

**ALMA MATER STUDIORIUM - UNIVERSITA' DI BOLOGNA**

---

**SCUOLA DI INGEGNERIA E ARCHITETTURA**

*DIPARTIMENTO DI INGEGNERIA INDUSTRIALE*

DIN

*CORSO DI LAUREA IN INGEGNERIA EDILE ARCHITETTURA*

**TESI DI LAUREA**

in

Termofisica E Acustica Delle Costruzioni T

**VERIFICA DEI REQUISITI ACUSTICI DI UNA SCUOLA MEDIA E  
PROPOSTE DI MIGLIORAMENTO**

CANDIDATO

Kama Stefano Massamba N'Siala

RELATORE

Prof. Ing. Luca Barbaresi

CORRELATORI

Prof. Ing. Massimo Garai

Ing. Lisa Loreti

Anno Accademico 2013/2014

Sessione II



## Indice

<b>1_INTRODUZIONE.....</b>	<b>1</b>
<b>2_ACUSTICA EDILIZIA .....</b>	<b>4</b>
2.1_IL SUONO E LA SUA PERCEZIONE.....	4
2.2_MODALITA' DI PROPAGAZIONE DEL SUONO ALL'INTERNO DEGLI EDIFICI.....	8
2.3_ASSORBIMENTO ACUSTICO .....	12
2.3.1_Materiali porosi.....	13
2.3.2_Risuonatori acustici.....	14
2.3.3_Pannelli vibranti .....	16
2.3.4_Sistemi misti.....	17
2.4_ISOLAMENTO ACUSTICO.....	17
2.4.1_Pareti monostrato .....	19
2.4.2_Pareti composte .....	23
2.5_LA TRASMISSIONE DEI SUONI IMPATTIVI .....	25
2.6_ROOM CRITERIA.....	26
2.6.1_Fenomeno della riverberazione .....	26
2.6.2_Intelligibilita' del parlato.....	29
2.6.2.1_Speech Transmission Index .....	30
2.6.2.2_Altri indici di intelligibilità del parlato.....	32
2.6.3_Chiarezza.....	33
<b>3_RIFERIMENTI LEGISLATIVI DEI REQUISITI ACUSTICI DEGLI EDIFICI.....</b>	<b>34</b>
3.1_PREMESSA .....	34
3.2_DPCM DEL 5/12/1997 .....	35
3.2.1_Osservazioni .....	40
3.2_NORMATIVA.....	41
3.2.1_UNI 11367 : 2010 "Classificazione acustica delle unità immobiliari".....	41
3.2.2_UNI 10140 .....	45
3.2.2.1_UNI EN ISO 10140-4 : 2000 "Misura dell'isolamento acustico per via area tra ambienti" .....	46
3.2.2.2_UNI EN ISO 10140-5 : 2010 "Misura dell'isolamento acustico per via aerea delle facciate" .....	47
3.2.2.3_UNI EN ISO 10140-7 : 2000 "Misura del livello di calpestio".....	48
3.2.3_UNI EN ISO 3382 : 2008 "Misura del tempo di riverberazione in ambienti ordinari" .....	50
3.2.3.1_UNI EN ISO 3382-1 : 2009 "Spazi performanti" .....	50
3.2.3.1_UNI EN ISO 3382-2 : 2008 "Ambienti ordinari" .....	51
3.2.4_UNI EN 717"Norme per la misurazione degli indici di valutazione dei parametri acustici degli ambienti".....	52
3.2.4.1_UNI EN 717-1:2013 "Isolamento rumori aerei" .....	52
3.2.4.2_UNI EN 717-2:2013"Rumori di tipo impattivo" .....	54
3.2.4_UNI EN 12354"Valutazioni delle prestazioni acustiche di edifici a partire dalle prestazioni dei prodotti".....	55
3.2.4.1_UNI EN 12354-1"Isolamento dal rumore per via area tra ambienti" .....	56
3.2.4.2_UNI EN 12354-2 "Isolamento acustico al calpestio tra ambienti" .....	59
3.2.4.3_UNI EN 12354-3 "Isolamento acustico contro il rumore proveniente dall'esterno per via aerea" .....	62
<b>4_REQUISITI ACUSTICI NELL'EDILIZIA SCOLASTICA.....</b>	<b>64</b>
4.1_EDILIZIA SCOLASTICA IN ITALIA .....	65

<b>5 _ MISURE, RISULTATI E CONSIDERAZIONI DEL CASO DI STUDIO.....</b>	<b>66</b>
5.1 _ MISURE DEI TEMPI DI RIVERBERAZIONE .....	69
5.1.1 _ <i>Strumentazione utilizzata</i> .....	69
5.1.2 _ <i>Procedura di misura</i> .....	71
5.1.3 _ <i>Riepilogo dati e considerazioni</i> .....	72
5.2 _ MISURE DEL POTERE FONISOLANTE APPARENTE DI PARETI E SOLAI .....	77
5.2.1 _ <i>Procedura di misura</i> .....	77
5.2.2 _ <i>Riepilogo dati e considerazioni</i> .....	81
5.3 _ MISURE DEL LIVELLO DI PRESSIONE SONORA DI CALPESTIO .....	87
5.3.2 _ <i>Procedura di misura</i> .....	88
5.3.3 _ <i>Riepilogo dati e considerazioni</i> .....	91
5.4 _ MISURE DEL DELL'ISOLAMENTO ACUSTICO DI FACCIATA .....	95
5.4.1 _ <i>Strumentazione utilizzata</i> .....	95
5.4.2 _ <i>Procedura di misura</i> .....	95
5.4.3 _ <i>Riepilogo dati e considerazioni</i> .....	100
5.5 _ MISURE DELL'INDICE DI TRASMISSIONE DEL PARLATO .....	105
5.5.1 _ <i>Strumentazione utilizzata</i> .....	105
5.5.2 _ <i>Procedura di di misura</i> .....	105
5.5.3 _ <i>Riepilogo dati di misura e considerazioni</i> .....	106
5.6 _ RIEPILOGO MISURE E DATI .....	109
<b>6 _ MODELLAZIONE DEL CASO DI STUDIO.....</b>	<b>111</b>
6.1 _ PREMessa .....	111
6.2 _ DATI IN INGRESSO.....	111
6.3 _ INTERVENTI MIGLIORATIVI .....	115
6.3.1 _ <i>Potere fonisolante apparente</i> .....	116
6.3.2 _ <i>Isolamento al calpestio</i> .....	121
6.3.3 _ <i>Isolamento acustico di facciata</i> .....	124
6.4 _ MIGLIORAMENTO DEI TEMPI DI RIVERBERAZIONE .....	125
6.5 _ STIMA DEI COSTI.....	132
7 _ CONCLUSIONI .....	134
<b>BIBLIOGRAFIA.....</b>	<b>136</b>

## **1\_Introduzione**

Il benessere acustico rappresenta oggi un requisito imprescindibile degli edifici. L'importanza di ottenere una buona qualità acustica all'interno degli ambienti è strettamente correlata alla destinazione d'uso dell'ambiente stesso.

Nella maggior parte degli spazi pubblici destinati al pubblico il comfort sonoro deve essere elevato, in essi infatti l'ascolto è funzionale per le attività che vi si svolgono all'interno. Tra questi le scuole rappresentano senza alcun dubbio luoghi dove la comunicazione e quindi la chiara percezione del parlato deve essere ottimale.

Gli ambienti scolastici devono assolvere infatti diverse, ma precise, attività che necessitano di diversi livelli di concentrazione: insegnamento con trasmissione vocale, studio individuale, attività didattiche, sportive e musicali, attività ricreative. I soggetti interessati sono allievi e insegnanti, che devono avere la possibilità di lavorare in ambienti predisposti alla didattica e dove le interferenze siano limitate.

Numerose e approfondite ricerche a livello internazionale confermano che un'esposizione cronica al rumore può generare una riduzione delle prestazioni scolastiche nei bambini, carenze nell'attenzione, una scarsa discriminazione uditiva e percezione della parola, una scarsa memoria per compiti che richiedono elaborazione di materiale semantico e limitata abilità nella lettura. Oltre a condizionare l'apprendimento dei bambini normoudenti, le cattive condizioni acustiche pregiudicano maggiormente i bambini con problemi di udito, i bambini non di madre lingua e quelli con disturbi di attenzione e di linguaggio.

Un'acustica non adeguata inoltre determina condizioni sfavorevoli per l'insegnamento. Il rumore e la riverberazione inducono un elevato sforzo vocale per gli insegnanti, i cui effetti si manifestano come sintomi di stress o di una vera e propria malattia professionale, definita tra le patologie vocali, con conseguente assenteismo e interruzione della continuità didattica.

Dalla necessità di definire parametri utili al miglioramento della qualità acustica di un ambiente, deriva la determinazione di indici prestazionali, legati al tipo di sorgenti sonore che possono diffondere negli ambienti.

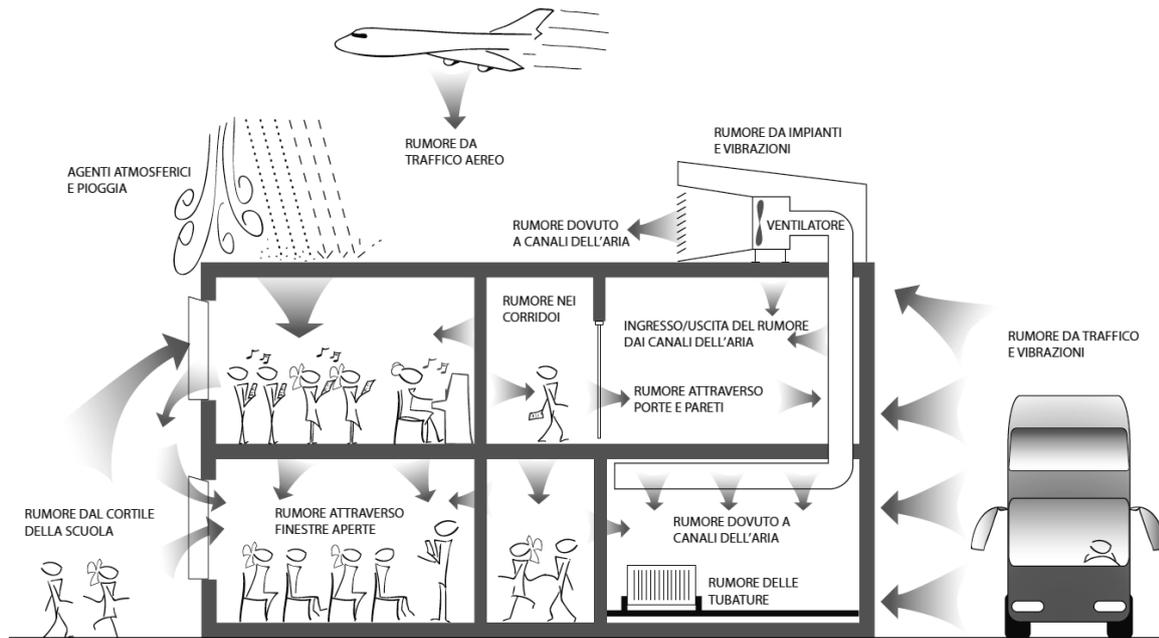


Figura 1.1- Possibili sorgenti di rumore all'interno e all'esterno dell'edificio scolastico

Le sorgenti di rumore cui sono sottoposti i bambini nelle aule scolastiche sono costituite sia dal rumore trasmesso dall'esterno attraverso l'involucro edilizio, sia dal rumore prodotto internamente all'edificio stesso. Il fatto che i bambini nelle scuole siano soggetti a suoni provenienti da un'ampia fonte di sorgenti rende le condizioni acustiche complesse da definire.

Con lo scopo di ottenere una qualità acustica degli ambienti accettabile è utile prevedere strategie ed interventi di controllo del rumore fin dalla progettazione preliminare valutando il clima acustico dell'area interessata dall'intervento e l'impatto acustico dello stesso. Ai fini di ridurre lo sforzo per ottenere buoni risultati è fondamentale localizzare la scuola in zone acusticamente protette, lontano da grandi infrastrutture stradali, ferroviarie e aeroportuali, da attività industriali e del terziario particolarmente rumorose; prevedere un adeguato isolamento acustico per ambienti acusticamente sensibili, limitare le situazioni di possibile trasmissione aerea e strutturale dei suoni, ridurre la rumorosità degli impianti.

