizione vera e propria del valore indice del potere fonoisolante apparente di una partizione interna.

### **3.1 Potere fonoisolante ( $R$ ) di pareti semplici monostrato**

Si definiscono pareti semplici e monostrato le partizioni costituite da un unico paramento composto da un solo materiale, ovvero prive di elementi quali finestre, porte, bocchette per l'aria e cassonetti per le avvolgibili.

Questa è la condizione che si riscontra in via generale nella maggior parte delle pareti interne degli edifici; rientrano pienamente in questa categoria anche le partizioni costituite da un'unica fila di laterizi uniti con malta, poiché questa tecnologia costruttiva viene ragionevolmente considerata nella sua interezza, senza scindere il comportamento dei due materiali.

Qualora se ne rilevi la necessità, per esempio quando gli spessori sono considerevoli, è talvolta possibile conteggiare separatamente il contributo dell'intonaco; in tal caso, tuttavia, la parete non può più essere considerata monostrato, bensì multistrato.

#### ***3.1.1 Calcolo con i valori indice***

La formula di uso più comune per il calcolo del valore indice, messa a punto tramite numerose prove empiriche in ambito nazionale, e riportata anche all'interno della norma UNI TR 11175, è:

$$R_w = 20 \log(m') dB \quad (3.1)$$

La sua validità è relativa a pareti in laterizio normale o alleggerito di massa superficiale complessiva compresa tra 80 e 400 Kg/mq; tuttavia, può essere utilizzata anche in altri casi, poiché i risultati che fornisce sono comunque attendibili per le finalità che persegue.

La norma UNI EN ISO 12354 riporta al suo interno un'altra formula per pareti la cui massa superficiale è superiore ai 150 Kg/mq, la cui affidabilità, però, è più indicata per elementi monolitici piuttosto che per i laterizi forati uniti tramite malta di uso comune; tale formula è:

$$R_w = 37,5 \log(m') - 42 dB \quad (3.2)$$

Il programma Euclide Acustica le propone entrambe, consentendo all'utente di valutare in piena autonomia quale delle due formule ritiene più opportuno utilizzare, anche in base alle considerazioni già precedentemente effettuate.

### 3.1.2 Calcolo in frequenza

Per quanto riguarda il calcolo in frequenza del potere fonoisolante di pareti semplici monostrato, la formula comunemente utilizzata è la così detta "Legge della massa" integrata su una semisfera, già citata (cfr. infra Capitolo 1).

E' una formula analitica che deriva direttamente dallo sviluppo teorico, a mezzo di alcune semplificazioni, della definizione del potere fonoisolante di una partizione.

Nello specifico:

$$R = R_n - 10 \log(0.23 R_n) dB \quad (3.3)$$

dove:

$$R_n = 20 \log(m' f) - 42.4 dB \quad (3.4)$$

esplicitando i termini:

$$R = [20 \log(m' f) - 42.4] - 10 \log(0.23 [20 \log(m' f) - 42.4]) dB \quad (3.5)$$

In questo caso, poiché la formula ricorrente è unica, il programma Euclide Acustica la applica direttamente, all'utente, pertanto, non vengono mostrati i passaggi intermedi, bensì solo i valori di R alle varie frequenze ed il valore indice dedotto da essi, secondo quanto prescritto dalla norma UNI EN ISO 717.

### 3.2 Potere fonoisolante (R) di pareti semplici multistrato

Si definisce invece parete semplice multistrato una partizione priva di elementi quali finestre, porte, bocchette per l'aria e cassonetti per le avvolgibili, costituita da più strati uniti tra loro composti da materiali diversi.

Ai sensi della normativa vigente rientrano in questa categoria anche le pareti costituite da due paramenti separati da un'intercapedine inferiore ai 5cm, indipendentemente dal fatto che sia riempita d'aria o con un materiale fonoassorbente; per partizioni con intercapedini di spessore maggiore o uguale a 5cm si parla invece di pareti doppie e le modalità di calcolo di R sono diverse.

Non possono definirsi pareti semplici quelle costituite da un paramento in laterizio, o qualsiasi altro materiale, accoppiato ad un pannello isolante: in tal caso, infatti, si parla di parete con applicato uno strato addizionale e la trattazione del problema della determinazione di R è completamente diversa.

#### 3.2.1 Calcolo con i valori indice

Per il calcolo del valore indice del potere fonoisolante di una parete semplice multistrato si utilizzano le formule indicate per le pareti semplici monostrato, la massa superficiale  $m'$  del singolo paramento, però, viene sostituita dalla somma delle masse di tutti gli elementi che costituiscono la parete.

Nello specifico, una volta definita la massa superficiale totale di tutta la parete misurata in kg/mq

$$m'_{tot} = \sum_{i=1}^n m'_i \quad (3.6)$$

l'utente può scegliere, in base a ciò che ritiene più opportuno, di applicare la (3.1) o la (3.2) riformulate nella seguente forma:

$$R_W = 20 \log(m'_{tot}) dB \quad (3.7)$$

$$R_W = 37,5 \log(m'_{tot}) - 42 dB \quad (3.8)$$

#### 3.2.2 Calcolo in frequenza

Per il calcolo del valore del potere fonoisolante di una parete semplice multistrato in frequenza vale un ragionamento completamente analogo a quello appena svolto circa il valore indice: ovvero anche in questo caso si applica la formula indicata per le pareti semplici monostrato, sostituendo al posto di  $m'$  la massa superficiale totale della parete calcolata tramite la (3.6).

Si ottiene quindi la seguente formula finale:

$$R = [20 \log(m_{tot} ' f) - 42.4] - 10 \log(0.23[20 \log(m_{tot} ' f) - 42.4])dB \quad (3.9)$$

### 3.3 Pareti semplici doppie

Si definisce doppia una parete composta da due paramenti di qualsivoglia materiale separati da un'intercapedine riempita d'aria o da un materiale fonoassorbente di spessore maggiore o uguale a 5 cm. La presenza dell'aggettivo "semplici" si riferisce sempre all'assenza di elementi quali finestre, porte, bocchette per l'aria e cassonetti per le avvolgibili all'interno della parete stessa.

#### 3.3.1 Calcolo con i valori indice

Per il calcolo del potere fonoisolante di una parete semplice doppia è ancora ammesso, dalla norma UNI TR 11175, l'utilizzo della formula 3.7, tuttavia viene specificato che i risultati che si ottengono in questo caso sono estremamente cautelativi.

La letteratura tecnica, in merito a questa condizione, fa usualmente riferimento ad un'altra formula che è stata sviluppata a livello nazionale e che ha dato risultati soddisfacenti in termini di riscontro con i valori misurati in opera:

$$R_w = 20 \log(m_{tot} ' ) + 20 \log(d) - 10 \quad (3.10)$$

dove  $m_{tot} '$  è la massa superficiale totale di tutta la parete misurata in Kg/mq calcolata secondo la (3.6) e  $d$  è lo spessore dell'intercapedine misurata in cm.

Il programma Euclide Acustica ha preferito utilizzare la (3.10) in virtù della attendibilità dei risultati forniti dalla stessa, anche se la normativa vigente non l'ha ancora recepita ufficialmente; tuttavia, poichè il campo dell'acustica in edilizia è in continua evoluzione, dal punto di vista normativo è più che naturale che non tutte le nuove conoscenze acquisite siano state ancora tradotte in leggi.

#### 3.3.2 Calcolo in frequenza

Per il calcolo in frequenza delle pareti semplici doppie il discorso è leggermente più complesso poiché, a livello teorico, vi sono più parametri che entrano in gioco e portano a procedure di calcolo diverse a seconda di specifiche condizioni al contorno.

Il primo parametro da sottoporre a controllo, prima di determinare quale procedura di calcolo seguire, è il prodotto  $kd$ , dove  $k$  è il numero d'onda (ipotizzando la distribuzione modale bidimensionale dell'onda sonora su un pannello) ed è uguale a:

$$k = \frac{2\pi f}{c} \quad (3.11)$$

in cui  $f$  è la frequenza che si sta considerando e  $c$  è la velocità del suono nell'aria in condizioni standard. Premesso che la condizione da verificare è la seguente,

- 1)  $kd \ll 1$
- 2)  $kd \neq \ll 1$

a seconda che si ricada nel primo o nel secondo caso, le procedure da tenere in fase di calcolo sono sensibilmente diverse, così come pure le altre condizioni al contorno da verificare in seconda battuta.

Naturalmente il programma Euclide Acustica espleta tutti questi controlli in automatico fornendo all'utente unicamente i valori di  $R$  alle varie frequenze ed il relativo valore indice corrispondente (calcolato secondo la UNI ISO 717-1); tuttavia si andranno ad analizzare qui di seguito tutte le casistiche possibili, al fine di chiarire all'utente i ragionamenti teorici che determinano il risultato da lui ottenuto.

1) Nel caso in cui il prodotto  $kd$  sia sensibilmente minore di 1, il secondo elemento da controllare per scegliere la procedura di calcolo corretta è il valore della frequenza elastica di risonanza del sistema  $f_0^{(d)}$ , definita come:

$$f_0^{(d)} = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{k_a'}{M_r'}} \text{Hz} \quad (3.12)$$

dove  $k_a'$  è la costante elastica della molla equivalente allo strato d'aria che costituisce l'intercapedine ed è pari a:

$$k_a' = \frac{\rho_0 c^2}{d} \text{ (N / m}^3\text{)} \quad (3.13)$$

e  $M_r'$  si definisce come massa areica ridotta dei due pannelli e si calcola nel seguente modo:

$$M_r' = \frac{m_1' m_2'}{m_1' + m_2'} \text{ (kg / m}^2\text{)} \quad (3.14)$$

dove  $m_1'$  e  $m_2'$  sono le masse superficiali misurate in Kg/mq dei due paramenti costituenti la parete doppia e separati dall'intercapedine.

In base al valore di  $f_0^{(d)}$  ottenuto, per calcolare il potere fonoisolante della parete bisogna confrontare con tale entità le varie frequenze previste dalla normativa e, a seconda del rapporto che intercorre tra le due grandezze, operare nel rispettivo modo:

a) se  $f > f_0^{(d)}$

il potere fonoisolante della partizione alla frequenza  $f$  si ottiene a partire dalla seguente formula:

$$R = R(m_1') + R(m_2') + 20 \log(2kd) \text{ dB} \quad (3.15)$$

dove, con i termini  $R(m_{1/2}')$ , si indica sinteticamente la (3.5) applicata al paramento di massa superficiale  $m_{1/2}'$  costituente la parete doppia

b) se  $f < f_0^{(d)}$

il potere fonoisolante della partizione alla frequenza  $f$  si calcola ricorrendo ancora una volta alla (3.9).

c) se  $f = f_0^{(d)}$

il potere fonoisolante della partizione a questa frequenza tende a zero, dal momento che il comportamento della trasmissione avviene in modo puramente massivo ed in questa situazione non è possibile trascurare gli smorzamenti meccanici dei due paramenti.

**2)** Nel caso in cui il prodotto  $kd$  non sia sensibilmente minore di 1, prima di determinare la procedura di calcolo più corretta bisogna effettuare un altro tipo di controllo numerico sul valore di tale prodotto, in particolare occorre verificare se:

$$a) \quad kd = (2n-1) \frac{\pi}{2}$$

ovvero il prodotto è un multiplo dispari di  $\pi/2$ , in tal caso il potere fonoisolante della partizione alla frequenza  $f$  si calcola come:

$$R = R(m_1') + R(m_2') + 6 \text{ dB} \quad (3.16)$$

dove con i termini  $R(m_{1/2}')$  si indica ancora una volta la (3.5) applicata al paramento di massa superficiale  $m_{1/2}'$  costituente la parete doppia.

$$b) \quad kd = n\pi$$

allora il potere fonoisolante della partizione alla frequenza  $f$  si calcola ricorrendo ancora una volta alla (3.9).

c) per tutti gli altri casi

il potere fonoisolante della partizione alla frequenza  $f$  si calcola come:

$$R = R(m_1') + R(m_2') \text{ dB} \quad (3.17)$$

dove con i termini  $R(m_{1/2})$  si indica ancora una volta la (3.5) applicata al paramento di massa superficiale  $m_{1/2}'$  costituente la parete doppia.