Nei capitoli che seguono viene condotta un'analisi degli aspetti acustici di un edificio esistente che ospita una scuola media. Dopo una breve panoramica su alcuni argomenti riguardanti la teoria dell'acustica architettonica e la legislazione di riferimento per l'edilizia scolastica, vengono riportati i risultati delle misurazioni effettuate dei requisiti acustici passivi e dei parametri di intelligibilità. Successivamente con l'utilizzo di

un software di simulazione si ipotizzeranno e verificheranno eventuali interventi migliorativi.

L'obiettivo della tesi è quello di dimostrare come si può avere un aumento delle prestazioni in termini di qualità acustica negli edifici scolastici con interventi mirati e dai costi ragionevoli. Le soluzioni adottate sono un compromesso tra un buon livello di prestazioni acustiche ed i costi necessari per gli interventi proposti.

## 2\_Acustica edilizia

### 2.1\_Il suono e la sua percezione

Il fenomeno acustico, consiste in una perturbazione della pressione atmosferica di carattere oscillatorio che si propaga attraverso un mezzo elastico: gas, liquido o solido.

Le onde sonore sono caratterizzate da aspetti spaziali e temporali; le grandezze fisiche oggettive e misurabili che consentono di descrivere tale stimolo sono il periodo, la frequenza, la velocità di propagazione, la lunghezza d'onda e la fase.

Possiamo definire il suono come una particolare sensazione percepita dall'organo dell'udito eccitato.

Per quantificare il tipo di risposta umana all'energia sonora, in termini di sonorità, di disturbo e di rischio, occorre misurare la pressione sonora: definita come lo scostamento della pressione attorno al suo valore di equilibrio che è rappresentato dalla pressione atmosferica.

L'orecchio umano è un organo sensibile a variazioni di pressione sonora comprese fra i 0,000002 Pa (20  $\mu$ Pa) e 100 Pa, in una gamma di frequenze comprese fra 20 Hz e 20.000 Hz. Le grandezze acustiche hanno un ampio grado di variabilità e per tale motivo è nata l'esigenza di fare uso di una scala logaritmica nella quale, al valore della grandezza in esame, si fa corrispondere il logaritmo del rapporto tra lo stesso ed un prefissato valore di riferimento. L'unità di misura logaritmica è il deciBel (dB).

Più precisamente, il livello della pressione sonora, espresso in dB, è uguale a

$$L_p = 10 \log \left( \frac{p^2}{p_0^2} \right) = 20 \log \left( \frac{p}{p_0} \right)$$

dove  $p$  è la pressione acustica misurata e  $p_0$  è la pressione di riferimento, pari a 20  $\mu$ Pa, che corrisponde al valore della pressione sonora minimo, percepito da un individuo normoudente alla frequenza di 1000 Hz, ossia 0 dB.

Nel caso di sovrapposizione di livelli sonori  $L_i$  provenienti da  $N$  sorgenti, il livello medio si ottiene con la relazione

$$L_M = 10 \log \frac{1}{N} \sum_i 10^{\frac{L_i}{10}}$$

Risulta utile inoltre definire con un solo dato di misura un rumore variabile, per un intervallo di tempo prefissato: si introduce il livello sonoro equivalente  $L_{eq}$ , ovvero il livello espresso in dB, di un ipotetico rumore costante che, se sostituito al rumore reale per lo stesso intervallo di tempo, comporta la stessa quantità totale di energia sonora.

$$L_{eq} = 10 \log \frac{1}{T} \int_0^T \frac{p^2(t)}{p_0^2} dt$$

dove  $T$  è l'intervallo di tempo in cui è stata effettuata la misura e  $p(t)$  è la pressione sonora efficace nel tempo del suono o rumore in esame.

Tuttavia non è sufficiente considerare esclusivamente il livello della pressione sonora, in quanto il nostro apparato uditivo presenta una diversa sensibilità ai suoni caratterizzati da una diversa composizione in frequenza: generalmente è maggiore alle frequenze medio-alte e diminuisce progressivamente verso quelle basse e quelle molto alte.

L'andamento della sensibilità dell'orecchio umano al variare della frequenza è rappresentato su un diagramma chiamato *audiogramma normale*. Nel diagramma sono riportate le *curve isofoniche* che rappresentano, al variare della frequenza, i livelli di pressione sonora in grado di produrre la stessa sensazione sonora. Il valore costante di sensazione sonora che caratterizza ogni curva è espresso in *phon*, UNI ISO 226:1987.

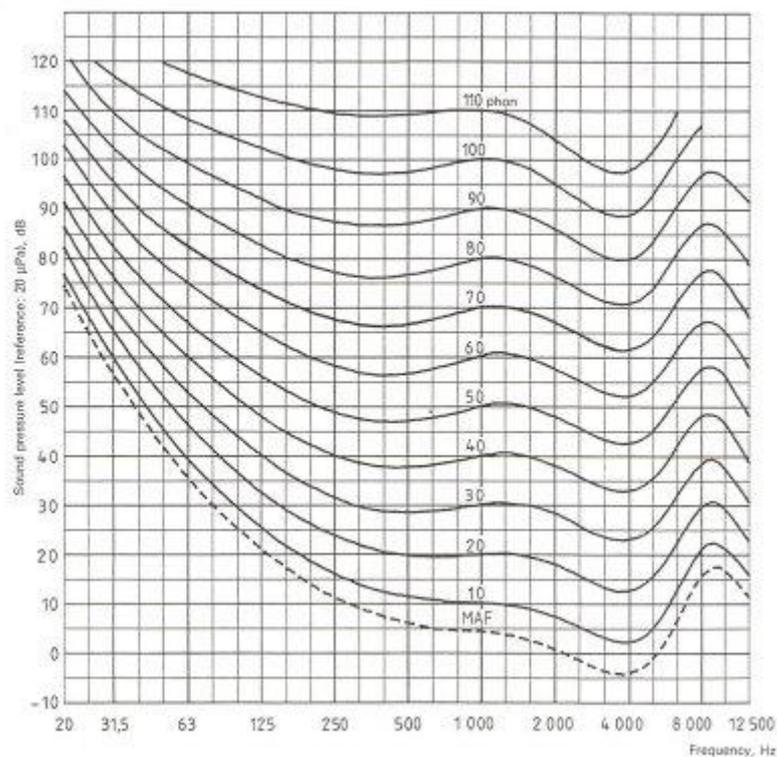


Figura 2.1 - Curve isolivello di sensazione sonora per toni puri, ISO 226:1987, appendice A

Nella tecnica fonometrica, per tenere conto della diversa sensibilità dell'orecchio nella valutazione del disturbo o danno da rumore, è impiegato un filtro che simula tale risposta attraverso l'impiego delle curve di ponderazione in frequenza direttamente selezionabili negli strumenti di misura. A livello normativo sono state definite 4 curve di ponderazione ciascuna predisposta per applicazioni specifiche.

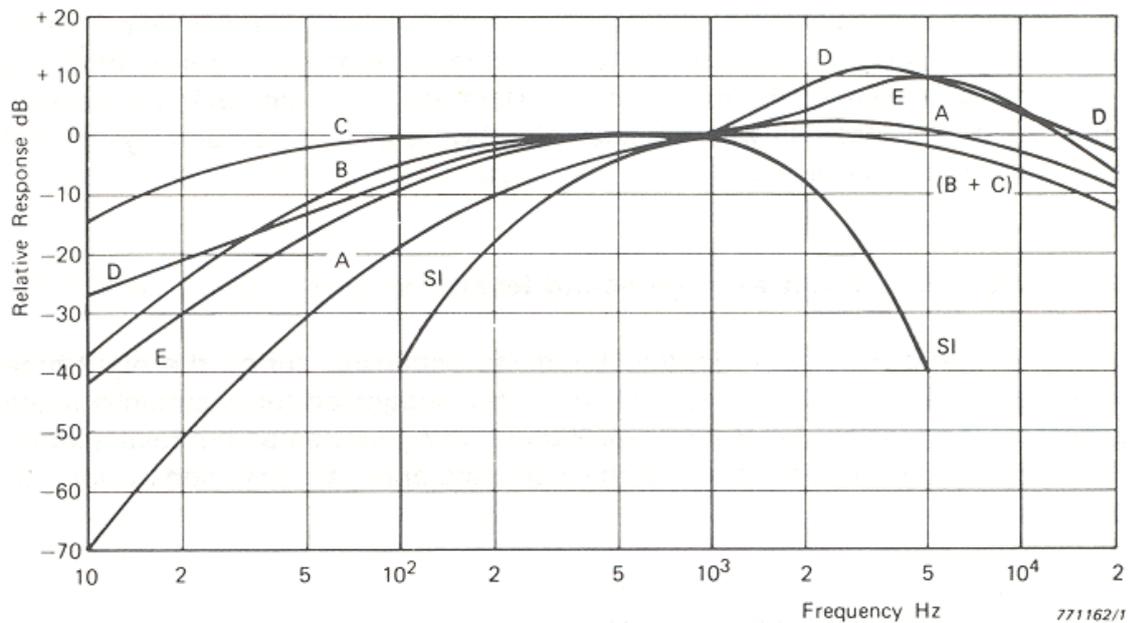


Figura 2.2 - Curve di ponderazione in frequenza normalizzate

La curva di ponderazione "A" verrà utilizzata nel caso di suoni ad intensità ridotta, si riferisce ai livelli inferiori ai 60 dB; la curva di ponderazione "B" per suoni medi e la C per quelli alti; la curva "D" serve per misurare il rumore degli aerei a reazione.

La curva di ponderazione "A" è risultata quella che mediamente meglio si correla con la risposta soggettiva umana a rumori generici a larga banda; per questo motivo si riscontra l'utilizzo della curva "A" in molte norme, leggi nazionali ed internazionali.

La percezione dei suoni è legata al comportamento delle onde sonore. Esso segue le leggi della meccanica ondulatoria, quindi le caratteristiche materiche e le dimensioni degli elementi con cui l'onda sonora entra in contatto sono fondamentali per prevederne il risultato.

I materiali intervengono nella propagazione contribuendo a dissipare una parte dell'energia trasportata per effetto di fenomeni di attrito o vibrazione. L'energia acustica

posseduta dall'onda dopo l'interazione con l'elemento è minore di quella posseduta inizialmente.

Le dimensioni degli elementi con cui l'onda sonora interagisce sono determinanti in quanto l'estensione del campo di frequenze cui il nostro orecchio è sensibile è una gamma di frequenze tra i 20 Hz e i 20KHz, a cui corrisponde una variazione altrettanto grande della lunghezza d'onda del fenomeno ondulatorio, da 17 m a 1,7 cm. Quando l'onda sonora è caratterizzata da una lunghezza d'onda piccola rispetto alle dimensioni dell'elemento su cui incide l'interazione è schematizzabile in maniera assai semplificata seguendo le leggi della cosiddetta *acustica geometrica*. La sorgente è schematizzabile come l'origine di infiniti raggi acustici normali al fronte d'onda, ciascuno dei quali segue un percorso rettilineo e trasporta un pacchetto di energia proporzionale all'intensità acustica irradiata nella direzione di propagazione.

Quando il fronte d'onda sonora urta contro una parete, generalmente si assiste al verificarsi di tre fenomeni che contribuiscono in maniera diversa alla redistribuzione dell'energia trasportata dall'onda stessa: una parte di questa energia viene riflessa; una parte viene dissipata all'interno del materiale, ed una terza parte attraversa il materiale e procede liberamente oltre.

Se chiamiamo  $W_i$  l'energia totale che nell'unità di tempo incide sulla parete e  $W_a, W_r, W_t$  le quote di potenza rispettivamente assorbita dalla parete, riflessa e trasmessa, si può scrivere:

$$W_i = W_a + W_r + W_t$$

Dividendo entrambi i membri dell'equazione per la potenza totale  $W_i$  incidente sulla parete, possiamo riscrivere l'equazione come:

$$1 = a + r + t$$

dove "a" è il coefficiente di assorbimento, "r" è il coefficiente di riflessione e "t" è il coefficiente di trasmissione; si tratta di valori adimensionali che esprimono rispettivamente le quote di potenza sonora assorbita, riflessa e trasmessa:

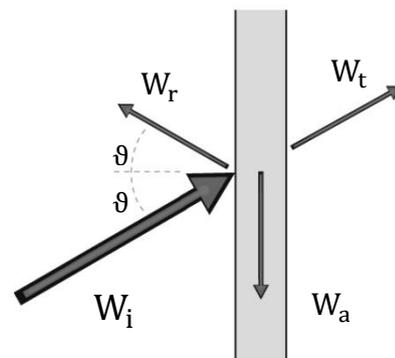


Figura 2.3 - Trasmissione, riflessione, assorbimento di un'onda sonora

$$a = \frac{W_a}{W_i} \quad r = \frac{W_r}{W_i} \quad t = \frac{W_t}{W_i}$$

I valori di tali coefficienti risultano essenziali nella definizione delle caratteristiche acustiche dei materiali utilizzati in edilizia, in relazione alle prestazioni di assorbimento ed isolamento acustico degli elementi che separano ambienti adiacenti, sovrapposti oppure un ambiente con l'esterno.

## 2.2 Modalita' di propagazione del suono all'interno degli edifici

Quando ci troviamo all'esterno il suono si propaga liberamente e viene percepito dall'ascoltatore immediatamente nella sua intensità massima, estinguendosi poi all'istante. All'interno di un ambiente confinato ,invece, al suono diretto si susseguono i suoni riflessi dalle superfici perimetrali, che determinano la permanenza del suono nel tempo.

Il gran numero di riflessioni fa sì che la distribuzione di energia nell'ambiente possa essere schematizzata come uniforme. Il campo sonoro complessivo che si determina è il risultato della sovrapposizione del *campo sonoro diretto*, prodotto dal suono che si trasmette direttamente dalla sorgente al ricevitore, e del *campo sonoro riverberante*, prodotto dalle riflessioni delle onde sonore sulle superfici che delimitano l'ambiente.

Il campo sonoro diretto dipende principalmente dalla distanza che intercorre fra sorgente e ricevitore, in maniera inversamente proporzionale al suo quadrato. In tal caso analogamente alla propagazione del suono all'aperto il contributo delle riflessioni risulta trascurabile.

Il campo sonoro riverberante dipende invece dalla geometria e dalle caratteristiche di assorbimento delle superfici che delimitano l'ambiente e dagli oggetti presenti nello stesso, oltre che dalle caratteristiche della sorgente.

Solo all'interno di ambienti con determinate caratteristiche definiti come *camere riverberanti* è possibile ottenere un campo sonoro con densità di energia costante. Sotto tale ipotesi il campo sonoro è definito *perfettamente riverberante* o diffuso, e il livello di pressione vale

$$L_p = L_w + 10 \log \frac{4}{A}$$

dove  $L_w$  è il livello di potenza sonora della sorgente, e  $A$  è l'area equivalente di assorbimento acustico, che vedremo in seguito.

Nel caso si sia in presenza di un campo parzialmente diffuso, in cui quindi il contributo dei suoni diretti non è trascurabile, il campo è detto *semiriverberante*: il livello di pressione sonora quindi è dato dalla somma di tali contributi:

$$L_P = L_W + 10 \log \left( \frac{Q}{4\pi r^2} + \frac{4}{R} \right)$$

dove  $r$  è la distanza,  $Q$  è il *fattore di direttività* dovuto alla posizione della sorgente rispetto alla superfici riflettenti  $R = \frac{\alpha_{Stot}}{(1-\alpha)}$  è la costante d'ambiente, con  $\alpha$  coefficiente di assorbimento superfici.

Nella figura è riportato l'andamento del termine  $L_P - L_W$  della formula del campo semiriverberante alla variare della distanza dalla sorgente, normalizzata rispetto al fattore di direttività  $Q$  e alla costante d'ambiente  $R$ .

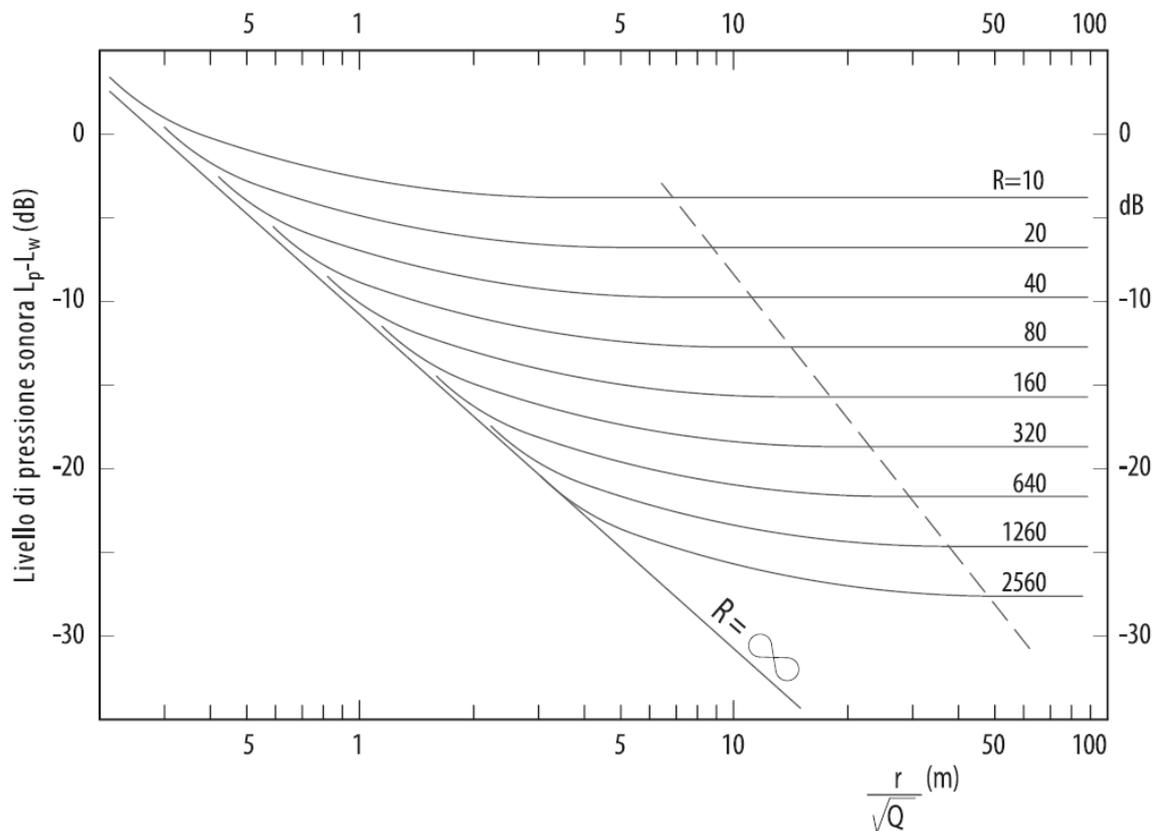


Figura 2.4 - Andamento della differenza tra livello di potenza della sorgente e livello sonoro a distanza  $r$  per valori crescenti della costante ambientale

Per  $R = \infty$  tutta l'energia incidente viene assorbita dalle pareti, è un campo libero con una diminuzione di 6 dB per ogni raddoppio della distanza.

Per  $R$  costante, oltre la retta obliqua tratteggiata, il campo è riverberante e nella zona intermedia, dove  $R$  è finito, il campo è semiriverberante.

Le formule previsionali citate in precedenza sono valide per ambienti le cui dimensioni non siano troppo dissimili tra loro e nel caso in cui l'assorbimento acustico sia distribuito in maniera uniforme sulle diverse superfici.

Quando una sorgente crea un campo sonoro all'interno di un ambiente, parte del rumore viene trasmesso all'esterno. Considerando il singolo caso in cui tale suono viene trasmesso in uno spazio adiacente, posso schematizzare la situazione considerando un locale emittente e uno ricevente.

Questa propagazione del rumore tra ambienti avviene attraverso gli elementi strutturali che compongono l'edificio, quali pareti e solai.

Attraverso tali elementi la trasmissione del suono può avvenire secondo due distinti meccanismi di propagazione: *per via aerea*, il suono si propaga nell'aria senza incontrare ostacoli solidi, è il caso di aperture e condotte d'aria, oppure *per via strutturale*.

In quest'ultimo caso le strutture, vibrando, generano a loro volta negli ambienti adiacenti un campo acustico indotto, le cui caratteristiche dipendono sia da quelle del campo acustico originario sia dalla capacità delle strutture di trasmettere le vibrazioni.

Poiché tutte le strutture propagano solo in parte le vibrazioni che le raggiungono e la loro capacità di trasmissione varia a seconda della frequenza del segnale, questo è in generale risulta attenuato e distorto rispetto a quello originario.

In generale i suoni trasmessi, sia per via aerea che attraverso i divisori, che per via strutturale attraverso la struttura dell'edificio, sono tra loro in reciproca interconnessione.

La trasmissione per via strutturale può avvenire in maniera *diretta*, quando la trasmissione nell'ambiente ricevente avviene attraverso il solo elemento strutturale considerato, tale condizione è riproducibile in laboratorio, o attraverso la *trasmissione laterale*, quando la propagazione del rumore coinvolge altri elementi rispetto a quello considerato, ciò avviene quando siamo in presenza di imperfezioni costruttive nelle opere e connessioni fisiche tra i vari elementi che compongono il sistema.

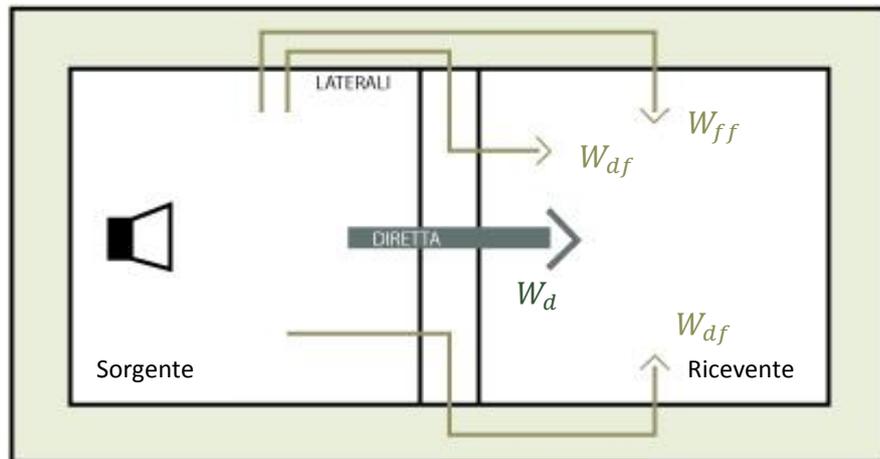


Figura 2.5 - Via di trasmissione diretta e laterali del rumore

La figura schematizza le vie di trasmissione strutturale diretta e laterale tra due ambienti adiacenti, separati da una partizione. La potenza trasmessa nell'ambiente ricevente deriva dalla somma delle seguenti singole componenti:

- $W_d$ , potenza che entra direttamente nella partizione e che viene irradiata direttamente per via aerea;
- $W_{df}$ , potenza che entra direttamente nella partizione, ma che viene poi irradiata nell'ambiente ricevente attraverso le strutture laterali;
- $W_{fd}$ , potenza che entra prima nelle strutture laterali e poi viene irradiata dalla partizione nell'ambiente ricevente;
- $W_{ff}$ , potenza che entra nelle strutture laterali e da queste viene irradiata nell'ambiente ricevente.

La potenza trasmessa complessivamente attraverso le strutture laterali risulta quindi:

$$W_f = W_d + W_{df} + W_{fd} + W_{ff}$$

L'entità della trasmissione laterale dipende da molti parametri, come il tipo di giunzione tra i vari elementi connessi strutturalmente, il rapporto tra le loro masse, il loro smorzamento. Ad essa va rivolta una giusta attenzione in quanto può costituire il percorso attraverso cui si propaga, da un ambiente all'altro della stessa costruzione, anche fino al 50% dell'energia sonora.

### 2.3\_Assorbimento acustico

L'assorbimento acustico è la capacità di un materiale di assorbire l'energia sonora e di trasformarla in un'altra forma di energia. Il principio fisico alla base dell'assorbimento acustico è la conversione di parte dell'energia incidente in calore.

I materiali e gli elementi assorbenti sono largamente utilizzati nel trattamento acustico degli ambienti, quando si desidera ridurre l'energia sonora riverberata. Il loro utilizzo consente il controllo del livello di pressione sonora a distanze opportune dalla sorgente e del tempo di riverberazione presente nell'ambiente, ovvero la riduzione dei tempi di decadimento sonoro. L'assorbimento di energia sonora è uno dei metodi di riduzione del rumore più efficaci quando la propagazione del suono avviene in ambienti chiusi.

La grandezza fisica che caratterizza le prestazioni di assorbimento acustico di un materiale è il coefficiente di assorbimento acustico  $\alpha$ , che come già visto indica la frazione di energia sonora assorbita. Per uno specifico materiale  $\alpha$  varia con la frequenza e l'angolo di incidenza dell'onda acustica.