Comunque, si ribadisce, tutti questi passaggi non verranno visualizzati dal programma Euclide Acustica, dal momento che la loro lettura risulterebbe complessa e non particolarmente utile al fine dell'obiettivo finale della verifica del potere fonoisolante apparente di una partizione interna.

### **3.4 Pareti semplici rivestite**

Se una parete semplice, ma il discorso può essere esteso anche alle composte come vedremo tra breve, ha un potere fonoisolante insoddisfacente è possibile intervenire applicandole uno strato addizionale, tramite un supporto elastico: in tal modo, infatti, si potrà instaurare un sistema risonante a doppia parete tale da produrre un miglioramento del potere fonoisolante complessivo. Tecnicamente si parla di “contropareti”; strutture che si utilizzano generalmente per le costruzioni esistenti, ma tale soluzione può essere tranquillamente applicata anche in nuovi edifici. La condizione essenziale, tuttavia, affinché la controparete risulti effettivamente efficace è che il collegamento tra le due strutture avvenga con il minor numero possibile di punti rigidi.

Premesso dunque che le pareti semplici rivestite, quanto a metodologie di calcolo, si differenziano dalle pareti multi strato, a seguire si andranno ad analizzare le procedure appropriate per tale soluzione.

#### ***3.4.1 Calcolo con i valori indice***

Per il calcolo dell'incremento del valore indice del potere fonoisolante di una parete di qualsivoglia natura dovuto ad uno strato addizionale, la norma UNI 12354-1 presenta una precisa metodologia.

È necessario, innanzi tutto, determinare il valore della frequenza di risonanza del sistema parete-strato addizionale con la formula seguente:

$$f_0 = 160 \sqrt{s' \left( \frac{1}{m_1'} + \frac{1}{m_2'} \right)} \text{ Hz} \quad (3.18)$$

Calcolato il valore di  $f_0$  l'incremento del potere fonoisolante  $\Delta R_w$  deve essere valutato sulla base della seguente tabella:

$F_0$ (Hz)	$\Delta R_w$ (dB)
$\leq 80$	$35-R_w/2$
100	$32-R_w/2$
125	$30-R_w/2$
160	$28-R_w/2$
200	-1
250	-3
315	-5
400	-7
500	-9
630-1600	-10
$>1600$	-5
<b>Nota 1:</b> per frequenze di risonanza minori di 200 Hz il valore minimo di $\Delta R_w$ è pari a 0 dB	
<b>Nota 2:</b> i valori per le frequenze di risonanza intermedie possono essere dedotte dalla interpolazione lineare del logaritmo della frequenza	
<b>Nota 3:</b> $R_w$ designa l'indice di valutazione del potere fonoisolante del solo muro o soffitto, in dB	

### 3.4.2 Calcolo in frequenza

Per il calcolo in frequenza dell'incremento del potere fonoisolante di una parete di qualsivoglia natura dovuto ad uno strato addizionale, la formula ricorrente in letteratura tecnica cui si fa comunemente riferimento e che viene utilizzata anche dal programma Euclide Acustica è la seguente:

$$\Delta R = 30 \log\left(\frac{f}{f_0}\right) dB \quad (3.19)$$

Anche questa formula tiene conto della frequenza di risonanza del sistema parete strato-strato addizionale, poiché rimane di fatto il parametro fondamentale da cui dipende l'incremento del potere fonoisolante.

### 3.5 Pareti composte

Si definisce parete composta una parete all'interno della quale sono presenti elementi quali finestre, porte, cassonetti per avvolgibili, bocchette per l'aria, costituiti da materiali diversi da quello base della partizione e pertanto caratterizzati da un potere fonoisolante  $R$  diverso.

Poiché il calcolo del valore indice del potere fonoisolante apparente dipende dalla geometria e dalla composizione di tutte le pareti che delimitano l'ambiente ricevente e quello sorgente, va da sé che la disomogeneità correlata alla

presenza di tali elementi su una partizione e la conseguente valutazione di come varia il suo potere fonoisolante diventa fondamentale.

Una parete composta, inoltre, può essere qualificata anche da tutte le altre caratteristiche appena viste per le pareti semplici, ovvero può essere mono o multistrato, può essere doppia e rivestita con uno strato addizionale: tutte queste ulteriori caratteristiche vengono trattate esattamente come descritto sopra per le pareti semplici.

Il concetto di base, infatti, per trattare le pareti composte è quello di determinare il potere fonoisolante  $R$  dei vari elementi che compongono la partizione e successivamente combinarli tra loro in base alla quota parte della loro superficie rispetto a quella totale.

### ***3.5.1 Calcolo con i valori indice***

Data una parete di superficie totale  $A_{tot}$  composta da un paramento base avente superficie  $A_{i=1}$ ; un potere fonoisolante  $R_{i=1}$ ; un numero  $n$  di elementi al suo interno caratterizzati ciascuno da un potere fonoisolante  $R_i$  ed aventi una superficie  $A_i$  tale che

$$\sum_{i=1}^n A_i = A_{tot}$$

il valore indice del potere fonoisolante della parete sarà pari a:

$$R_{tot,w} = -10 \log \sum_{i=1}^n \frac{A_i}{A_{tot}} 10^{-0,1R_{w,i}} \text{ dB} \quad (3.20)$$

Pertanto l'analisi di una parete composta implica, quale unico onere ulteriore rispetto a quella delle pareti semplici, il dover definire l'esatta geometria sua e degli elementi che la costituiscono, nonché il calcolo a priori del potere fonoisolante di ciascuno di essi, calcolato a seconda dei casi utilizzando i metodi prima descritti.

### ***3.5.2 Calcolo in frequenza***

Per il calcolo in frequenza del potere fonoisolante di una parete composta il discorso è perfettamente analogo a quello effettuato per il valore indice: unica differenza è che la (3.20) si deve applicare per ogni valore di  $f$  previsto dalla normativa, inserendo al posto di  $R_{w,i}$  i valori  $R_i$  dei differenti elementi alle varie frequenze e, una volta ottenuti i valori di  $R_{tot}$  per ciascuna di esse, si deve applicare quanto previsto dalla UNI EN ISO 717-1 per determinare il valore indice corrispondente.

Per esaurire l'argomento delle pareti composte, appare doveroso sottolineare anche il fatto che il programma Euclide Acustica contiene al suo interno un ricco archivio di elementi vetrati e di porte di tipologia comune nel territorio nazionale, così da facilitare l'utente nella predisposizione delle partizioni composte.

Per ciascun tipo di serramento vengono riportati i seguenti dati:

- a) *massa superficiale*, parametro indispensabile ai fini della valutazione di R, nonché ulteriore dato a completamento della descrizione dell'elemento;
- b) *valore indice del potere fonoisolante*, calcolato secondo le formule semiempiriche riportate nella letteratura tecnica più autorevole, ovvero:

$$R_w = 12 \log(m') + 17 \text{dB} \quad (3.21) \text{ vetri monolitici e vetro camera}$$

$$R_w = 12 \log(m') + 19 \text{dB} \quad (3.22) \text{ vetri stratificati}$$

Tale valore risulta utile nel caso in cui l'utente voglia effettuare il calcolo tramite i valori indice;

- c) *valori del potere fonoisolante alle varie frequenze* previste dalla normativa e relativo valore indice equivalente calcolato secondo quanto previsto dalla UNI EN ISO 717-1, utile nel caso l'utente voglia effettuare il calcolo in frequenza;
- d) *valori indice sperimentali*: poiché molti degli esempi di serramenti proposti sono in parte dedotti da quelli contenuti all'interno della UNI TR 11175, vengono riportati anche gli esiti delle prove effettuate su di essi e comprovati dalla stessa norma, in modo tale che l'utente, volendo, possa effettuare il calcolo tramite valori indice di tipo sperimentale.

### **3.6 Potere fonoisolante apparente di una partizione**

Una volta determinato il potere fonoisolante di tutti le pareti che delimitano l'ambiente ricevente e quello sorgente, oltre che naturalmente quello della partizione che li separa, oggetto diretto della verifica, si può passare al calcolo vero e proprio del potere fonoisolante apparente di quest'ultima.

Il modello semplificato riconosciuto a livello europeo come il più attendibile per la determinazione di R' a partire dalle caratteristiche dei singoli componenti costituenti il sistema è definito all'interno della UNI EN 12354-1 ed include una serie di passaggi che ora si andrà brevemente ad indicare.

La trasmissione del suono da un ambiente all'altro avviene in maniera diretta ed indiretta per via aerea nonché tramite irradiazione da parte degli elementi di separazione strutturali di questi, compresi quelli laterali che delimitano le due stanze; il fattore di trasmissione totale, quindi, può essere suddiviso in diversi fattori:

$$\tau' = \tau_d + \sum_{f=1}^n \tau_f + \sum_{e=1}^m \tau_e + \sum_{s=1}^k \tau_s \quad (3.23)$$

dove i pedici  $d, f, e$  ed  $s$  si riferiscono ai diversi contributi alla trasmissione sonora illustrati nella figura seguente.

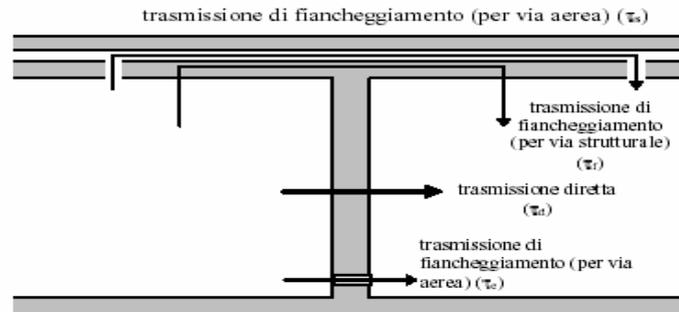


Figura 3.1

In particolare:

- $\tau'$  = fattore di trasmissione totale, definito come il rapporto tra la potenza sonora totale irradiata nell'ambiente ricevente e la potenza sonora incidente sulla parte in comune dell'elemento di separazione;
- $\tau_d$  = fattore di trasmissione definito come rapporto tra la potenza sonora irradiata dalla parte in comune dell'elemento di separazione e la potenza sonora incidente sulla stessa (comprende i percorsi Dd e Fd illustrati nella figura 3.2 riportata qui di seguito);
- $\tau_f$  = fattore di trasmissione definito come rapporto tra la potenza sonora irradiata nell'ambiente ricevente dall'elemento laterale f e la potenza sonora incidente sulla parte in comune dell'elemento di separazione (comprende i percorsi Fd e Df illustrati nella figura 3.2 riportata qui di seguito);
- $\tau_e$  = fattore di trasmissione definito come rapporto tra la potenza sonora irradiata nell'ambiente ricevente da un elemento (quale una bocchetta per l'aria) nella parete di separazione, dovuta alla trasmissione diretta per via aerea del rumore incidente su questo elemento e la potenza sonora incidente sulla parte in comune della partizione che divide i due ambienti;
- $\tau_s$  = fattore di trasmissione definito come rapporto tra la potenza sonora irradiata nell'ambiente ricevente da un sistema s, dovuta alla trasmissione indiretta per via aerea del rumore incidente sulla parte in comune dell'elemento di separazione;
- $n$  = numero degli elementi laterali (solitamente pari a 4, ma potrebbero essere anche maggiori o minori);
- $m$  = numero degli elementi con trasmissione diretta per via aerea;
- $k$  = numero dei sistemi con trasmissione indiretta per via aerea.