I valori sperimentali di  $\alpha$  sono determinati nelle camere riverberanti, che realizzano con la massima approssimazione possibile un campo acustico diffuso. Si parla quindi di *coefficiente di assorbimento acustico secondo Sabine*,  $\alpha_{Sab}$ , definito come il valore del coefficiente determinato misurando prima i tempi di decadimento  $T_0$  della densità di energia sonora secondo la teoria di Sabine in assenza di provino e poi ripetendo la misura in presenza del provino,  $T_1$ . Applicando la formula di Sabine ad una camera avente volume  $V$ , è possibile attribuire la variazione dei risultati alla presenza del provino di area  $S$ , pertanto il coefficiente di assorbimento ad una data frequenza viene determinato come:

$$\alpha_{Sab} = \frac{0,161V}{S} \left( \frac{1}{T_1} - \frac{1}{T_0} \right)$$

Nelle schede tecniche fornite dai produttori compare spesso il coefficiente di riduzione del rumore NRC (Noise Reduction Coefficient), il quale è calcolato mediando i valori di  $\alpha_{Sab}$  alle frequenze di 250, 500, 1000 e 2000 Hz.

I materiali che forniscono buone prestazioni di assorbimento acustico sono detti fonoassorbenti: presentano bassa massa, alta porosità, superficie cedevole. A seconda del meccanismo fondamentale di assorbimento è possibile identificare tre classi distinte:

- a) materiali fonoassorbenti porosi, sfruttano la dissipazione viscosa;

- b) risuonatori acustici, utilizzano l'assorbimento per risonanza di cavità;
- c) membrane vibranti, sfruttano l'assorbimento per risonanza del pannello.

Ciascuno di queste tipologie di soluzione per l'assorbimento acustico è maggiormente efficiente in un determinato campo di frequenza.

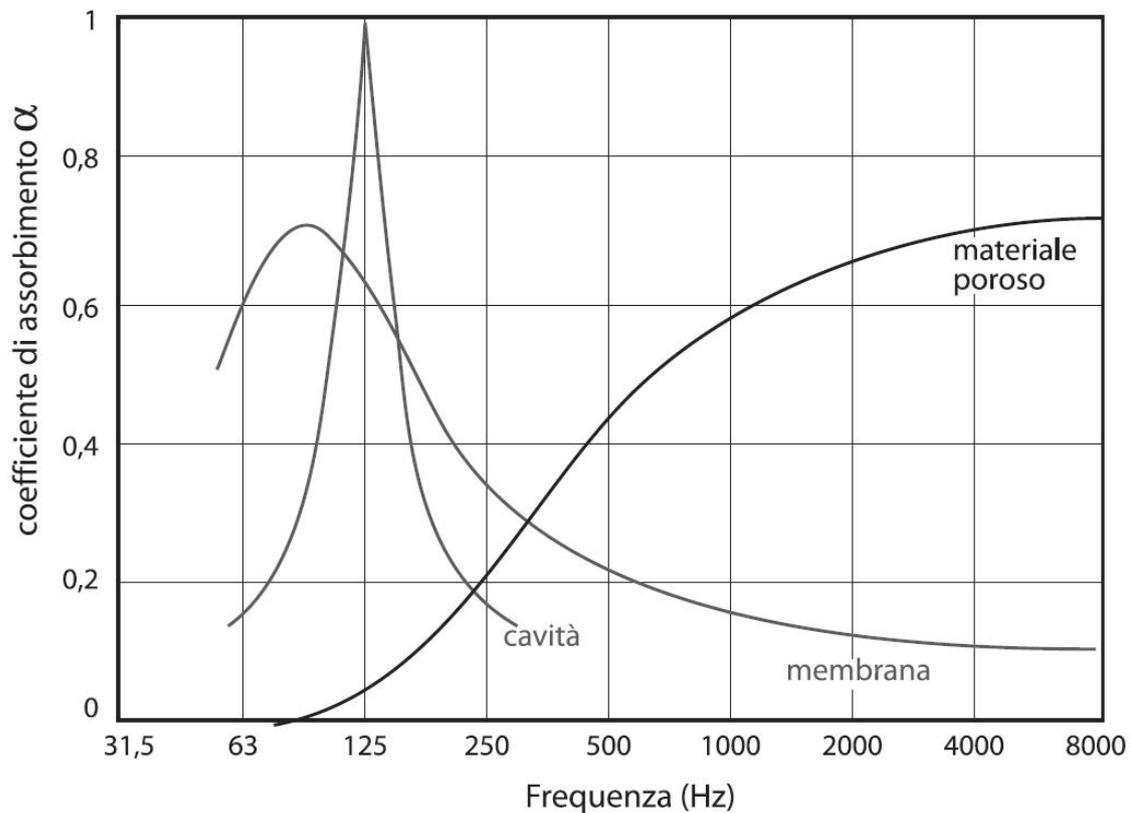


Figura 2.6 - Visualizzazione dei diversi meccanismi di assorbimento acustico in funzione della frequenza

### 2.3.1\_Materiali porosi

L'assorbimento acustico dei materiali porosi è determinato dalla conversione in calore dell'energia meccanica trasportata dall'onda incidente attraverso fenomeni di attrito che si sviluppano all'interno delle micro-cavità aperte all'aria. L'onda acustica incidente fa oscillare l'aria interna ai pori che dissipa energia per attrito viscoso determinando un aumento di temperatura.

Esempi di materiali fonoassorbenti porosi sono le fibre minerali, i poliuretani espansi a cellule aperte, le fibre vegetali, le fibre melamminiche, le fibre di poliestere, etc..

Le caratteristiche da cui dipende l'efficacia di tali materiali sono la resistenza al flusso, il diametro delle fibre e delle cavità, il fattore di struttura. La lunghezza d'onda deve essere compatibile con le dimensioni della cavità, determinante è il rapporto tra volume totale del materiale e volume delle cavità, e quindi lo spessore dell'elemento.

Valori elevati di  $\alpha$  si raggiungono alle alte frequenze, mentre alle medie e basse frequenze l'assorbimento acustico aumenta con lo spessore dei pannelli.

Un assorbimento selettivo a frequenze specifiche, anche nel campo delle medie e basse frequenze, si può ottenere utilizzando spessori ridotti di materiale collocato ad una certa distanza dalla parete rigida da trattare. Questo effetto può essere spiegato ricordando che l'assorbimento acustico dei materiali fonoassorbenti porosi è dovuto alla dissipazione dell'energia vibrazionale posseduta dalle molecole d'aria per attrito con le superfici della cavità, fenomeno che è massimo laddove si verificano le velocità delle particelle d'aria più elevate.

### **2.3.2\_Risuonatori acustici**

Le strutture di risonanza sono costituite da pannelli di materiale non poroso (ad es. una lastra di gesso) sui quali vengono praticati dei fori di opportune dimensioni e vengono montati ad una certa distanza dalla superficie da trattare. Un siffatto sistema produce un effetto di fonoassorbimento fondato sul principio di Helmholtz e i risuonatori più frequentemente utilizzati in edilizia sono detti risuonatori di Helmholtz.

Essi sono costituiti da un volume di aria contenuto in una cavità con pareti rigide, collegata all'ambiente esterno attraverso una apertura relativamente stretta, detta "collo" del risuonatore. Quando un'onda sonora incide sul collo del risuonatore, l'aria all'interno della cavità subisce compressioni e rarefazioni periodiche. In analogia ai sistemi meccanici si può dire che l'aria all'interno del collo si comporta come una massa vibrante, mentre l'aria contenuta nella cavità si comporta come una molla acustica, sistema massa-molla.

Tale risuonatore quindi dissipa energia acustica, trasformandola in calore, per effetto dell'attrito viscoso che si verifica a causa delle oscillazioni dell'aria contenute nel collo.

La dissipazione si verifica in particolare in corrispondenza della frequenza fondamentale di risonanza del sistema massa-molla, generata per effetto dell'onda sonora incidente sulla bocca del risuonatore. La frequenza di risonanza è direttamente proporzionale alla sezione

del collo  $S$  e inversamente proporzionale alla sua lunghezza  $L$  e al volume  $V$  della cavità,  $c$  rappresenta la velocità di propagazione nel mezzo:

$$f = \frac{c}{2\pi} \sqrt{\frac{S}{VL}}$$

L'assorbimento di un risonatore di questo tipo è molto selettivo intorno alla frequenza di risonanza e quindi particolarmente efficace nel caso di toni puri di bassa frequenza compresi fra 50 e 400 Hz. Se l'interno del risonatore è rivestito con materiale assorbente poroso il valore del coefficiente di assorbimento alla frequenza di risonanza diminuisce ma si allarga l'intervallo di frequenze in cui l'assorbimento è efficace.



Figura 2.7 - Schema e principio di funzionamento di un risonatore

Il pannello forato risonante assorbente costituisce un'estensione del singolo risonatore acustico; infatti montato a una certa distanza dalla superficie da trattare, si comporta come un insieme di risonatori di Helmholtz ciascuno costituito da un collo, corrispondente al foro del pannello, e da una cavità, costituita da una parte del volume compreso tra pannello e parete. La mutua interazione tra più fori determina la comparsa di fenomeni dissipativi anche a frequenze diverse da quella di risonanza. Utilizzando fori di dimensioni diverse si può contribuire all'allargamento dello spettro di assorbimento, anche se l'efficienza alle singole

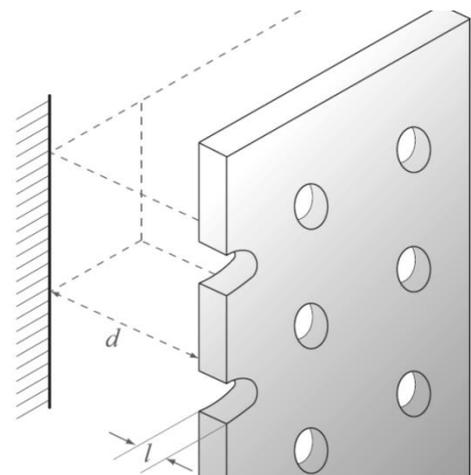


Figura 2.8 - Pannello forato risonante assorbente

frequenze diminuisce: questi sono i principi alla base dei pannelli fonoassorbenti ad ampio spettro.

### 2.3.3 Pannelli vibranti

I pannelli vibranti sono costituiti da lastre di materiale non poroso, quale ad esempio il legno compensato, montate su apposito telaio che le mantiene distanziate dalla superficie da trattare fornendo un'intercapedine d'aria. Colpita dall'onda sonora questi materiali fonoassorbenti vibrano come un diaframma su di un cuscino d'aria e assorbono l'energia acustica alle basse frequenze per effetto della dissipazione viscosa determinata dalle vibrazioni flessionali del pannello, in particolare lungo i bordi vincolati.

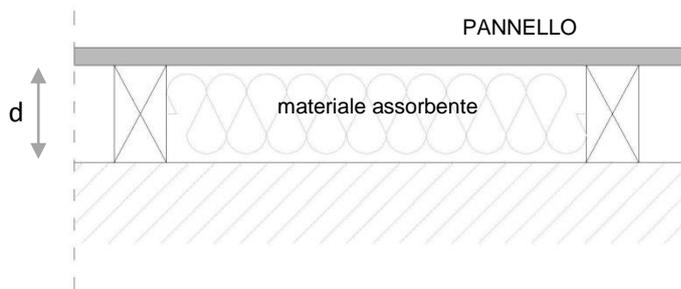


Figura 2.9 - Pannello vibrante

Il sistema può essere assimilato ad una massa oscillante, il pannello, accoppiata ad un elemento elastico dotato di un certo smorzamento, l'aria racchiusa nell'intercapedine.

La frequenza di risonanza dipende dalla sua massa per unità di superficie, dalla sua rigidità in relazione al suo supporto e della rigidità dell'intercapedine. All'aumentare della massa del pannello vibrante e dello spessore  $d$  dell'intercapedine diminuisce il valore della frequenza di risonanza  $f_r$ :

$$f_r = \frac{60}{\sqrt{m d}}$$

Per i pannelli vibranti l'assorbimento risulta essere molto selettivo nell'intorno della frequenza fondamentale di risonanza e può essere notevole alle basse frequenze.

I modi propri di vibrazione del pannello di ordine superiore a quello fondamentale determinano un assorbimento inferiore rispetto a quello che si verifica alla frequenza di risonanza fondamentale.