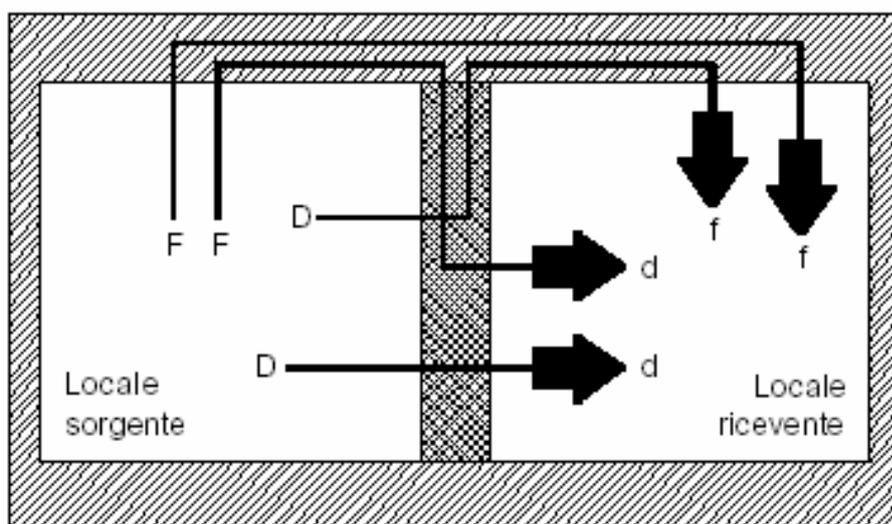


Figura 3.2

Il suono irradiato da una determinata sorgente posta all'interno di un ambiente, in sostanza può giungere al ricevitore tramite diversi percorsi: ciascuno di essi può essere identificato dall'elemento  $i$  su cui incide il suono nell'ambiente sorgente e dall'elemento radiante  $j$  nell'ambiente ricevente. Nella figura 3.2 sopra riportata, sono visualizzati sinteticamente tali percorsi: i prodotti  $i$  nell'ambiente emittente sono definiti con  $F$  per l'elemento laterale e  $D$  per l'elemento di separazione, mentre in quello ricevente i prodotti  $j$  sono definiti con  $f$  per gli elementi laterali, con  $d$  per l'elemento di separazione.

Il valore indice del potere fonoisolante apparente di una partizione, quindi, si calcola una volta noto il potere fonoisolante dei vari elementi costituenti gli ambienti, valutati su ciascun percorso possibile; si andrà ora, quindi, ad esaminare come valutare, a partire dai poteri fonoisolante  $R$  di base delle singole partizioni (orizzontali e verticali), il potere fonoisolante per ciascun percorso effettuato dall'onda sonora.

### 3.6.1. Valore indice del potere fonoisolante per percorso di trasmissione laterale

Il potere fonoisolante per trasmissione laterale si calcola mediante la seguente formula:

$$R_{(i,j)w} = \frac{R_{i,w} + R_{j,w}}{2} + \Delta R_{(i,j)w} + k_{i,j} + 10 \log \frac{S_s}{l_0 l_{i,j}} \text{ dB} \quad (3.24)$$

dove:

- $R_{i,w}$  = valore indice del potere fonoisolante dell'elemento  $i$  appartenente all'ambiente sorgente, calcolato secondo quanto descritto nei paragrafi precedenti;
- $R_{j,w}$  = valore indice del potere fonoisolante dell'elemento  $j$  appartenente all'ambiente ricevente, calcolato secondo quanto descritto nei paragrafi precedenti;
- $\Delta R_{(i,j)w}$  = incremento dell'indice del potere fonoisolante dovuto alla presenza di strati addizionali aggiuntivi o sull'elemento  $i$  o su  $j$ ; nel caso in cui su entrambe le partizioni sia presente uno strato addizionale tale parametro assume il seguente valore:

$$\Delta R_{(i,j)w} = \Delta R_{w,\max} + \frac{\Delta R_{w,\min}}{2} dB \quad (3.25)$$

- $k_{i,j}$  = indice di riduzione delle vibrazioni del giunto posto a separazione degli elementi strutturali  $i$  e  $j$ , di cui si spiegherà qui di seguito la natura e le modalità di calcolo;
- $S_s$  = è la superficie della parete di separazione, misurata in mq;
- $l_0$  = è la lunghezza di riferimento, ovvero 1 ml;
- $l_{i,j}$  = è la lunghezza del giunto posto a separazione degli elementi strutturali  $i$  e  $j$ .

Una considerazione molto importante da premettere, prima di procedere nell'analisi dei nuovi elementi introdotti con la (3.24), riguarda il fatto che giunti a questo punto della procedura di calcolo si ragiona solo in termini di valori indice: pertanto i valori in frequenza utilizzati per definire i parametri devono essere necessariamente ricondotti ad un valore indice equivalente calcolato secondo la UNI EN ISO 717-1.

I dati richiesti nella (3.25) sono tutti deducibili dalla geometria degli ambienti e da calcoli effettuabili secondo quanto precedentemente descritto; l'unica reale novità introdotta per la determinazione del valore indice del potere fonoisolante per percorso di trasmissione laterale riguarda l'indice di riduzione delle vibrazioni dei giunti; questo parametro, tuttavia, è facilmente calcolabile seguendo le indicazioni contenute nella UNI TR 11175 e qui di seguito riportate.

#### Determinazione degli indici di riduzione delle vibrazioni $k_{i,j}$

Questo indice rappresenta, in termini numerici, l'influenza della tipologia di connessione tra elementi strutturali nella trasmissione del suono tra due ambienti; in linea teorica andrebbe calcolata normalizzando la differenza di livello di velocità, mediata direzionalmente attraverso il giunto, alla lunghezza del giunto ed alla lunghezza equivalente di assorbimento acustico, conformemente alla seguente equazione:

$$k_{i,j} = \frac{D_{v,ij} + D_{v,ji}}{2} + 10 \log \frac{l_{i,j}}{\sqrt{a_i a_j}} \text{ dB} \quad (3.26)$$

Tuttavia, dal punto di vista pratico, questa procedura di calcolo non è perseguibile, motivo per cui già la norma UNI EN 12354-1 e comunque anche la UNI TR 11175, sua applicazione diretta, hanno presentato alcune relazioni empiriche relative ai tipi più comuni di giunto, a seconda della massa per unità di area degli elementi connessi agli stessi. Le formule che definiscono i vari  $k_{i,j}$  sono quindi indicate quale funzione della grandezza  $M$  definita come segue:

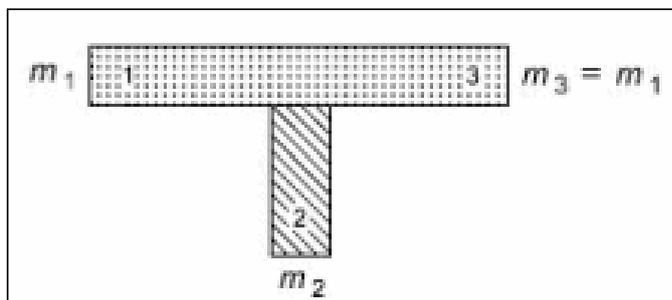
$$M = \log \frac{m'_{\text{perp},i}}{m'_i} \quad (3.27)$$

dove:

$m'_i$  = è la massa per unità di area dell'elemento  $i$  nel percorso di trasmissione  $i,j$ , in Kg/mq;

$m'_{\text{perp},i}$  = è la massa per unità di area dell'altro elemento (perpendicolare) che costituisce il giunto, in Kg/mq.

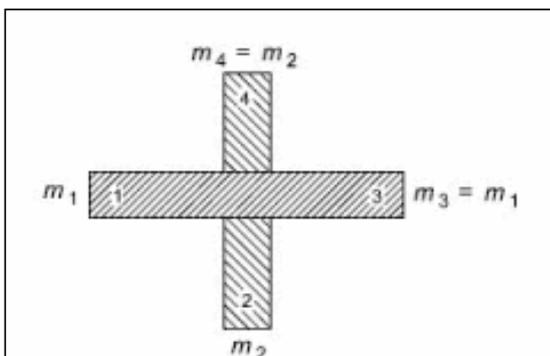
Le relazioni riportate all'interno della normativa per i principali tipi di giunto di utilizzo comune sono le seguenti:



*Giunto rigido a T*

$$K_{1,3} = 5,7 + 14,1 M + 5,7 M^2 \text{ dB}$$

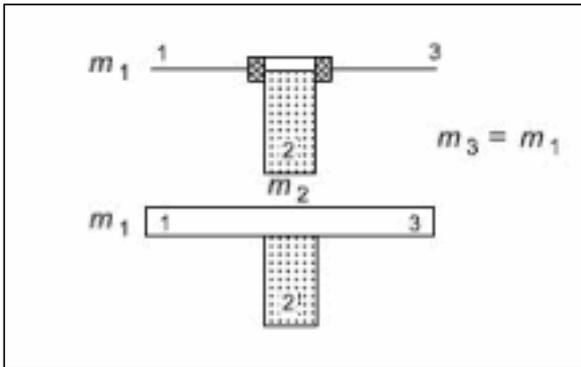
$$K_{1,2} = 5,7 + 5,7 M^2 = K_{2,3} \text{ dB}$$



*Giunto rigido a croce*

$$K_{1,3} = 8,7 + 17,1 M + 5,7 M^2 \text{ dB}$$

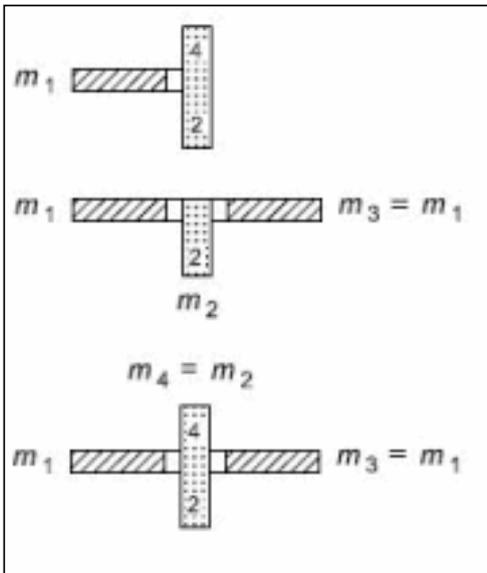
$$K_{1,2} = 8,7 + 5,7 M^2 = K_{2,3} \text{ dB}$$



*Struttura omogenea e facciata leggera*

$$K_{1,3} = 5 + 10 M \text{ (minimo 5 dB)}$$

$$K_{1,2} = 10 + 10 |M| = K_{2,3} \text{ dB}$$

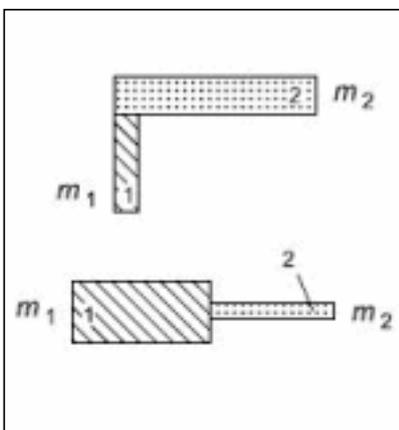


*Strutture omogenee con strato flessibile*

$$K_{1,3} = 5,7 + 14,1 M + 5,7 M^2 + 12 \text{ dB}$$

$$K_{1,2} = 5,7 + 5,7 M^2 + 6 \text{ dB}$$

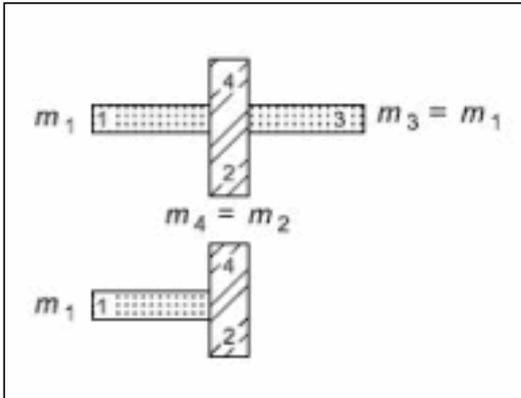
$$K_{2,4} = 3,7 + 14,1 M + 5,7 M^2 \text{ dB}$$



*Strutture omogenee con angolo o cambio di spessore*

$$K_{1,2} = 15 |M| - 3 = K_{2,1} \text{ dB (angolo)}$$

$$K_{1,2} = 5 M^2 - 5 = K_{2,1} \text{ dB (cambio spessore)}$$

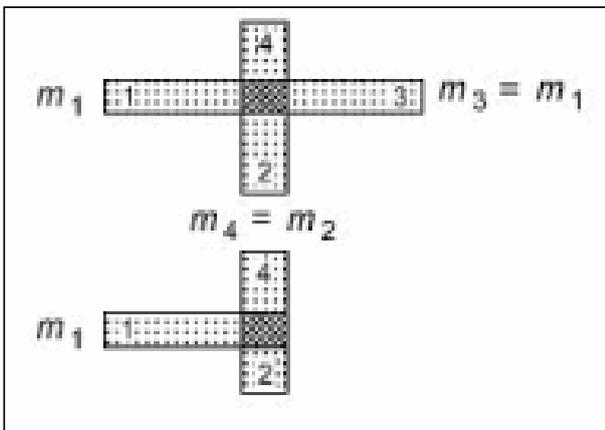


*Doppia parete leggera e struttura omogenea*

$K_{1,3} = 10+20 M$  (minimo 10 dB) – doppia parete

$K_{2,4} = 3+14,1 M+5,7 M^2$  dB ( $m'_1/m'_2 > 3$ )

$K_{1,2} = 10+10 |M| = K_{2,3}$  dB - omogenea angolo



*Pareti doppie leggere accoppiate*

$K_{1,3} = 10+20 M$  dB

$K_{1,2} = 10+10 |M| = K_{2,3}$  dB

### 3.6.2 Potere fonoisolante apparente

Una volta determinati il valore indice del potere fonoisolante delle singole pareti costituenti gli ambienti riceventi e sorgente e il valore indice del potere fonoisolante per tutti i percorsi di trasmissione laterale possibili (in genere 12, l'esempio riportato in appendice chiarirà ulteriormente tale concetto) si può finalmente stimare il valore indice del potere fonoisolante apparente della partizione oggetto di verifica tramite la seguente formula:

$$R'_w = -10 \log \left[ 10^{-\frac{RD_{d,w}}{10}} + \sum_{F=f=1}^n 10^{-\frac{RF_{f,w}}{10}} + \sum_{f=1}^n 10^{-\frac{Rdf,w}{10}} + \sum_{F=1}^n 10^{-\frac{RFd,w}{10}} \right] \text{ dB} \quad (3.28)$$

dove:

- $R_{Dd,w}$  = è l'indice di valutazione del potere fonoisolante per la trasmissione diretta in decibel;
- $R_{Ff,w}$  = è l'indice del potere fonoisolante laterale per il percorso di trasmissione  $Ff$  in decibel;
- $R_{Df,w}$  = è l'indice del potere fonoisolante laterale per il percorso di trasmissione  $Df$  in decibel;

$R_{Fd,w}$  = è l'indice del potere fonoisolante laterale per il percorso di trasmissione Fd in decibel;

$n$  = è il numero degli elementi laterali in un ambiente;

Seppur a prima vista possa apparire complessa, in realtà la (3.28) non è altro che una somma di tutti i contributi a livello di isolamento acustico che le pareti, sia quella oggetto di verifica, sia le altre che delimitano gli ambienti sorgente e ricevente, forniscono. L'esempio riportato in appendice chiarirà meglio cosa significhi, in pratica, valutare tutti i percorsi di trasmissione delle onde sonore e come questi vadano computati in termini di potere fonoisolante.

Il risultato che emerge dalla (3.28) è il numero, espresso in dB, che va confrontato con il limite imposto dalla norma, ovvero:

<b>Categoria</b>	<b><math>R'_w</math></b>
D Edifici adibiti a ospedali, cliniche, case di cura e assimilabili	55
A Edifici adibiti a residenza o assimilabili	50
C Edifici adibiti ad alberghi, pensioni, ed attività assimilabili	
E Edifici adibiti ad attività scolastiche a tutti i livelli e assimilabili	50
B Edifici adibiti ad uffici e assimilabili	50
F Edifici adibiti ad attività ricreative o di culto o assimilabili	
G Edifici adibiti ad attività commerciali o assimilabili	

## Capitolo 4. Indice di valutazione dell'isolamento acustico di facciata normalizzato rispetto al tempo di riverberazione $D_{2m,nT}$

### 4.1 Considerazioni generali

L'isolamento acustico di una facciata dipende dalle proprietà di tutti gli elementi che la compongono quali finestre, portefinestre, pareti vetrate, cassonetti degli avvolgibili, prese d'aria, oltre che, ovviamente, dai materiali di cui la parete stessa è costituita: il suo comportamento nei confronti dei rumori aerei sarà perciò simile a quello di una comune parete composta. Nel caso di tali pareti intervengono però altri fattori dai quali non si può prescindere, che riguardano la forma esterna della facciata e la dimensione interna dei locali.

Il D.P.C.M. 5/12/1997 stabilisce che la misura in opera di tale grandezza venga effettuata a partire dalle misure dei livelli di pressione sonora: in particolare quello esterno a 2m dalla facciata, prodotto dal rumore da traffico se prevalente o da altoparlante con angolo di incidenza sulla facciata pari a  $45^\circ$  ( $L_{1,2m}$ ), e quello interno ( $L_2$ ), dato dalla seguente formula:

$$L_2 = 10 \log \left( \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n 10^{\frac{L_i}{10}} \right) \text{ (dB)} \quad (4.1)$$

in cui  $L_i$  sono gli  $n$  livelli sonori misurati per ciascuna banda di terzi d'ottava (con  $n$  pari al numero intero immediatamente superiore a un decimo del volume dell'ambiente ricevente e comunque non minore di cinque), applicando successivamente la seguente relazione:

$$D_{2m,nT} = D_{2m} + 10 \log \frac{T}{T_0} \text{ (dB)} \quad (4.2)$$

in cui:

$D_{2m} = L_{1,2m} - L_2$  (dB) è la differenza tra i livelli sonori precedentemente definiti;

$T$  (s) è il tempo di riverberazione dell'ambiente ricevente;

$T_0$  (s) è il tempo di riverberazione di riferimento (0.5s per le abitazioni).

## 4.2 Calcolo in frequenza

In fase di progettazione il calcolo dell'isolamento acustico di facciata si può effettuare applicando la relazione fornita dalla UNI 12354-3, che lo stesso programma *Euclide Acustica* utilizza:

$$D_{2m,nT} = R' + \Delta L_{fs} + 10 \log \frac{V}{6T_0 S} \text{ (dB)} \quad (4.3)$$

in cui:

$R'$  (Db) è il potere fonoisolante apparente di facciata;

$\Delta L_{fs}$  (Db) è la differenza del livello di pressione sonora per la forma della facciata;

$V$  (m<sup>3</sup>) è il volume dell'ambiente interno ricevente;

$T_0$  è il tempo di riverberazione di riferimento (0.5s per le abitazioni);

$S$  (m<sup>2</sup>) è l'area totale della facciata (somma delle aree degli elementi che la costituiscono).

Il *potere fonoisolante apparente di facciata*  $R'$  si calcola mettendo in conto le proprietà di tutti gli elementi che la compongono:

$$R' = -10 \log \left( \sum_{i=1}^n \frac{S_i}{S} 10^{\frac{-R_i}{10}} + \frac{A_0}{S} \sum_{i=1}^m 10^{\frac{-D_{m,i}}{10}} \right) - K \text{ (dB)} \quad (4.4)$$

in cui:

$S_i$  (m<sup>2</sup>) sono le superfici degli  $n$  elementi  $i$  che compongono la facciata;

$S$  (m<sup>2</sup>) è la superficie totale della facciata;

$R_i$  (dB) sono i poteri fonoisolanti degli  $n$  elementi  $i$ ;

$A_0$  (m<sup>2</sup>) è l'area equivalente di assorbimento acustico di riferimento (pari a 10 m<sup>2</sup>);

$D_{mi}$  (dB) sono gli isolamenti acustici normalizzati degli  $m$  piccoli elementi  $i$  di facciata (per "piccoli elementi" si intendono quelli minori di 1m<sup>2</sup> che non siano finestre, come ad esempio le prese d'aria) e si calcolano utilizzando la seguente formula:

$$D_{mi} = -10 \log \frac{S_i}{10} \text{ (dB)} \quad (4.5)$$

$K$  è un coefficiente che tiene conto della trasmissione laterale: la norma in esame prevede di assumerlo con valore pari a zero per elementi di facciata non connessi e valore pari a due per elementi pesanti con giunti rigidi; nel caso dell'isolamento di facciata la trasmissione laterale è, infatti, quasi sempre trascurabile, a differenza di quanto accade per la trasmissione tra ambienti interni nei quali, come si è già esaminato, si rende necessario considerare tutti i possibili percorsi del suono. È questo il motivo per cui la norma ha stabilito di prevedere, nel caso di specie, semplicemente una riduzione forfetaria di due Decibel in tutti i casi di giunto rigido tra pareti pesanti.

Come si è già sottolineato, molta influenza sulle prestazioni acustiche avranno proprio quegli elementi che costituiscono i punti deboli della parete di facciata in quanto possiedono un potere fonoisolante limitato o costituiscono ponti acustici: una certa attenzione andrà, perciò, posta soprattutto nello studio delle vetrate e delle finestre.

Nella pratica comune si è soliti trascurare la presenza del telaio e considerare le sole proprietà della vetrata: è infatti sperimentalmente provato che le caratteristiche del telaio risultano pressoché ininfluenti nel caso in cui la sua massa non sia inferiore al 70% di quella della vetrata e la sua superficie non sia superiore al 25% della superficie complessiva del serramento. In caso contrario sarebbe invece necessario considerare un ulteriore fattore: la tenuta d'aria del serramento, ipotesi che renderebbe più complessa la valutazione in questione. Il calcolo del potere fonoisolante si effettua, perciò, considerando la massa superficiale totale del vetro: sotto un profilo acustico, infatti, la presenza di eventuali intercapedini non apporta alcun vantaggio, seppur possa, comunque, generare effetti di risonanza con conseguenti cadute del potere fonoisolante.

La *differenza del livello di pressione sonora per la forma della facciata*  $\Delta L_{fs}$  dipende dalla presenza o meno di balconi o aggetti che possano generare effetti positivi di schermatura sulle onde sonore incidenti o effetti negativi a causa di riflessioni delle onde stesse tali da creare un campo riverberante.

La norma cui si fa riferimento propone una tabella per la determinazione di tale grandezza in dipendenza della forma di una sezione verticale della facciata passante per il balcone (o aggetto, o simile), dell'altezza dell'orizzonte visivo e dell'assorbimento acustico ponderato  $\alpha_w$ .

L'altezza dell'orizzonte visivo è rappresentata dall'altezza, rispetto al pavimento dell'ambiente in esame, della proiezione della linea di veduta dell'onda sonora sul piano della facciata, come si può vedere in Fig. 4.1.