### 2.3.4\_Sistemi misti

Considerando le caratteristiche di assorbimento delle tre differenti tipologie di materiali fonoassorbenti descritte, si può osservare che ciascun materiale fonoassorbente ha un campo di applicazione ben definito, per cui, per ottenere buoni valori di assorbimento acustico alle alte frequenze si adoperano materiali fonoassorbenti porosi, alle frequenze intermedie i risuonatori acustici e alle basse frequenze i pannelli vibranti. Per assorbire uno spettro di frequenze ampio si possono usare sistemi misti costituiti da lastre rigide sulla cui superficie vengono praticati fori di diversa forma e dimensione, fissate ad una certa distanza dalla parete. L'intercapedine che costituisce la cavità di una molteplicità di risuonatori tra loro comunicanti, può essere o meno riempita con materiale poroso.

### 2.4\_Isolamento acustico

L'isolamento acustico è un parametro direttamente legato alla trasmissione del suono tra due ambienti, sorgente e ricevente. Il suono emesso nel locale sorgente si propaga nell'aria sino ad incontrare l'elemento di separazione tra i due ambienti, che entrando in vibrazione, invia energia sonora verso il secondo. La struttura di separazione si comporta come un elemento passivo e condiziona, attraverso le sue caratteristiche la trasmissione del suono.

L'isolamento acustico è definito dalla relazione:

$$D = L_s - L_r$$

essendo  $L_s$  il livello sonoro misurato nell'ambiente in cui si trova la sorgente e  $L_r$  il livello sonoro misurato nell'ambiente in cui si trova il ricevitore.

Esso è quindi un parametro condizionato dalle specifiche configurazioni materiche e spaziali degli ambienti in cui vengono misurati i livelli di rumore presenti nei due locali.

A partire dal coefficiente di trasmissione acustica  $\tau$  è invece definito invece il potere fonoisolante  $R$  di un componente edilizio, che connota il comportamento dell'elemento di separazione in relazione alla trasmissione dei rumori aerei.

Il coefficiente di trasmissione acustica  $\tau$  esprime, in percentuale, la quantità di energia, intesa come potenza sonora, che attraversa l'elemento divisorio.

Questa come visto in precedenza è quindi ottenuta dal rapporto fra la potenza sonora trasmessa  $W_t$  e la potenza sonora incidente sulla partizione  $W_i$

$$\tau = \frac{W_t}{W_i}$$

Per mezzo di  $\tau$  si definisce ora il potere fonoisolante come

$$R = 10 \log\left(\frac{1}{\tau}\right)$$

Data la dipendenza di  $\tau$  dall'angolo di incidenza del suono sulla superficie di partizione, tale relazione è valida per un'onda ortogonale al piano del divisorio.

Per cui una struttura incapace di impedire la trasmissione dei suoni,  $\tau = 1$ , avrà un potere fonoisolante pari a zero, al contrario a valori di  $R$  elevati corrisponderanno valori sempre più piccoli di  $\tau$ .

Scrivendo  $\tau$  in funzione della pressione sonora all'interno dei due ambienti

$$\tau = \frac{p_R^2 A}{p_S^2 S}$$

ottingo un'ulteriore espressione del potere fonoisolante:

$$R = 20 \log\left(\frac{p_r}{p_s}\right) + 10 \log\left(\frac{S}{A}\right) = L_r - L_s + 10 \log\left(\frac{S}{A}\right)$$

dove  $S$  è l'area dell'elemento divisorio e  $A$  è l'area equivalente di assorbimento acustico dell'ambiente ricevente. Con

$$A = \sum \alpha_i S_i$$

dove  $S_i$  sono le superfici presenti nel locale ricevente e  $\alpha_i$  i rispettivi coefficienti di assorbimento.

La differenza tra il potere fonoisolante  $R$ , che è una caratteristica specifica di un componente edilizio, e l'isolamento acustico  $D$  prodotto dal medesimo componente, risiede nel fatto che  $R$  tiene conto sia della superficie dell'elemento di separazione, sia dell'assorbimento acustico presente nell'ambiente. Pertanto fissato il livello sonoro presente nell'ambiente sorgente e un certo valore di  $R$  per l'elemento divisorio, si ha che il livello sonoro in ambiente ricevente sarà tanto più basso quanto maggiore sarà l'assorbimento acustico degli oggetti e dei piani perimetrali.

La precedente relazione è alla base della procedura sperimentale per la misura del potere fonoisolante, a condizione che sia possibile ipotizzare che il passaggio del suono dall'ambiente disturbante a quello disturbato avvenga solo attraverso l'elemento in esame.

Il potere fonoisolante viene quindi misurato in laboratorio, come specificato dalla norma ISO 140-3 "Misura in laboratorio dell'isolamento acustico degli elementi costruttivi di un

edificio", ed è espresso tramite una curva che riporta i diversi valori per bande di frequenza di ottava o di 1/3 di ottava.

Qualora si proceda invece ad una misura in opera, è necessario tenere presente che il suono potrà essere trasmesso al ricevitore passando, oltre che per l'elemento divisorio, anche attraverso una serie di altri percorsi. Le trasmissioni laterali causano infatti un incremento del valore del livello di pressione sonora nell'ambiente ricevente e quindi una riduzione dell'isolamento acustico e del valore di fonoisolamento.

La caratteristica della parete divisoria misurata in opera si chiama *potere fonoisolante apparente*  $R'$ , inteso come il potere fonoisolante dell'elemento comprensivo degli effetti di trasmissione laterale.

$$R' = D + 10 \log \left( \frac{S}{A} \right)$$

Noti i principi fondamentali di propagazione del suono attraverso l'elemento strutturale, nonostante sia di facile esecuzione la misura in opera, la valutazione analitica di  $R'$  risulta più complicata a causa dei numerosi contributi di trasmissione che intervengono.

Tanto più il divisorio si discosta dal caso ideale, ovvero parete piana, sottile e omogenea con condizione di vincolo a incastro perfetto o appoggio semplice, tanto più risulta difficile applicare e risolvere delle relazioni previsionali.

I materiali che danno le migliori garanzie di fonoisolamento hanno massa elevata, superficie continua, sono rigidi e non porosi.

Solo accoppiando opportunamente i materiali è possibile contemporaneamente ottenere un buon grado di isolamento e di assorbimento acustico.

#### **2.4.1\_Pareti monostrato**

L'andamento teorico del potere fonoisolante di una struttura semplice, pareti sottili omogenee e isotrope, evidenzia diverse zone in ognuna delle quali la prestazione è determinata da un fattore prevalente al variare della frequenza.

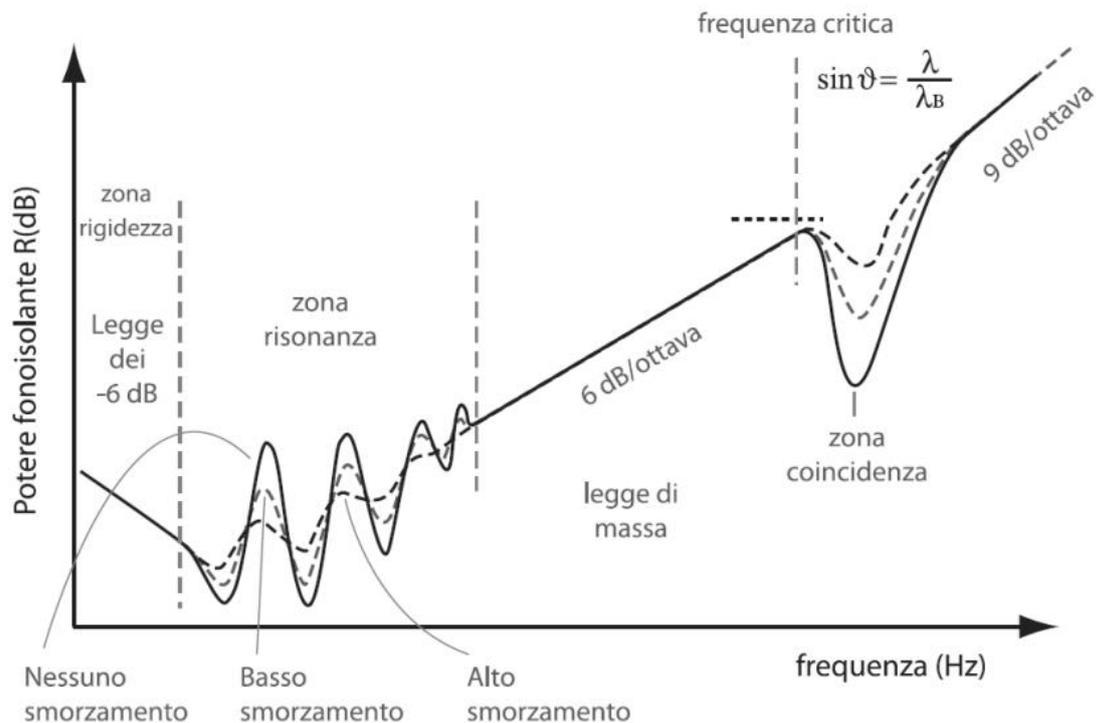


Figura 2.10 -Potere fonoisolante al variare della frequenza, pareti monostrato

Il diagramma sopra riportato è contraddistinto da due zone in cui il valore di R diminuisce bruscamente: una zona in corrispondenza della frequenza di *risonanza*, o naturale, del pannello e l'altra in corrispondenza della frequenza critica, cui corrisponde il fenomeno della *coincidenza*.

La risonanza di un pannello, ad una determinata frequenza del campo sonoro incidente, interessa l'azione delle onde sonore che agiscono perpendicolarmente rispetto al piano del pannello determinando, alla frequenza naturale propria del materiale stesso, vibrazioni più consistenti rispetto a quanto si verifica alle alte frequenze. Occorre precisare che le frequenze di risonanza interessate sono quelle più basse, legate ai modi più semplici di vibrare, le quali hanno un contenuto energetico rilevante e quindi significativo ai fini della riduzione del potere fonoisolante.

Il valore del potere fonoisolante nella zona di risonanza oscilla in maniera irregolare con picchi e valli, rimanendo su valori molto bassi e assumendo un valore minimo in corrispondenza della frequenza naturale di risonanza.

La frequenza di risonanza si ottiene dalla seguente formula:

$$f_{r(i,j)} = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{E}{\rho(1-\nu^2)}} \sqrt{\frac{h^2}{12} \left[ \left(\frac{i\pi}{a}\right)^2 + \left(\frac{j\pi}{b}\right)^2 \right]}$$

dove  $\rho$  è la densità del materiale e  $i-j$  sono numeri interi per il calcolo delle frequenze di ordine superiore; il modulo di elasticità  $E$  e il coefficiente di Poisson  $\nu$  rappresentano le proprietà meccaniche del materiale; lo spessore  $h$ , la larghezza  $a$ , l'altezza  $b$  rappresentano le proprietà geometriche dell'elemento.

Si deve osservare che per le partizioni usate in edilizia la frequenza naturale si trova generalmente al di sotto dei valori di pratico interesse:  $f_r < 100$  Hz.

Si definisce invece "effetto coincidenza" il fenomeno per cui un'onda acustica piana, di lunghezza  $\lambda$ , incidente su un pannello con un angolo  $\vartheta$ , abbia la traccia della lunghezza d'onda sul pannello uguale a quella delle onde flessionali libere  $\lambda_B$  con cui vibra il pannello.

In questo caso, le vibrazioni flessionali vengono favorite dall'onda acustica che determina un incremento dell'energia sonora

trasmessa nell'ambiente ricevente, con conseguente riduzione, anche in questo caso, del potere fonoisolante.

Con la definizione degli stessi parametri utilizzati per la determinazione della frequenza di risonanza, la frequenza critica vale:

$$f_c = \frac{c^2}{\pi s} \sqrt{\frac{3\rho(1-\nu^2)}{E}}$$

dove  $s$  è lo spessore del pannello. Essa rappresenta la frequenza più bassa alla quale si verifica l'effetto coincidenza.

I valori di frequenza critica e la relativa zona di coincidenza dipendono dallo spessore e dalla rigidità dell'elemento.

Dalle formule di calcolo delle frequenze si osserva che la rigidità di una struttura è direttamente proporzionale alla frequenza naturale ed inversamente proporzionale alla frequenza critica. Essendo la rigidità funzione del modulo di Young  $E$  ed dello spessore, si osserva che aumentando uno di questi parametri aumenta la frequenza naturale e diminuisce la frequenza critica.