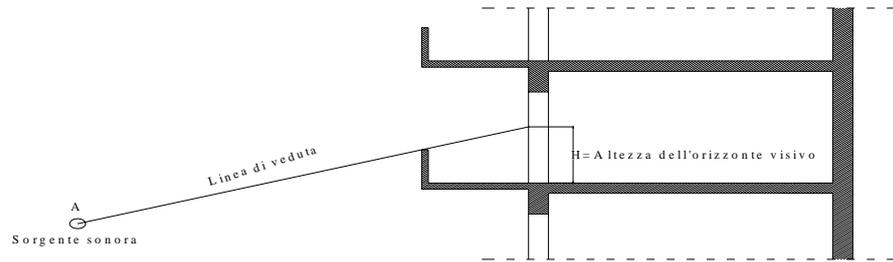


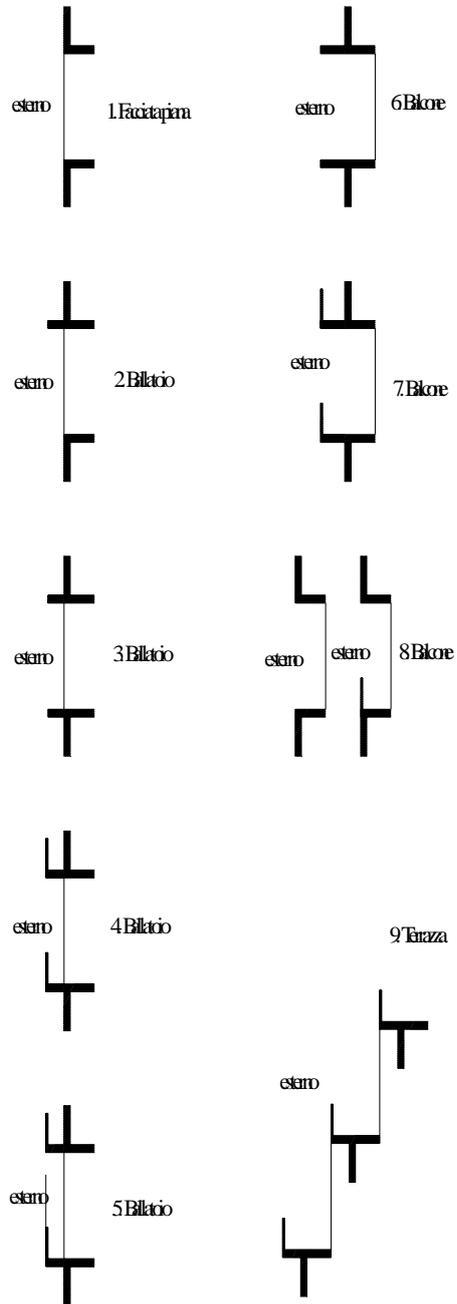
Fig.4.1

L'assorbimento acustico ponderato è assunto pari a 0.3 per intonaco normale, pari a 0.6 per intonaco normalmente fonoassorbente, maggiore di 0.9 per intonaco molto fonoassorbente.

Tipo di facciata		$\alpha_w$	H<1.5m	1.5m<H<2.5m	H>2.5m
1		non si applica	0	0	0
2		0.3	-1	non si applica	non si applica
		0.6	-1		
		0.9	0		
3		0.3	-1	-1	1
		0.6	-1	0	1
		0.9	0	2	2
4		0.3	0	0	2
		0.6	0	1	2
		0.9	1	3	3
5		0.3	non si applica	non si applica	3
		0.6			4
		0.9			6
6		0.3	-1	-1	1
		0.6	-1	1	2
		0.9	0	3	3
7		0.3	0	0	2
		0.6	0	2	3
		0.9	1	4	4
8		0.3	1	1	1
		0.6	1	1	1
		0.9	2	2	2
9	schermature aperte	0.3	2	3	4
		0.6	1	4	4
		0.9	1	5	5
	schermature chiuse	0.3	3	5	6
		0.6	3	6	6
		0.9	3	7	7

Tab.4.1:  $\Delta L_{fs}(dB)$  per diverse forme di facciata

Forme tipiche di facciata:



Una volta eseguiti tutti i calcoli, sostituendo la (4.4) e la (4.5) nella (4.3) si determinano perciò le caratteristiche di isolamento di una facciata alle varie frequenze.

Per ottenere il valore indice dell'isolamento acustico di facciata normalizzato rispetto al tempo di riverberazione  $D_{2m,nT,w}$ , necessario per poter eseguire le verifiche stabilite dal D.P.C.M. 5/12/1997, occorre, a questo punto, costruire la curva dei valori in frequenza (curva misurata) dei  $D_{2m,nT}$  calcolati e, utilizzando la curva di riferimento 1 (UNI EN ISO 717-1) di cui si è già precedentemente trattato e traslandola secondo la metodologia di norma, leggere il valore di  $D_{2m,nT}$  a 500 Hz su tale curva, valore che rappresenta proprio l'indice di valutazione di tale grandezza.

### 4.3 Calcolo diretto dell' indice di valutazione

Nell'ipotesi in cui si voglia valutare in fase di progetto l'indice di valutazione dell'isolamento acustico di facciata senza dover effettuare l'analisi in frequenza, è possibile applicare le stesse formule precedentemente utilizzate, sostituendo (nelle (4.3) e (4.4))  $R_w'$  a  $R'$  e  $R_{iw}$  a  $R_i$ , cioè sostituendo ai valori in frequenza i rispettivi valori indice:

$$D_{2m,nT} = R_w' + \Delta L_{fs} + 10 \log \frac{V}{6T_0S} \text{ (dB)} \quad (4.6)$$

$$R_w' = -10 \log \left( \sum_{i=1}^n \frac{S_i}{S} 10^{\frac{-R_{iw}}{10}} + \frac{A_0}{S} \sum_{i=1}^m 10^{\frac{-D_{m,i}}{10}} \right) - K \text{ (dB)} \quad (4.7)$$

Per quanto poi concerne gli infissi, nella letteratura di settore si possono reperire numerose formule sperimentali relative all'indice di valutazione del potere fonoisolante di vetri semplici monolitici, di vetro-camera e di vetri stratificati, formule dipendenti dalla massa superficiale dei vetri stessi: il programma *Euclide Acustica* ne utilizza due.

In particolare:  
per vetri monolitici e vetro-camera:

$$R_w = 12 \log m' + 17 \text{ (dB)} \quad (4.8)$$

per vetri stratificati:

$$R_w = 12 \log m' + 19 \text{ (dB)} \quad (4.9)$$

La formula (4.8) è utilizzata indifferentemente per vetri monolitici e per vetro-camera per lo stesso motivo già ricordato a proposito del calcolo in frequenza: la presenza dell'intercapedine non costituisce mai un miglioramento delle prestazioni acustiche di una vetrata.

La formula (4.9) prevede, per vetri stratificati, un incremento forfetario del potere fonoisolante di 2dB rispetto alla formula relativa ai vetri monolitici e al vetro - camera.

A proposito di infissi, la nuova normativa UNI TR 11175/05 propone inoltre una tabella con i valori sperimentali degli indici di valutazione del potere fonoisolante di alcune tipologie di serramenti ed una formula comprendente una serie di coefficienti k correttivi dell'indice tabellato che tengono conto delle caratteristiche geometriche e costruttive dell'infisso in esame.

Grazie all'inserimento di tale procedura, il programma *Euclide Acustica* permette, in mancanza di dati più specifici relativi ai vari casi progettuali, un approccio che preveda l'utilizzo di dati sperimentali opportunamente corretti e adattabili ai singoli casi oggetto di studio.

#### 4.4 Verifica di norma

Una volta calcolato l'indice di valutazione dell'isolamento acustico di facciata normalizzato rispetto al tempo di riverberazione  $D_{2m,nT,w}$  è necessario confrontare il suo valore con quello massimo stabilito dal D.P.C.M. 5/12/1997 in funzione della destinazione d'uso dei locali in oggetto.

Nella tabella seguente sono riportati i valori di riferimento così come indicati sul decreto stesso (Allegato A) per le varie categorie di ambienti abitativi:

<b>Categoria</b>	<b><math>D_{2m,nT,w}</math></b>
D Edifici adibiti a ospedali, cliniche, case di cura e assimilabili	45
A Edifici adibiti a residenza o assimilabili	40
C Edifici adibiti ad alberghi, pensioni, ed attività assimilabili	
E Edifici adibiti ad attività scolastiche a tutti i livelli e assimilabili	48
B Edifici adibiti ad uffici e assimilabili	42
F Edifici adibiti ad attività ricreative o di culto o assimilabili	
G Edifici adibiti ad attività commerciali o assimilabili	

Tab.4.1: Limiti di norma (D.P.C.M.5/12/1997)

## Capitolo 5. Indice di valutazione del livello di rumore da calpestio normalizzato ( $L_n'$ )

### 5.1 Considerazioni generali

Come si è già in precedenza opportunamente analizzato, il parametro oggetto di questo capitolo è riferito ai rumori impattivi, cioè quei rumori generati dall'urto fra due elementi rigidi che si propagano nel mezzo con un meccanismo fisico del tutto diverso da quelli che si trasmettono per via aerea, come nel caso dei due parametri di cui già si è parlato (potere fonoisolante  $R'$  e isolamento acustico di facciata  $D_{2m,nt}$ ).

I solai, pertanto, che solitamente non presentano problemi dal punto di vista del potere fonoisolante, sono le strutture più soggette al rumore impattivo, proprio a causa del calpestio.

Le norme UNI EN 12354-2 e UNI/TR 11175 definiscono tale grandezza come:

$$L_n' = L_i + 10 \log\left(\frac{A}{A_0}\right) \text{ (dB)} \quad (5.1)$$

in cui:

$L_i$  (dB) è il livello di pressione sonora di calpestio dell'ambiente ricevente determinato quando il solaio sovrastante è eccitato da un generatore di calpestio normalizzato (costituito da cinque martelli in linea distanziati di 10cm uno dall'altro ciascuno di massa pari a 0.5kg e diametro pari a 3cm lasciati cadere liberamente uno alla volta da un'altezza di 4cm, con un intervallo temporale tra due successivi impatti di un decimo di secondo);

$A$  ( $m^2$ ) è l'area di assorbimento equivalente dell'ambiente ricevente:

$$A = \frac{0.16V}{T} \text{ (m}^2\text{)} \quad (5.1.1)$$

in cui  $V$  è il volume dell'ambiente ricevente e  $T$  il suo tempo di riverberazione;

$A_0$  ( $m^2$ ) è l'area di assorbimento equivalente di riferimento (assunto pari a  $10 m^2$  per le abitazioni).

L'apice dell'indice  $L_n'$  sta a evidenziare che, anche in questo caso, è necessario mettere in conto le inevitabili trasmissioni del suono laterali che si hanno attraverso le giunzioni tra pareti e tra pareti e solai.

## 5.2 Calcolo in frequenza

In fase di progettazione il calcolo dell'isolamento acustico di facciata si può effettuare applicando la relazione fornita dalla UNI 12354-2, che lo stesso programma *Euclide Acustica* utilizza:

$$L_n' = L_n - \Delta L + K \text{ (dB)} \quad (5.2)$$

in cui:

$L_n$  (dB) è il livello di pressione sonora di calpestio normalizzato relativo al solaio privo di rivestimento;

$\Delta L$  (dB) è l'attenuazione del livello di pressione sonora di calpestio (cioè l'incremento dell'isolamento dal rumore da calpestio) dovuto alla presenza di appositi strati aggiuntivi sul lato disturbante (pavimento galleggiante) o su quello ricevente (controsoffitto);

$K$  (dB) è il termine di correzione per la trasmissione dei rumori da calpestio attraverso le pareti laterali.

Il *livello di pressione sonora di calpestio normalizzato*  $L_n$  si calcola, in funzione della frequenza, utilizzando la seguente relazione:

$$L_n = 38 + 30 \log f - R \quad (5.3)$$

in cui:

$f$  (Hz) è la frequenza (frequenza centrale della banda di terzi d'ottava);

$R$  (dB) è il potere fonoisolante del solaio in esame calcolato come già visto (cfr. supra: capitolo 3).