Considerando l'intervallo di frequenze comprese fra la frequenza di risonanza e quella di coincidenza, il potere fonoisolante varia soprattutto in funzione della massa superficiale

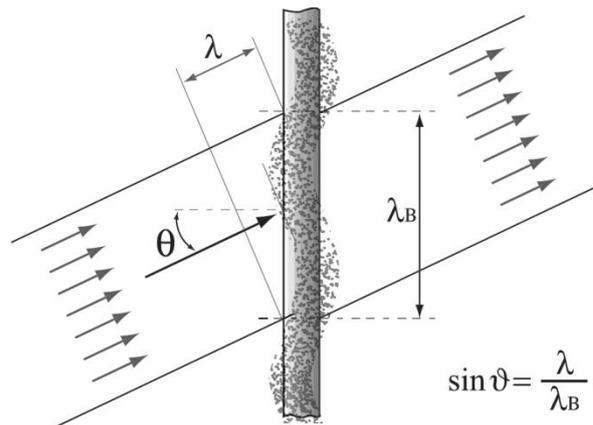


Figura 2.11- Onda flessionale libera  $\lambda_B$

del pannello, con un incremento di circa 6 dB per ogni ottava o per ogni raddoppio della massa superficiale. La relazione che descrive tale andamento va sotto il nome di *legge di massae* segue la formula di previsione

$$R_{\theta} = 10 \log_{10} \left[ \left( \frac{m \pi f \cos \theta_i}{\rho_0 c} \right)^2 \right]$$

Nel caso di incidenza normale la relazione che permette di prevedere in fase progettuale il potere fonoisolante è

$$R_0 \cong 20 \log_{10}(mf) - 42,5$$

Solitamente il campo sonoro in un ambiente chiuso è più vicino ad un campo sonoro diffuso. In queste condizioni il potere fonoisolante, detto per incidenza casuale diffusa, può essere ottenuto con la seguente formula

$$R \cong R_0 - 10 \log_{10}(0,23 * R_0) - 42,5$$

In tale zona il comportamento della struttura è indipendente dalla rigidità.

Ridurre la valutazione del potere fonoisolante alla sola legge di massa è oltremodo semplificato e può indurre ad errori considerevoli, specie quando le frequenze del rumore emesso dalla sorgente sonora cadono oltre la frequenza di coincidenza.

Nella progettazione dei pannelli si cerca di massimizzare R nel campo di frequenze di interesse nell'edilizia civile, tale campo è compreso tra 100 e 5000 Hz circa. E' quindi desiderabile garantire che sia  $f_r$  che  $f_c$  siano situati fuori da questo campo di frequenze. Questo potrebbe accadere o con rigidità molto basse ma a scapito della resistenza della struttura, ottenendo  $f_r < 100 \text{ Hz}$  e  $f_c > 5000 \text{ Hz}$ . Aumentando lo spessore, si ha un locale aumento di R fra  $f_r$  e  $f_c$ , per effetto del conseguente aumento della massa ma la legge di massa risulta valida in un campo più ristretto.

In linea generale si può affermare che il potere fonoisolante di un singolo pannello è determinato dalla sua massa: tanto maggiore è la massa e/o lo spessore del pannello tanto maggiore risulta il suo potere fonoisolante, ma essendo la frequenza critica inversamente proporzionale allo spessore del pannello, ogni tentativo di aumentare il potere fonoisolante tramite un aumento dello spessore comporta come risultato anche un diminuzione della frequenza critica. L'aumento dello spessore permette comunque di aumentare l'isolamento alle frequenze medio basse.

Quando lo spessore è elevato si innescano fenomeni di "risonanza di spessore" alle alte frequenze, dovuti alle onde longitudinali e di taglio che si creano all'interno del muro, il cui effetto è una forte riduzione di R. L'effetto delle risonanze in spessore si manifesta per

spessori superiori a 15-20 cm in base alle altre caratteristiche della parete; al di sotto di tale spessore le risonanze si verificano con frequenze superiori a 5000Hz.

Per i materiali non omogenei, come ad esempio i laterizi e i blocchi di argilla, la teoria delle pareti sottili diventa sempre meno applicabile. Questo è dovuto al fatto che le proprietà meccaniche dei materiali, non essendo costanti lungo la parete, determinano valori incerti di frequenza critica e di frequenza di risonanza.

### 2.4.2\_Pareti composte

Assumendo che l'ambiente disturbante e quello disturbato siano separati da due diverse pareti, aventi poteri fonoisolanti  $R_1$  e  $R_2$  e che lo spazio fra esse sia sufficientemente ampio da ritenere il campo sonoro al suo interno diffuso, si può dimostrare che il potere fonoisolante dell'insieme delle due pareti corrisponde a:

$$R_d = R_1 + R_2 + 10 \log_{10} \frac{A_2}{S}$$

essendo  $A_2$  l'assorbimento acustico all'interno dell'intercapedine ed  $S$  la superficie della parete.

La relazione trovata mostra come piuttosto che aumentare lo spessore di una singola parete sia preferibile l'impiego di una parete, magari dello stesso spessore, ma composta da più strati indipendenti. Ad esempio raddoppiando lo spessore di una parete si otterrebbe, nel migliore dei casi, un incremento di  $R$  di 6 dB, mentre raddoppiando la parete con interposta intercapedine è possibile ottenere anche il raddoppio di  $R$ .

La relazione precedente mostra anche il ruolo decisivo che svolge l'assorbimento acustico presente nell'intercapedine.

Tale ipotesi non è però realizzabile nella pratica, dal momento che comporterebbe un dispendio di spazio non commisurato ai vantaggi acustici conseguibili, bisognerebbe infatti che l'intercapedine fosse abbastanza ampia da consentire l'instaurarsi di un campo sonoro diffuso. La soluzione adottata normalmente in questi casi è l'impiego di una parete composta da più strati separati da un'intercapedine di aria di pochi centimetri riempita o meno di materiale fonoassorbente poroso.

Nella figura si osserva l'andamento qualitativo del potere fonoisolante al variare della frequenza per pareti in cartongesso a pannello singolo o doppio, con o senza materiale fonoassorbente nell'intercapedine.

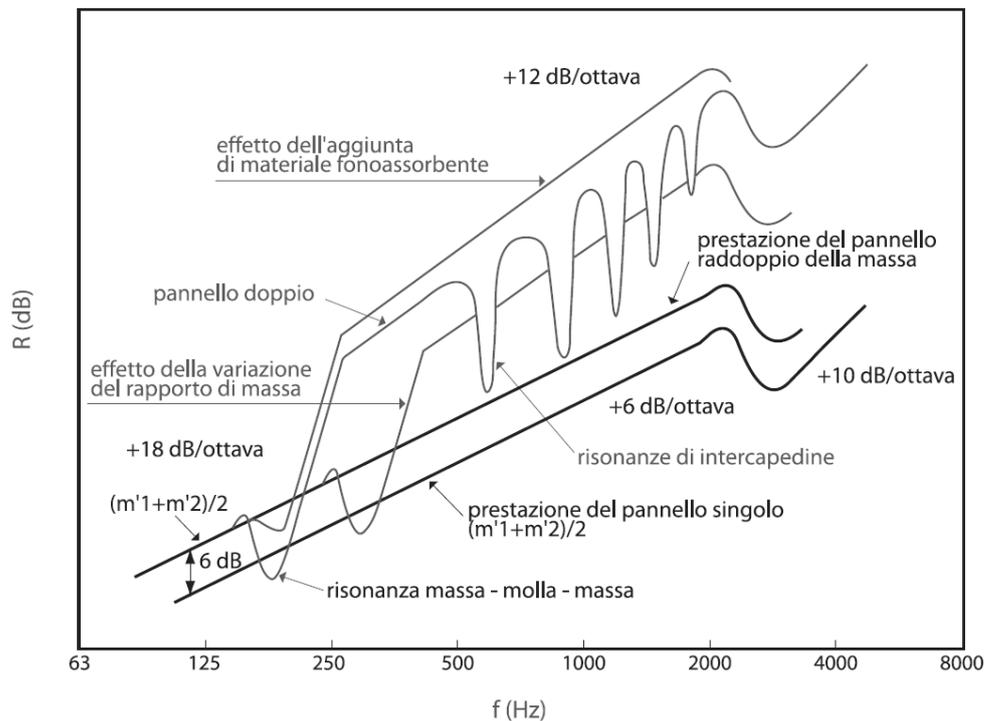


Figura 2.12 - Andamento qualitativo del potere fonoisolante al variare della frequenza della parete

Considerando un doppio pannello con intercapedine di aria, si distinguono due frequenze alle quali si verifica una modifica netta delle proprietà isolanti.

La prima è la frequenza del sistema *massa-molla-massa*, al di sotto della quale le due pareti sono perfettamente accoppiate e il comportamento è quello di una parete di massa uguale alla somma delle masse dei due pannelli. In corrispondenza della frequenza di risonanza il potere fonoisolante diminuisce. La diminuzione è tanto maggiore quanto minore è lo smorzamento. In presenza di materiale fonoassorbente all'interno dell'intercapedine, la diminuzione è meno marcata.

La seconda è la frequenza di risonanza di cavità, individuabile alle alte frequenze. A tale frequenza la lunghezza d'onda è comparabile con le dimensioni dell'intercapedine e anche in questo caso il risultato è una riduzione consistente del potere fonoisolante.

La presenza del materiale fonoassorbente determina la riduzione o l'eliminazione delle risonanze di intercapedine. Alle alte frequenze, 2500-3150 Hz, si osserva il fenomeno della coincidenza che rimane presente sia nel pannello singolo che nel pannello doppio.

La variazione del rapporto delle masse superficiali dei due pannelli determina un innalzamento della frequenza di risonanza del sistema massa-molla-massa e una conseguente riduzione del potere fonoisolante.

Poiché in corrispondenza della frequenza di risonanza massa-molla-massa il potere fonoisolante è molto piccolo, è importante che tale frequenza cada al di fuori del campo di interesse. Lo spostamento verso il basso di questa frequenza si può ottenere sia aumentando la distanza tra i pannelli che aumentando la massa dei pannelli.

## 2.5\_La trasmissione dei suoni impattivi

La trasmissione dei suoni impattivi si verifica allo stesso modo con cui si propaga e viene irradiato il rumore aereo: quello che cambia è la modalità e la quantità di energia che viene trasferita dalla sorgente alle strutture.

Un rumore impattivo, quale è il calpestio è il risultato acustico di una vibrazione meccanicamente impressa all'elemento divisorio, e si trasmette per via strutturale agli ambienti circostanti.

Nel caso in cui l'impatto avviene tra un materiale rigido e un altro materiale rigido la forza impattiva viene trasferita con un picco elevato in un breve tempo. L'urto determina la generazione di rumore ad ampio spettro.

Se invece uno dei due materiali tra i quali avviene l'impatto, o entrambi, ha caratteristiche resilienti, ovvero ha la capacità di assorbire energia di deformazione elastica, la forza impattiva viene trasferita con un picco smorzato e ritardato nel tempo.

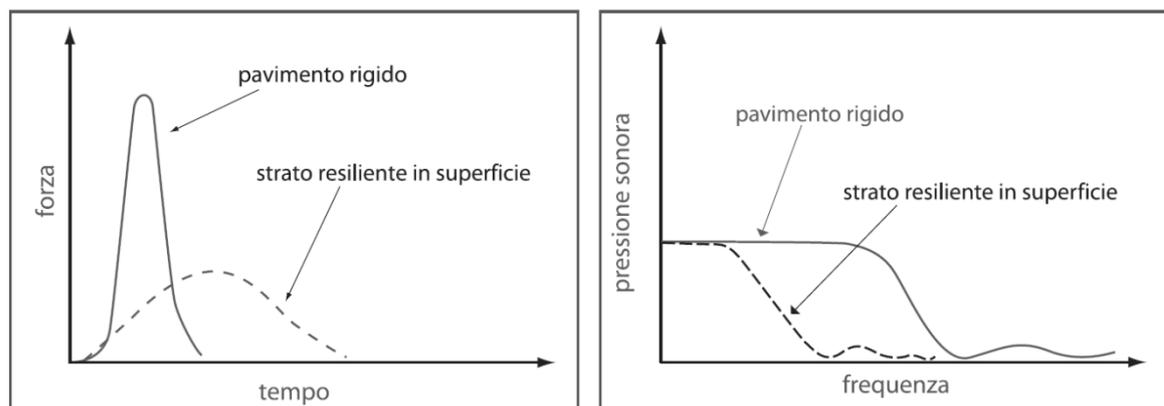


Figura 2.13- Andamento della forza impattiva del rumore generato dall'urto nel caso di materialirigidi o resilienti

L'impulso complessivamente fornito alla struttura è lo stesso del caso precedente ma il rumore e le vibrazioni che si generano hanno uno spettro maggiormente spostato verso le basse frequenze. Il rumore irradiato avrà quindi un livello complessivo in dB inferiore.