L'*incremento dell'isolamento dal rumore da calpestio*  $\Delta L$  dipende dalla presenza di appositi strati aggiuntivi: per migliorare le prestazioni acustiche di un solaio nei confronti dei rumori impattivi, le uniche soluzioni, come si può evincere dalla stessa formula (5.2), sembrano essere infatti le seguenti:

- ridurre il livello di pressione da calpestio normalizzato  $L_n'$ : ciò significherebbe aumentare il potere fonoisolante del divisorio (come si può vedere osservando la (5.3)). Questa strada però condurrebbe a eccessivi e inutili aumenti di massa dato che, come già ricordato, i solai difficilmente presentano problemi quanto alla trasmissione dei rumori aerei, essendo di per sé strutture abbastanza massive;
- ridurre la trasmissione laterale: ciò si potrebbe realizzare, come si vedrà in seguito, diminuendo le masse del solaio o degli elementi ad esso connessi

- ed in particolare diminuendo il rapporto tra la massa superficiale del solaio e la media delle masse superficiali delle pareti sulle quali esso stesso insiste;
- aumentare l'isolamento dai rumori da calpestio  $\Delta L$ : ciò si realizza, nella pratica, in due modi. Il primo consiste nella messa in opera di controsoffitto nell'ambiente disturbato: questo metodo riduce gli effetti dei rumori impattivi sull'ambiente ricevente ma non elimina i problemi relativi alla diffusione dei rumori attraverso le strutture. Il secondo consiste invece nell'apprestare il cosiddetto "pavimento galleggiante" costituito da un massetto completamente sconnesso dal solaio sottostante (e dalle pareti laterali), realizzato per mezzo dell'interposizione di uno strato di materiale elastico pensato appositamente per attenuare la trasmissione delle vibrazioni generate dall'impatto (che, si sottolinea, sono la causa principale della propagazione dei rumori da calpestio).

In fase di progettazione gli effetti generati da tale accorgimento sono desumibili dalla seguente formula:

$$\Delta L = A \log \frac{f}{f_0} \text{ (dB)} \quad (5.4)$$

in cui:

$A$  è un coefficiente che tiene conto del particolare tipo di massetto:

- pavimento galleggiante con massetto in calcestruzzo, cemento sabbioso o solfato di calcio:  $A=30$ ;
  - pavimento galleggiante con massetto in asfalto o posato a secco:  $A=40$ ;
- $f$  (dB) è la frequenza centrale della banda di terzi d'ottava;  
 $f_0$  (dB) è la frequenza di risonanza del sistema, data da:

$$f_0 = 160 \sqrt{\frac{s'}{m'}} \text{ (Hz)} \quad (5.5)$$

in cui:

$s'$  (MN/m<sup>3</sup>) è la rigidità dinamica per unità di area dello strato resiliente;  
 $m'$  (Kg/m<sup>2</sup>) è la massa superficiale del pavimento galleggiante.

Il termine di correzione per la trasmissione laterale  $K$  si ottiene partendo dalla massa superficiale del solaio in esame e dalla media delle masse superficiali delle pareti ad esso collegate, applicando i valori desumibili dalla seguente tabella:

Massa superficiale del solaio	Massa superficiale media degli elementi connessi al solaio, non rivestiti								
	100	150	200	250	300	350	400	450	500
100	1	0	0	0	0	0	0	0	0
150	1	1	0	0	0	0	0	0	0
200	2	1	1	0	0	0	0	0	0
250	2	1	1	1	0	0	0	0	0
300	3	2	1	1	1	0	0	0	0
350	3	2	1	1	1	1	0	0	0
400	4	2	2	1	1	1	1	0	0
450	4	3	2	2	1	1	1	1	1
500	4	4	2	2	1	1	1	1	1
600	5	5	3	2	2	1	1	1	1
700	5	4	3	3	2	2	1	1	1
800	6	4	4	3	2	2	2	1	1
900	6	5	4	3	3	2	2	2	2

Tab.5.1: correzione per la trasmissione laterale K

Le pareti rivestite con frequenza di risonanza minore di 125Hz non sono considerate nel calcolo della media delle masse delle pareti collegate al solaio in esame.

Una volta eseguiti tutti i calcoli, sostituendo la (5.3) e la (5.4) nella (5.2) unitamente al valore di K desunto dalla Tab.5.1 si determinano perciò le caratteristiche di isolamento di un solaio ai rumori da calpestio, alle varie frequenze.

Per ottenere il valore indice del livello del rumore da calpestio normalizzato  $L_{n,w}'$ , necessario per poter eseguire le verifiche stabilite dal D.P.C.M. 5/12/1997, occorre a questo punto costruire la curva dei valori in frequenza (curva misurata) dei  $L_n'$  calcolati e, utilizzando la curva di riferimento 2 (UNI EN ISO 717-2) di cui si è già precedentemente trattato e traslandola secondo la metodologia di norma, leggere il valore di  $L_n'$  a 500 Hz su tale curva che, come già visto, rappresenta proprio l'indice di valutazione di tale grandezza.

### 5.3 Calcolo diretto dell' indice di valutazione

Qualora si intenda verificare in fase di progetto l'indice di valutazione del livello di rumore da calpestio normalizzato senza dover effettuare l'analisi in frequenza, è possibile applicare la stessa formula (5.2) precedentemente vista, sostituendo  $L_{n,w}'$  a  $L_n'$ ,  $L_{n,w,eq}$  a  $L_n$  e  $\Delta L_w$  a  $\Delta L$  cioè sostituendo ai valori in frequenza i rispettivi valori indice:

$$L_{n,w}' = L_{n,w,eq} - \Delta L_w + K \text{ (dB)} \quad (5.6)$$

in cui:

$L_{n,w,eq}$  (dB) (indice di valutazione del livello equivalente di pressione sonora di calpestio normalizzato) si ottiene applicando la relazione semiempirica:

$$L_{n,w,eq} = 164 - 35 \log(m') \text{ (dB)} \quad (5.7)$$

dipendente dalla sola massa superficiale  $m'$  del solaio (relazione che si ritiene attendibile per valori di tale massa compresi tra 100 e 600 kg/m<sup>2</sup>);

$\Delta L_w$  (dB) (indice di valutazione dell'attenuazione del livello di pressione sonora di calpestio) è deducibile dalle seguenti relazioni:

- pavimento galleggiante con massetto in calcestruzzo, cemento sabbioso o solfato di calcio:

$$\Delta L_w = 30 \log\left(\frac{f}{f_0}\right) + 3 \text{ (dB)} \quad (5.8);$$

- pavimento galleggiante con massetto in asfalto o posato a secco:

$$\Delta L_w = 40 \log\left(\frac{f}{f_0}\right) - 3 \text{ (dB)} \quad (5.9);$$

in cui:

$f_0$ (Hz) è ancora quello determinato dalla (5.5);

$f=500$ Hz;

$K$  è la correzione per la trasmissione laterale di cui già si è trattato, desumibile dalla Tab.5.1.

#### 5.4 Verifica di norma

Calcolato l'indice di valutazione del livello di rumore da calpestio normalizzato  $L_{n,w}'$  è necessario confrontare il suo valore con quello massimo stabilito dal D.P.C.M. 5/12/1997 per la destinazione d'uso dei locali in oggetto.

Nella tabella seguente sono riportati i valori di riferimento così come indicati sul decreto stesso (Allegato A) per le varie categorie di ambienti abitativi:

<b>Categoria</b>	<b>L<sub>n,w</sub>'</b>
D Edifici adibiti a ospedali, cliniche, case di cura e assimilabili	58
A Edifici adibiti a residenza o assimilabili	63
C Edifici adibiti ad alberghi, pensioni, ed attività assimilabili	
E Edifici adibiti ad attività scolastiche a tutti i livelli e assimilabili	58
B Edifici adibiti ad uffici e assimilabili	55
F Edifici adibiti ad attività ricreative o di culto o assimilabili	
G Edifici adibiti ad attività commerciali o assimilabili	

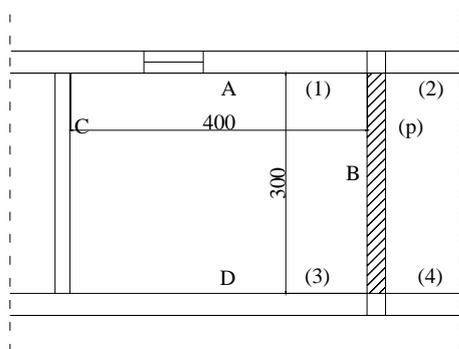
*Tab.5.2: Limiti di norma (D.P.C.M.5/12/1997)*

## Appendice A: Esempio di calcolo

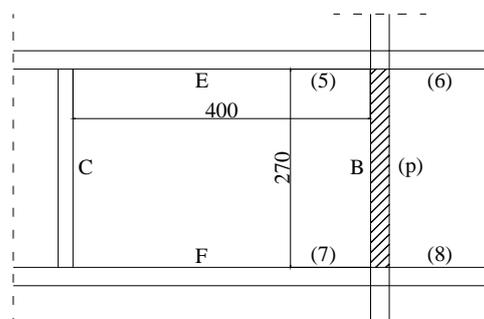
### Presentazione del problema

A titolo di esempio pratico si riportano qui di seguito il calcolo e la verifica degli indici di valutazione del potere fonoisolante, dell'isolamento acustico di facciata e del livello di rumore da calpestio per un ambiente abitativo, così come lo stesso programma *Euclide Acustica* li esegue, secondo le procedure illustrate nella presente pubblicazione, descrivendo nel dettaglio il solo calcolo diretto degli indici di valutazione.

I dati geometrici dei locali in esame sono desumibili dai disegni qui di seguito riportati:



PIANTA



SEZIONE

### ***Dati:***

*Parete A:* parete di facciata costituita da blocchi semipieni in laterizio di spessore pari a 30cm intonacata su entrambi i lati con intonaco di malta cementizia di spessore pari a 1.5cm.

$$m' = 320 \text{ kg/cm}^2$$

$$\text{Superficie della parete: } S = 10.8 \text{ m}^2$$

$$\text{Potere fonoisolante della parete (3.2): } R_W = 37,5 \log(m') - 42 \text{ dB}$$

$$R_W = 51.94 \text{ dB}$$

*Parete B:* parete di separazione tra i due ambienti in esame costituita da doppio tavolato di mattoni semipieni in laterizio di spessore pari a 12cm ciascuno,

separati da intercapedine d'aria di 11cm, intonacata su entrambi i lati con intonaco di malta cementizia di spessore pari a 1.5cm.

$$m' = 422 \text{ kg/cm}^2$$

$$\text{Superficie della parete: } S = 8.1 \text{ m}^2$$

$$\begin{aligned} \text{Potere fonoisolante della parete (3.10): } R_w &= 20 \log(m_{tot}') + 20 \log(d) - 10 \\ R_w &= 63.33 \text{ dB} \end{aligned}$$

*Parete C:* parete interna di separazione tra due ambienti costituita da mattoni semipieni di spessore pari a 12cm e intonacata su entrambi i lati con intonaco di spessore pari a 1.5cm.

$$m' = 250 \text{ kg/cm}^2$$

$$\text{Superficie della parete: } S = 8.1 \text{ m}^2$$

$$\begin{aligned} \text{Potere fonoisolante della parete (3.2): } R_w &= 37,5 \log(m') - 42 \text{ dB} \\ R_w &= 47.92 \text{ dB} \end{aligned}$$

*Parete D:* parete di facciata costituita da blocchi semipieni in laterizio di spessore pari a 30cm intonacata su entrambi i lati con intonaco di malta cementizia di spessore pari a 1.5cm.

$$m' = 320 \text{ kg/cm}^2$$

$$\text{Superficie della parete: } S = 10.8 \text{ m}^2$$

$$\begin{aligned} \text{Potere fonoisolante della parete (3.2): } R_w &= 37,5 \log(m') - 42 \text{ dB} \\ R_w &= 51.94 \text{ dB} \end{aligned}$$

*Solaio E:* solaio tipo predalles di spessore pari a 24cm

$$m' = 355 \text{ kg/cm}^2$$

$$\text{Superficie del solaio: } S = 12.0 \text{ m}^2$$

$$\begin{aligned} \text{Potere fonoisolante del solaio (3.2): } R_w &= 37,5 \log(m') - 42 \text{ dB} \\ R_w &= 53.63 \text{ dB} \end{aligned}$$

*Solaio F:* solaio tipo predalles di spessore pari a 24cm

$$m' = 355 \text{ kg/cm}^2$$

Superficie del solaio:  $S=12.0m^2$

$$\text{Potere fonoisolante del solaio (3.2): } R_w = 37,5 \log(m') - 42dB$$
$$R_w=53.63dB$$

I solai D e F sono sormontati da pavimento galleggiante costituito da massetto in cemento armato di spessore pari a 4cm realizzato su strato di fibre elastiche sintetiche di spessore pari a 8mm;

$$m'=100kg/cm^2$$

$$\text{Rigidità dinamica: } s=21MN/m^3$$

Le pareti esterne e i solai che proseguono nel locale adiacente non subiscono modifiche.