Lo spettro di rumore dipenderà anche dalla capacità di smorzamento delle vibrazioni posseduta dalla struttura. Si distinguono diverse tipologie di smorzamento: lo smorzamento interno che è funzione delle caratteristiche intrinseche del materiale; lo smorzamento per radiazione acustica che è funzione delle caratteristiche di radiazione della struttura; ed infine lo smorzamento per accoppiamento ai bordi che è funzione delle caratteristiche di vincolo strutturale.

## **2.6\_Room criteria**

### **2.6.1\_Fenomeno della riverberazione**

Quando in un ambiente chiuso, in cui sono contenuti una sorgente sonora ed un ricevitore, viene accesa la sorgente il primo fronte d'onda che raggiunge il ricevitore è quello senza riflessioni, detto campo diretto. In seguito si ha la prima riflessione contro la parete più vicina alla sorgente. Mano a mano che si verificano le successive riflessioni, si assiste contemporaneamente alla diminuzione della potenza sonora che raggiunge il ricevitore e all'aumento della distanza percorsa dall'onda prima di arrivare al ricevitore. Per l'insieme di questi fenomeni si raggiunge ben presto una situazione di regime in cui si rileva una densità di energia sonora approssimabile come costante, ovvero un campo diffuso.

Nel momento in cui la sorgente sonora smette di emettere viene meno dapprima il contributo del suono diretto, poi quello delle prime riflessioni e poi quello del campo riverberante, dando così luogo a un processo di decadimento del livello sonoro. Si verifica la cosiddetta "coda sonora", cioè il permanere per un breve periodo del campo sonoro che si attenua progressivamente fino a scomparire del tutto. Tale fenomeno è rappresentato dalla curva di decadimento che associa livello di pressione sonora al tempo.

L'andamento della curva di decadimento non assume un andamento lineare in quanto, quando avviene una riflessione, il rinvio dell'energia sonora da parte delle pareti non avviene quasi mai in maniera speculare, ma è accompagnato da fenomeni di diffusione. Inoltre sono presenti fenomeni di risonanza, che si verificano quando la frequenza del suono coincide con una delle frequenze proprie dell'ambiente, modi propri di risonanza. Perciò l'andamento temporale della coda sonora assume un andamento che presenta delle fluttuazioni. Negli ambienti di dimensioni ordinarie i modi di risonanza sono spazati tra loro alle basse frequenze, mentre con l'aumentare della frequenza

aumenta anche il numero dei possibili modi di risonanza, tanto che alle alte frequenze a ogni frequenza corrisponde ad uno o più modi di vibrazione dell'ambiente. Tale distribuzione di tipo statistico dei modi la si può ritenere pressoché uniforme al di sopra di una frequenza particolare, al di sotto della quale vi è invece una predominanza di onde stazionarie, definita frequenza di Schroeder:

$$f_s = 2000 \sqrt{\frac{T}{V}}$$

dove V è il volume dell'ambiente e T il suo tempo di riverberazione.

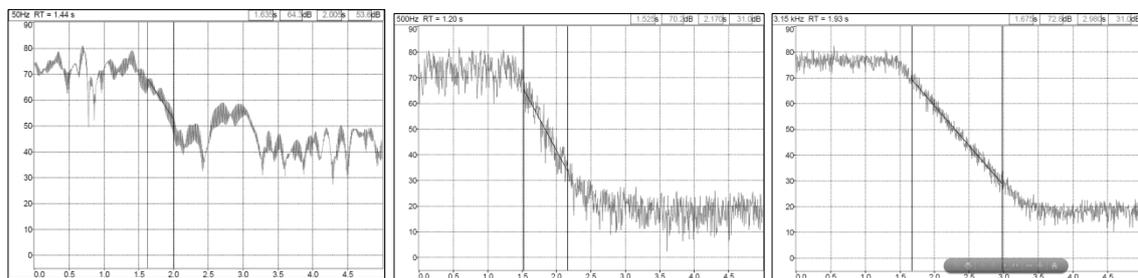


Figura 2.14 - Curve di decadimento rispettivamente a 50Hz, 500Hz e 3150Hz

Per quantificare il decadimento sonoro tipico degli ambienti confinati si è utilizzato il tempo di riverberazione,  $T_{60}$ : parametro definito come il tempo necessario affinché il livello di pressione acustica di un suono, in seguito all'interruzione di una sorgente sonora stazionaria, decada di 60 dB. Questo parametro corrisponde approssimativamente al tempo necessario affinché un suono di livello abbastanza elevato all'interno di un ambiente si attenui sino a raggiungere la soglia di udibilità.

Il tempo di riverberazione si può valutare attraverso la formula di Sabine, ricavata da misure sperimentali:

$$T_{60} = \frac{60V}{1,086 c_0 A}$$

dove V è il volume dell'ambiente,  $c_0$  è la velocità del suono nell'aria e A è l'assorbimento acustico totale dell'ambiente:

$$A = \sum \alpha_i S_i + 4mV$$

in cui  $S_i$  è la superficie degli elementi con coefficiente di assorbimento  $\alpha_i$ ; m è il fattore di assorbimento dell'aria in funzione della temperatura e dell'umidità.

In condizioni normali, alla temperatura di 20°C, cui dipende la velocità del suono nell'aria:

$$T_{60} = 0,161 \frac{V}{A}$$

Questa formula è correlata con le caratteristiche geometriche ed acustiche dell'ambiente ed è valida sotto alcune ipotesi: il campo acustico deve essere sufficientemente diffuso; le tre dimensioni devono essere confrontabili in modo da favorire l'omogeneità del campo sonoro; l'assorbimento dei vari elementi e delle pareti deve essere sufficientemente omogeneo e distribuito su tutte le superfici.

A seconda della durata temporale, la riverberazione porta alla mescolanza di suoni successivi che può avere effetti più o meno benefici sulla corretta percezione del parlato.

Nel caso invece il valore di  $T_{60}$  abbia valori troppo elevati peggiora la qualità dell'ascolto. Esistono in letteratura valori ottimali del tempo di riverberazione, riportati in funzione del volume dell'ambiente e della sua destinazione, nel campo di frequenze tra i 100 e i 5000 Hz. Questi valori derivano dall'elaborazione di un gran numero di dati sperimentali di ascolto, basati su giudizi soggettivi relativi ad ambienti reputati di buona qualità acustica.

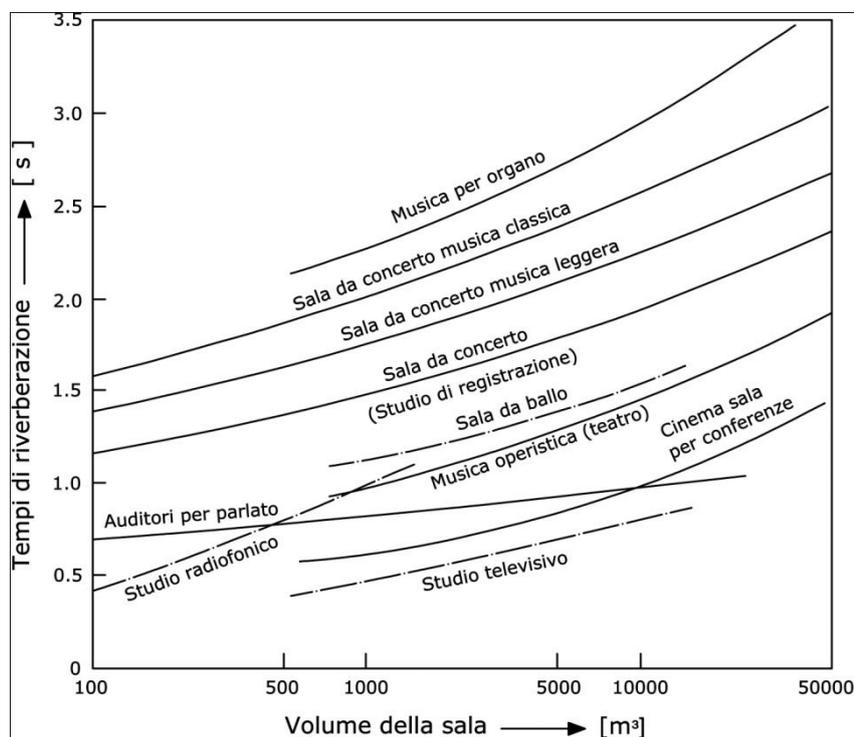


Figura 2.15 - Tempo di riverberazione ottimale, coniuga buona intelligibilità e sufficiente livello di intensità sonora

In generale si può dire che per le sale destinate al parlato si riscontrano valori di  $T_{60}$  più brevi, a parità di altre condizioni, che per sale destinate alla musica. Un'altra

considerazione di carattere generale riguarda il fatto che il valore ottimale del tempo di riverberazione cresce leggermente all'aumentare del volume, favorendo il livello sonoro a discapito dell'intelligibilità. La riverberazione ottimale tuttavia non è una condizione sufficiente a garantire una buona prestazione acustica.

### **2.6.2\_Intelligibilità del parlato**

L'esigenza fondamentale della comunicazione verbale è la comprensione corretta del messaggio trasmesso. Le caratteristiche acustiche dell'ambiente in cui avviene la comunicazione possono perturbare la qualità della trasmissione. In particolare l'eccesso di riverberazione e la presenza di rumore di fondo, possono mascherare il segnale emesso dal parlatore.

Per intelligibilità del parlato si intende la comprensione corretta di parole o frasi rispetto alla totalità delle frasi pronunciate da un parlatore. Essa dipende, oltre che dal rumore presente nell'ambiente e dalla riverberazione, dalle caratteristiche di emissione della voce umana, che varia in intensità secondo lo sforzo vocale del parlatore e in frequenza secondo una evoluzione spettrale legata ai fonemi pronunciati e alla configurazione anatomica dell'apparato fonatorio. Generalmente il livello globale di pressione sonora ad 1 m di distanza dalla bocca del parlatore, in direzione frontale, in campo libero, per una conversazione con sforzo normale, si può assumere pari a 63 dB, con fluttuazioni di livello connesse al linguaggio. Le frequenze di maggior interesse ai fini di una buona intelligibilità del parlato sono quelle comprese fra 300 Hz e 3KHz.

Esistono diversi metodi per valutare l'intelligibilità del parlato in un ambiente. La metodologia di riferimento, di tipo soggettivo, consiste nella realizzazione di test tra parlatori e gruppi di ascoltatori. Si tratta di una procedura laboriosa che richiede tempi lunghi, è nata quindi la necessità di poter disporre di tecniche che permettano di stimare l'intelligibilità tramite procedure oggettive ripetibili ed indici facilmente misurabili, i cui valori possano essere comparabili. Tra queste fornisce ottimi risultati lo STI, Speech Transmission Index.

### 2.6.2.1\_Speech Trasmission Index

Lo STI è un metodo sviluppato in Olanda nei primi anni '70 ed è stato raffinato negli anni per essere utilizzato in varie applicazioni, l'ultima revisione da parte della Commissione Internazionale di Elettronica risale al 2011, norma europea IEC60268-16. Le aree di applicazione dello STI possono essere l'elettroacustica, le telecomunicazioni e l'acustica architettonica.

Lo STI è un parametro che quantifica l'effetto combinato dell'interferenza del rumore di fondo e della riverberazione sull'intelligibilità del parlato. Si utilizza una procedura con la quale si determina la riduzione dell'indice di modulazione di un segnale di test che riflette le caratteristiche del parlato continuo, dalla sua emissione alla sua ricezione.

Un segnale modulato in ampiezza è dato da un segnale di frequenza portante, che assume ampiezza variabile nel tempo secondo una legge imposta da un segnale di frequenza più bassa, modulante. L'indice di modulazione è il rapporto fra l'ampiezza del segnale modulante e l'ampiezza del segnale portante.

La riduzione dell'indice di modulazione si basa sulla funzione di trasferimento della modulazione della sala, MTF, Modulation Transfer Function: per ciascuna frequenza di modulazione la MTF è determinata dal rapporto tra l'indice di modulazione del segnale in corrispondenza dell'ascoltatore,  $m_o$ , e l'indice di modulazione del segnale di test,  $m_i$ .