I giunti tra le partizioni sono tutti di tipo rigido (a T o a croce a seconda dei casi come da disegno).

## 1. Calcolo dell'indice di valutazione del potere fonoisolante

Applicando la (3.2) e la (3.10) come visto, si ottengono i valori degli indici di valutazione del potere fonoisolante delle singole pareti: i risultati sono riassunti nella seguente tabella:

<b>PARTIZIONE</b>	<b><math>m'(kg/cm^2)</math></b>	<b><math>R_{wi}</math></b>
A	320	51.94
B	422	63.33
C	250	47.92
D	320	51.94
E	355	53.63
F	355	53.63

L'incremento apportato al potere fonoisolante dal pavimento galleggiante si può ora calcolare a partire dalla frequenza di risonanza del sistema solaio+pavimento galleggiante:

$$f_0 = 160 \sqrt{s' \left( \frac{1}{m_1'} + \frac{1}{m_2'} \right)} Hz = 83.01 Hz \quad (3.18)$$

Dalla tabella della norma UNI 12354-1 si ottiene:  $32-R_w/2=5.185\text{dB}$  (si è trascurata l'interpolazione che porta differenze comunque piccole).

A questo punto, per poter calcolare l'indice di valutazione del potere fonoisolante apparente tra i due locali adiacenti è necessario valutare tutti i possibili percorsi di trasmissione laterale per ricavare l'indice di riduzione delle vibrazioni  $K$  relativo a tali percorsi.

Ricordando che:

$$M = \log \frac{m'_{\text{perp},i}}{m'_i} \quad (3.27)$$

in cui:

$m'_i$  = è la massa per unità di area dell'elemento  $i$  nel percorso di trasmissione  $i,j$ , in  $\text{Kg/mq}$ ;

$m'_{\text{perp},i}$  = è la massa per unità di area dell'altro elemento (perpendicolare) che costituisce il giunto, in  $\text{Kg/mq}$ ,

applicando le formule fornite dalla UNI 12354-1 per i diversi tipi di giunto (in questo caso tutti i giunti sono rigidi), si ottengono i risultati riportati nella seguente tabella:

Percorso	Tipo di giunto	Formula (UNI 12354-1)	M	K
1-(p)	Rigido a T	$K_{1,(p)} = 5,7+5,7 M^2 \text{ dB}$	0.12	5.78
3-(p)	Rigido a T	$K_{3,(p)} = 5,7+5,7 M^2 \text{ dB}$	0.12	5.78
5-(p)	Rigido a croce	$K_{5,(p)} = 8,7+5,7 M^2 \text{ dB}$	0.07	8.73
7-(p)	Rigido a croce	$K_{7,(p)} = 8,7+5,7 M^2 \text{ dB}$	0.07	8.73
(p)-2	Rigido a T	$K_{(p),2} = 5,7+5,7 M^2 \text{ dB}$	-0.12	5.78
(p)-4	Rigido a T	$K_{(p),4} = 5,7+5,7 M^2 \text{ dB}$	-0.12	5.78
(p)-6	Rigido a croce	$K_{(p),6} = 8,7+5,7 M^2 \text{ dB}$	-0.07	8.73
(p)-8	Rigido a croce	$K_{(p),8} = 8,7+5,7 M^2 \text{ dB}$	-0.07	8.73
1-2	Rigido a T	$K_{1,2} = 5,7+14,1 M+5,7 M^2 \text{ dB}$	0.12	7.47
3-4	Rigido a T	$K_{3,4} = 5,7+14,1 M+5,7 M^2 \text{ dB}$	0.12	7.47
5-6	Rigido a croce	$K_{5,6} = 8,7+17,1 M+5,7 M^2 \text{ dB}$	0.07	9.92
7-8	Rigido a croce	$K_{7,8} = 8,7+17,1 M+5,7 M^2 \text{ dB}$	0.07	9.92

Il calcolo degli indici di valutazione del potere fonoisolante di tutti i possibili percorsi si può ora calcolare a partire dalla relazione (3.24):

$$R_{ij,w} = \frac{R_{iw} + R_{jw}}{2} + \Delta R_{ij,w} + K_{ij} + 10 \log \frac{S_s}{l_0 l_{ij}}$$

ottenendo:

Percorso	R <sub>i,w</sub>	R <sub>j,w</sub>	ΔR <sub>ij</sub>	K <sub>ij</sub>	I <sub>ij</sub>	R <sub>ij,w</sub>
1-(p)	51.94	63.33	0	5.78	2.7	68.19
3-(p)	51.94	63.33	0	5.78	2.7	68.19
5-(p)	53.63	63.33	0	8.73	3.0	71.52
7-(p)	53.63	63.33	5.185	8.73	3.0	76.71
(p)-2	63.33	51.94	0	5.78	2.7	68.19
(p)-4	63.33	51.94	0	5.78	2.7	68.19
(p)-6	63.33	53.63	0	8.73	3.0	71.52
(p)-8	63.33	53.63	5.185	8.73	3.0	76.71
1-2	51.94	51.94	0	7.47	2.7	64.18
3-4	51.94	51.94	0	7.47	2.7	64.18
5-6	53.63	53.63	0	9.92	3.0	67.86
7-8	53.63	53.63	7.777	9.92	3.0	75.64

Nel percorso 7-8 si è debitamente tenuto conto del fatto che lo strato aggiuntivo (pavimento galleggiante) sia presente su entrambe le partizioni considerando il valore  $\Delta R + \Delta R/2$

Si può a questo punto calcolare l'indice di valutazione del potere fonoisolante apparente della parete divisoria fra i due ambienti in esame (B) applicando la (3.28):

$$R_w' = -10 \log \left( 10^{-\frac{R_w}{10}} + \sum_{k=1}^n 10^{-\frac{R_{ij,wk}}{10}} \right)$$

che fornisce un valore di 56.5dB perciò maggiore del limite inferiore fissato dal D.P.C.M. 5/12/1997 per gli ambienti adibiti a residenza pari a 50 dB; la parete B risulta perciò verificata per quanto riguarda il potere fonoisolante.

## 2. Calcolo dell'indice di valutazione dell'isolamento acustico di facciata normalizzato rispetto al tempo di riverberazione

Eseguiamo a questo punto la verifica dell'isolamento acustico di facciata sulla parete A ipotizzando che questa sia piana (non presenti perciò elementi singolari quali balconi, terrazze, ecc.), non sia connessa rigidamente agli elementi strutturali (K=0) e sia così composta:

Parete A già definita  $S_{tot} = 10.8 \text{ m}^2$

Un elemento vetrato di dimensioni 120x180cm ( $S = 2.16 \text{ m}^2$ ) costituito da vetro semplice di spessore pari a 5mm ( $m' = 12.5 \text{ kg/m}^2$ ).

Il potere fonoisolante apparente di facciata è dato dalla (4.7):

$$R_w' = -10 \log \left( \sum_{i=1}^n \frac{S_i}{S} 10^{\frac{-R_{iw}}{10}} + \frac{A_0}{S} \sum_{i=1}^m 10^{\frac{-D_{m,i}}{10}} \right) - K \text{ (dB)}$$

in cui:  $S = 10.8 \text{ m}^2$

$$S_1 = 10.8 - 2.16 = 8.64 \text{ m}^2$$

$$R_{1w} = 51.94 \text{ dB}$$

$$S_2 = 2.16 \text{ m}^2$$

$$R_{2w} = 12 \log(m') + 17 \text{ dB} \quad (5.21) \quad R_{2w} = 30.16 \text{ dB}$$

che fornisce  $R_w' = 37.04 \text{ dB}$

L'indice di valutazione dell'isolamento di facciata è dato dalla (4.6):

$$D_{2m,nT} = R_w' + \Delta L_{fs} + 10 \log \frac{V}{6T_0S}$$

in cui:  $R_w' = 37.04 \text{ dB}$

$$\Delta L_{fs} = 0 \text{ dB}$$

$$V = 32.4 \text{ m}^3$$

$$T_0 = 0.5 \text{ s}$$

$$S = 10.8 \text{ m}^2$$

che fornisce un valore dell'indice di valutazione dell'isolamento acustico di facciata normalizzato pari a  $D_{2m,nT} = 37.04 \text{ dB}$  perciò minore del limite inferiore fissato dal D.P.C.M. 5/12/1997 per gli ambienti adibiti a residenza pari a 40 dB; la parete A non risulta perciò verificata per quanto riguarda l'isolamento di facciata.

### 3. Calcolo dell'indice di valutazione del livello di rumore da calpestio normalizzato

Si esegue a questo punto la verifica dell'isolamento da calpestio dei solai E ed F.

$$\text{Dalla (5.7): } L_{n,w,eq} = 164 - 35 \log(m') = 74.74 \text{ dB}$$

$$\text{Calcolato } f_0 = 160 \sqrt{\frac{s'}{m'}} = 160 \sqrt{\frac{21}{100}} = 73.32$$

dalla (5.8), per pavimenti galleggianti con massetti in cemento armato si ha:

$$\Delta L_w = 30 \log\left(\frac{f}{f_0}\right) + 3 = 30 \log\left(\frac{500}{73.32}\right) + 3 = 28.01$$

Dalla tabella della UNI 12354-3, per una massa del solaio pari a 355kg/m<sup>2</sup> e una massa media degli elementi ad esso collegati pari a 328kg/m<sup>2</sup> si ricava K=1.

Applicando la (5.6) si ottiene:

$$L_{n,w}' = L_{n,w,eq} - \Delta L_w + K = 74.74 - 28.01 + 1 = 47.73 \text{ dB}$$

che rappresenta l'indice di valutazione del livello di rumore da calpestio normalizzato ed è minore del limite superiore fissato dal D.P.C.M. 5/12/1997 per gli ambienti adibiti a residenza pari a 63 dB; i solai E ed F risultano perciò verificati per quanto riguarda i rumori da calpestio.

## **Appendice B: Normativa di riferimento**

### **Leggi nazionali**

**L. n. 447 26/10/1995:** Legge quadro sull'inquinamento acustico.

**D.P.C.M. 14/11/1997:** Determinazione dei valori limite delle sorgenti sonore.

**D.P.C.M. 05/12/1997:** Determinazione dei requisiti acustici passivi degli edifici.

**D.M. 16/03/1998:** Tecniche di rilevamento e di misurazione dell'inquinamento acustico.

### **Norme UNI**

**UNI EN 12354-1:** Acustica in edilizia: Valutazioni delle prestazioni acustiche di edifici a partire dalle prestazioni di prodotti – Parte 1: Isolamento dal rumore per via aerea tra ambienti.

**UNI EN 12354-2:** Acustica in edilizia: Valutazioni delle prestazioni acustiche di edifici a partire dalle prestazioni di prodotti – Parte 2: Isolamento acustico al calpestio tra ambienti.

**UNI EN 12354-3:** Acustica in edilizia: Valutazioni delle prestazioni acustiche di edifici a partire dalle prestazioni dei prodotti – Parte 3: Isolamento acustico contro il rumore proveniente dall'esterno per via aerea.

**UNI/TR 11175:** Acustica in edilizia: Guida alle norme serie UNI EN 12354 per la previsione delle prestazioni acustiche degli edifici. Applicazione alla tipologia costruttiva nazionale.

**UNI EN ISO 140-1:** Acustica: Misura dell'isolamento acustico in edifici e di elementi di edificio – Parte 1: Requisiti di dispositivi di prova nei laboratori con soppressione della trasmissione laterale.

**UNI EN ISO 140-2:** Acustica: Misurazione dell'isolamento acustico in edifici e di elementi di edificio – Parte 2: Misurazione in laboratorio dell'isolamento acustico dai rumori trasmessi per via aerea e dal calpestio tra due ambienti attraverso un pavimento sopraelevato.

**UNI EN ISO 140-3:** Acustica: Misurazione dell'isolamento acustico in edifici e di elementi di edificio – Parte 3: Misurazione in laboratorio dell'isolamento acustico per via aerea di elementi di edificio.

**UNI EN ISO 140-4:** Acustica: Misurazione dell'isolamento acustico in edifici e di elementi di edificio – Parte 4: Misurazioni in opera dell'isolamento acustico per via aerea tra ambienti.

**UNI EN ISO 140-5:** Acustica: Misurazione dell'isolamento acustico in edifici e di elementi di edificio – Parte 5: Misurazione in opera dell'isolamento acustico per via aerea degli ambienti di facciata e delle facciate.

**UNI EN ISO 140-6:** Acustica: Misurazione dell'isolamento acustico in edifici e di elementi di edificio – Parte 6: Misurazione in laboratorio dell'isolamento dal rumore di calpestio di solai.

**UNI EN ISO 140-7:** Acustica: Misurazione dell'isolamento acustico in edifici e di elementi di edificio – Parte 7: Misurazione in opera dell'isolamento dal rumore di calpestio di solai.

**UNI EN ISO 140-8:** Acustica: Misurazione dell'isolamento acustico in edificio – Parte 8: Misurazione in laboratorio della riduzione del rumore di calpestio trasmesso da rivestimenti di pavimentazioni su un solaio pesante normalizzato.

**UNI EN ISO 717-1:** Acustica: Valutazione dell'isolamento acustico in edifici e di elementi di edificio – Parte 1: Isolamento acustico per via aerea.

**UNI EN ISO 717-2:** Acustica: Valutazione dell'isolamento acustico in edifici e di elementi di edificio – Parte 2: Isolamento di rumore di calpestio.

**UNI EN 29052-1:** Acustica: Determinazione della rigidità dinamica – Parte 1: Materiali utilizzati sotto i pavimenti galleggianti negli edifici residenziali.

# **Appendice C: D.P.C.M. 5/12/1997 “Determinazione dei requisiti acustici passivi degli edifici”**

*(Gazzetta Ufficiale - Serie generale n. 297 del 22 dicembre 1997)*

## **DECRETO DEL PRESIDENTE DEL CONSIGLIO DEI MINISTRI 5 dicembre 1997**

### **Determinazione dei requisiti acustici passivi degli edifici**

#### **IL PRESIDENTE DEL CONSIGLIO DEI MINISTRI**

Visto l'art. 3, comma 1, lettera e), della legge 26 ottobre 1995, n. 447 "legge quadro sull'inquinamento acustico";

Vista la circolare del Ministero dei lavori pubblici n. 1769 del 30 aprile 1966, recante i criteri di valutazione e collaudo dei requisiti acustici nelle costruzioni edilizie;

Vista la circolare del Ministero dei lavori pubblici n. 3150 del 22 maggio 1967, recante i criteri di valutazione e collaudo dei requisiti acustici negli edifici scolastici;

Visto il decreto del Presidente della Repubblica del 26 agosto 1993, n. 412;

Considerata la necessità di fissare criteri e metodologie per il contenimento dell'inquinamento da rumore all'interno degli ambienti abitativi;

Sulla proposta del Ministro dell'ambiente, di concerto con i Ministri della sanità, dei lavori pubblici, dell'industria, del commercio e dell'artigianato;

Decreta:

#### **Art. 1.**

##### *Campo di applicazione*

1. Il presente decreto, in attuazione dell'art. 3, comma 1, lettera e), della legge 26 ottobre 1995, n. 447, determina i requisiti acustici delle sorgenti sonore

interne agli edifici ed i requisiti acustici passivi degli edifici e dei loro componenti in opera, al fine di ridurre l'esposizione umana al rumore.

2. I requisiti acustici delle sorgenti sonore diverse da quelle di cui al comma 1 sono determinati dai provvedimenti attuativi previsti dalla legge 26 ottobre 1995, n. 447.

## **Art. 2.**

### *Definizioni*

1. Ai fini dell'applicazione del presente decreto, gli ambienti abitativi di cui all'art. 2, comma 1, lettera b), della legge 26 ottobre 1995, n. 447, sono distinti nelle categorie indicate nella tabella A allegata al presente decreto.

2. Sono componenti degli edifici le partizioni orizzontali e verticali.

3. Sono servizi a funzionamento discontinuo gli ascensori, gli scarichi idraulici, i bagni, i servizi igienici e la rubinetteria.

4. Sono servizi a funzionamento continuo gli impianti di riscaldamento, aerazione e condizionamento.

5. Le grandezze cui far riferimento per l'applicazione del presente decreto, sono definite nell'allegato A che ne costituisce parte integrante.

## **Art. 3.**

### *Valori limite*

1. Al fine di ridurre l'esposizione umana al rumore, sono riportati in tabella B i valori limite delle grandezze che determinano i requisiti acustici passivi dei componenti degli edifici e delle sorgenti sonore interne.

## **Art. 4.**

### *Entrata in vigore*

Il presente decreto viene pubblicato nella Gazzetta Ufficiale della Repubblica italiana ed entra in vigore dopo sessanta giorni.

Roma, 5 dicembre 1997

Il Presidente del Consiglio dei Ministri  
PRODI

p. Il Ministro dell'ambiente  
CALZOLAIO

p. Il Ministro della sanità  
BETTONI BRANDANI

Il Ministro dei lavori pubblici  
COSTA

Il Ministro dell'industria del commercio e dell'artigianato  
BERSANI

## ALLEGATO A

### Grandezze di riferimento: definizioni, metodi di calcolo e misure

Le grandezze che caratterizzano i requisiti acustici passivi degli edifici sono:

1. il tempo di riverberazione (T), definito dalla norma ISO 3382:1975;
2. il potere fonoisolante apparente di elementi di separazione fra ambienti (R), definito dalla norma EN ISO 140-5:1996;
3. l'isolamento acustico standardizzato di facciata ( $D_{2m,nT}$ ), definito da:

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

dove:

$D_{2m} = L_{1,2m} - L_2$  e la differenza di livello;

$L_{1,2m}$  è il livello di pressione sonora esterno a 2 metri dalla facciata, prodotto da rumore da traffico se prevalente, o da altoparlante con incidenza del suono di 45° sulla facciata;

$L_2$  è il livello di pressione sonora medio nell'ambiente ricevente, valutato a partire dai livelli misurati nell'ambiente ricevente mediante la seguente formula:

$$L_2 = 10 \log \left( \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n 10^{\frac{L_i}{10}} \right)$$

Le misure dei livelli  $L_i$  devono essere eseguite in numero di n per ciascuna banda di terzi di ottava. Il numero n è il numero intero immediatamente superiore

ad un decimo del volume nell'ambiente; in ogni caso, il valore minimo di  $n$  è cinque;

$T$  è il tempo di riverberazione nell' ambiente ricevente, in sec;

$T_0$  è il tempo di riverberazione di riferimento assunto, pari a 0,5s;

4. il livello di rumore di calpestio di solai normalizzato ( $L_n$ ) definito dalla norma EN ISO 140-6:1996:

5.  $L_{ASmax}$ : livello massimo di pressione sonora, ponderata A con costante di tempo slow;

6,  $L_{Aeq}$ : livello continuo equivalente di pressione sonora, ponderata A.

Gli indici di valutazione che caratterizzano i requisiti acustici passivi degli edifici sono:

a. indice del potere fonoisolante apparente di partizioni fra ambienti ( $R_w$ ) da calcolare secondo la norma UNI 8270: 1987, Parte 7<sup>^</sup>, para. 5.1.

b. indice dell'isolamento acustico standardizzato di facciata ( $D_{2m,nT,w}$ ) da calcolare secondo le stesse procedure di cui al precedente punto a.;

c. indice del livello di rumore di calpestio di solai, normalizzato ( $L_{n,w}$ ) da calcolare secondo la procedura descritta dalla norma UNI 8270: 1987, Parte 7<sup>^</sup>, para.5.2.

### **Rumore prodotto dagli impianti tecnologici**

La rumorosità prodotta dagli impianti tecnologici non deve superare i seguenti limiti:

a. 35 dB(A)  $L_{Amax}$  con costante di tempo slow per i servizi a funzionamento discontinuo;

b. 25 dB(A)  $L_{Aeq}$  per i servizi a funzionamento continuo.

Le misure di livello sonoro devono essere eseguite nell'ambiente nel quale il livello di rumore è più elevato. Tale ambiente deve essere diverso da quello in cui il rumore si origina.

TABELLA A - CLASSIFICAZIONI DEGLI AMBIENTI ABITATIVI (art. 2)

<i>categoria A:</i> edifici adibiti a residenza o assimilabili;
<i>categoria B:</i> edifici adibiti ad uffici e assimilabili;
<i>categoria C:</i> edifici adibiti ad alberghi, pensioni ed attività assimilabili;
<i>categoria D:</i> edifici adibiti ad ospedali, cliniche, case di cura e assimilabili;
<i>categoria E:</i> edifici adibiti ad attività scolastiche a tutti i livelli e assimilabili;
<i>categoria F:</i> edifici adibiti ad attività ricreative o di culto o assimilabili;
<i>categoria G:</i> edifici adibiti ad attività commerciali o assimilabili.

TABELLA B: REQUISITI ACUSTICI PASSIVI DEGLI EDIFICI, DEI LORO COMPONENTI E DEGLI IMPIANTI TECNOLOGICI

<i>Categoria</i>	<i>Parametri</i>				
	$R_w^*$ (*)	$D_{2m,nt,w}$	$L'_w$	$L_{ASmax}$	$L_{Aeq}$
D	55	45	58	35	25
A,C	50	40	63	35	35
E	50	48	58	35	25
B,F,G	50	42	55	35	35

(\*) Valori di  $R_w$  riferiti a elementi di separazione tra due distinte unità immobiliari.

Nota: con riferimento all' edilizia scolastica, i limiti per il tempo di riverberazione sono quelli riportati nella circolare del Ministero dei lavori pubblici n. 3150 del 22 maggio 1967, recante i criteri di valutazione e collaudo dei requisiti acustici negli edifici scolastici.

## Bibliografia

**Renato Spagnolo**, a cura di, *Manuale di acustica applicata* – UTET Libreria

**Anna Magrini**, *Progettare il silenzio – tecniche di intervento per il benessere acustico* – EPC Libri

**Claudio Martorana, Simona Becherini**, *Assorbimento e isolamento acustico negli edifici* – Maggioli Editore

**Carlo Amedeo Reyneri**, *Isolanti e guaine in bioedilizia* – Edicom Edizioni

**Marco Piana**, coordinatore, *Costruire con EPS edifici silenziosi, EPS: Polistirene espanso sinterizzato* – BE-MA Editrice

**Gianfranco Cellai, Simone Secchi, Lucia Busa** *La protezione acustica degli edifici* – Alinea Editrice

**Massimo Garai, Simone Secchi**, *Metodi di previsione delle prestazioni acustiche degli edifici: isolamento all'interno degli edifici* – Atti del Convegno Nazionale Edilizia e Ambiente, Trento, 18-20 Febbraio 1998

**Giorgio Campolongo, Guido Lombardi**, *La strumentazione fonometrica: caratteristiche di impiego e taratura* – Atti del Convegno organizzato da Assoacustici, Milano, 13 Marzo 1993

**Assoacustici e Regione Lombardia**, *Il tecnico competente e la rumorosità in ambiente esterno ed abitativo, aspetti civilistici, penali e amministrativi* – Atti del Convegno, Milano, 15 Maggio 1998