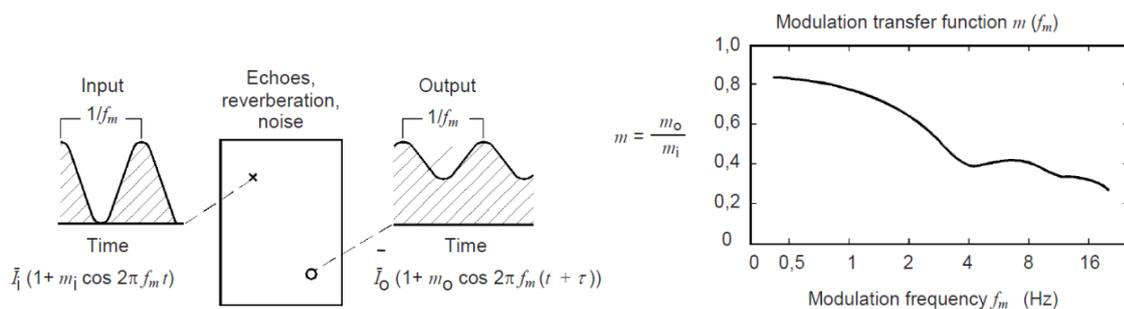


Figura 2.16 - Riduzione della modulazione di un segnale vocale prodotta da un rumore di fondo, dall'eco e dalla riverberazione (EN 60268-16);  $m=1, m_o \leq 0$

Viene determinata una famiglia di curve della MTF, nella quale ogni curva è relativa a ciascuna banda di ottava di emissione del segnale vocale ed è definita dai valori che il fattore di riduzione dell'indice di modulazione  $m$  assume per ogni frequenza di modulazione presente nell'involucro dei segnali naturali del parlato.

Nel caso di misura dello STI sono considerate 7 bande di ottava, da 125 Hz a 8 KHz, e 14 frequenze di modulazione, comprese tra 0,63 e 12,5 Hz, in intervalli di un terzo di ottava; 98 combinazioni. I valori dell'indice di modulazione  $m_{f,F}$  si possono ottenere secondo la formula:

$$m_{f,F} = \frac{\int_0^{\infty} e^{-j2\pi Ft} p^2(t) dt}{\int_0^{\infty} p^2(t) dt} \frac{1}{(1 + 10^{-(S/N)_f/10})}$$

dove  $p(t)$  è l'risposta all'impulso per il percorso sorgente-ricevitore, misurata in assenza di rumore, e  $(S/N)_f$ , in dB, è il rapporto segnale/rumore, cioè la differenza fra il livello del segnale e quello del rumore per la banda di ottava  $f$  considerata.

Tale metodo è applicabile per sistemi di trasmissione lineari e invarianti rispetto al tempo. Se si fa riferimento ad un campo sonoro diffuso, per distanze dalla sorgente molto maggiori della distanza critica, ovvero la distanza per la quale il livello di pressione del campo diretto eguaglia quello del campo riverberato  $r_h = \frac{1}{4} \sqrt{\frac{A}{\pi}}$ , l'indice di modulazione si ottiene con la seguente formula:

$$m_{f,F} = \frac{1}{\sqrt{1 + \left(\frac{2\pi FT_f}{13,8}\right)^2}} \frac{1}{(1 + 10^{-(S/N)_f/10})}$$

Infine questi dati vengono convertiti nell'indice STI facendo la media ponderata degli indici di modulazione alle frequenze rilevanti per il parlato.

Esso rappresenta l'effetto del sistema di trasmissione, in questo caso l'ambiente, sull'intelligibilità del parlato.

Dalla relazione precedente si comprende come al crescere del tempo di riverberazione si riduca lo STI alle frequenze più alte, mentre un basso rapporto segnale/rumore faccia peggiorare l'indice a tutte le frequenze.

L'indice STI, variabile tra 0 e 1, è correlato a scale soggettive di intelligibilità nella tabella sottostante.

Tabella2.1 - Classificazione della qualità della comunicazione in relazione all'indice STI

Classe di qualità della comunicazione	Valore dell'indice STI
Pessima	< 30
Scadente	0,30 - 0,45
Discreta	0,45 - 0,60
Buona	0,60 - 0,75
Eccellente	> 0,75

Tale metodo può essere utilizzato per comparare la qualità di trasmissione del parlato in diverse posizioni e sotto varie condizioni contemporaneamente nello stesso ambiente; o per la comparazione della qualità di trasmissione acustica di più ambienti sotto stesse condizioni o assegnati canali di comunicazione del parlato.

### 2.6.2.2 Altri indici di intelligibilità del parlato

Lo STIPA, *Speech Transmission Index for Public Address system*, è una forma semplificata del metodo STI, basata su misure che utilizzano un minor numero di indici di modulazione. Consiste in un segnale test con un predefinito numero di 2 frequenze di modulazione per banda di ottava che generate simultaneamente determinano un totale di 14 indici di modulazione. Metodo più rapido rispetto allo STI.

Il SIL, *Speech Interference Level*, è una procedura di calcolo utilizzata nella comunicazione diretta tra parlatore e ascoltatore, senza ausilio di dispositivi elettronici, in ambienti rumorosi e con minima riverberazione. La norma indica che tale metodo dovrebbe essere adottato solo quando altri metodi di valutazione di intelligibilità del parlato non possono essere applicati.

Il livello di interferenza sul parlato SIL si ottiene dalla seguente relazione:

$$SIL = L_{S,A,L} - L_{SIL}$$

dove  $L_{S,A,L}$  in dB(A), rappresenta il livello continuo equivalente ponderato A del parlato alle orecchie dell'ascoltatore, e  $L_{SIL}$ , in dB, rappresenta il livello di interferenza sul parlato del rumore alle orecchie dell'ascoltatore, ottenuto come media aritmetica dei livelli di pressione sonora del rumore di fondo nelle quattro bande di ottava con frequenza di centro banda 500 Hz, 1 KHz, 2 KHz e 4 KHz.

### 2.6.3\_Chiarezza

La chiarezza concerne la qualità della comunicazione tra due persone e la nitidezza del trasferimento di un discorso ad un ascoltatore. Essa prende in esame l'intervallo di tempo in cui viene emesso il suono diretto ed avvengono le prime riflessioni, che hanno la caratteristica di rinforzare l'intensità del suono, al contrario delle riflessioni successive che possono essere percepite come fastidiose.

La chiarezza viene quindi utilizzata per valutare la qualità acustica di un ambiente in termini di intelligibilità del parlato e dell'ascolto della musica. Essa viene calcolata attraverso un bilancio energetico, confrontando l'energia sonora iniziale con quella successiva ad una soglia temporale definita a seconda del fine della misurazione. Nel caso di chiarezza del parlato l'intervallo temporale considerato è di 50 millisecondi e la formula utilizzata è la seguente:

$$C_{50} = \frac{\int_0^{50 \text{ ms}} p^2(t) dt}{\int_{50 \text{ ms}}^{\infty} p^2(t) dt}$$

Il valore della chiarezza è legato alla distribuzione temporale ed all'intensità delle riflessioni, al tempo di riverberazione, all'intensità del suono diretto e del suono riverberato.

### 3\_Riferimenti legislativi dei requisiti acustici degli edifici

#### 3.1 Premessa

In Italia i requisiti acustici in edilizia sono introdotti con il Decreto Ministeriale del 30/04/1966, "Criteri di valutazione e collaudo dei requisiti acustici nelle costruzioni", con lo scopo di stabilire le modalità per la valutazione qualitativa della protezione di un edificio di civile abitazione contro i rumori.

Il successivo Decreto ministeriale del 22/05/1967, "Criteri di valutazione e collaudo dei requisiti acustici negli edifici scolastici", recependo i concetti generali, i metodi di misura e i criteri di valutazione dei risultati indicati nel precedente decreto, determina i valori limite di riferimento per gli edifici scolastici.

Le grandezze introdotte e i relativi indici di valutazione fanno riferimento all'isolamento acustico di elementi orizzontali e verticali, tra ambienti arredati ad uso didattico adiacenti e sovrastanti; ai livelli di rumore di calpestio; al livello di rumorosità dei servizi quali impianti di riscaldamento, areazione e condizionamento a funzionamento continuo e discontinuo; vi sono inoltre prescrizioni sui tempi medi di riverbero delle aule e sui coefficienti di assorbimento dei materiali isolanti acustici.

In quest'ultimo decreto vengono indicati i valori limite dei descrittori delle precedenti grandezze, in particolare i requisiti di accettabilità da capitolato, forniti da misure eseguite in laboratorio, indicati nella tabella 3.1, e in opera, tabella 3.2.

*Tabella 3.1 - Requisiti di capitolato da determinare con misure di laboratorio*

Requisiti - misure di laboratorio	Indice di valutazione a 500Hz
Potere fonoisolante di strutture divisorie interne	40 dB
Potere fonoisolante di infissi verso l'esterno	25 dB
Potere fonoisolante di griglie e prese d'aria installate verso l'esterno	20 dB
Livello di rumore di calpestio fra due aule sovrapposte	68 dB

Tabella 3.2 - Requisiti da determinarsi con misure di opera

Requisiti - misure di opera	Indice di valutazione a 500Hz
Isolamento di facciata fra due aule adiacenti sullo stesso piano	40 dB
Isolamento fra due aule sovrapposte	42 dB
Livello di rumore di calpestio fra due aule sovrapposte	68 dB
Limiti di rumorosità per servizi a funzionamento discontinuo	50 dB (A)
Limiti di rumorosità per servizi a funzionamento continuo	40 dB (A)

Inoltre viene prescritto che la media dei tempi di riverberazione misurate alle frequenze di 250-500-1000-2000 Hz, non debba superare 1,2 secondi ad aula arredata, misurati in presenza di due persone al massimo.

I successivi decreti sulla materia, il D.M. del 18/12/1975e il D.M. del 13/09/1977, introducono alcune novità, sulla base delle precedenti indicazioni. Tra queste si riscontra un'ulteriore limitazione dei livelli di rumorosità dei servizi e una definizione più precisa dei livelli ottimali di riverberazione. Stabilisce che essi devono essere determinati in funzione del volume dell'ambiente, riferiti alle bande di ottava 125-250-500-1000-2000-4000 Hz, secondo la seguente formula:

$$T_{\text{ott}} = K (-0,2145 + 0,45 \log V)$$

dove V è il volume dell'aula e K è dato in funzione della frequenza.

I decreti ministeriali precedentemente nominati hanno guidato in linea teorica la progettazione acustica degli edifici scolastici fino all'emanazione del DPCM del 5/12/1997 che li sostituisce recependoli, e che attualmente è il riferimento legislativo per i nuovi interventi costruttivi.

### 3.2\_DPCM del 5/12/1997

La legislazione che riguarda l'acustica ambientale fa capo alla "Legge quadro sull'inquinamento acustico", n.447 del 26 Ottobre 1995, che stabilisce i principi fondamentali in materia protezione dal rumore degli individui dall'ambiente esterno.

Essa stabilisce le competenze di Stato, Regioni, Province e degli Enti Locali in materia di regolamentazione, pianificazione e controllo del rumore.Inoltre prevede azioni finalizzate alla protezione dall'inquinamento acustico specificando limiti di accettabilità del rumore, in termini di valori assoluti di emissione e di immissione in ambiente, e prevedendo la

stesura di piani di zonizzazione acustica e progetti di azione a breve, medio e lungo termine finalizzati a ricondurre i livelli di rumorosità ambientale a determinati valori ottimali, definiti come valori di qualità.

Nel settore delle costruzioni viene previsto un decreto attuativo sui requisiti acustici passivi degli edifici e dei loro componenti, e un decreto attuativo sui criteri di progettazione, esecuzione e ristrutturazione delle costruzioni edilizie.

In ottemperanza alla prima di queste disposizioni è stato pubblicato il DPCM del 5/12/97, mentre in merito al secondo aspetto relativo ai criteri di progettazione ed esecuzione delle costruzioni edilizie, il relativo decreto attuativo non è ancora stato emanato.

Il DPCM 5/12/1997 intitolato "Determinazione dei requisiti acustici passivi degli edifici", è entrato in vigore nel 1998 e ha definito con quali parametri caratterizzare gli elementi costruttivi e quali valori assumere come limiti in funzione della destinazione d'uso degli edifici, al fine di ridurre l'esposizione umana al rumore, riferendosi alla situazione in opera.

Il decreto è strutturato in articoli contenenti il campo di applicazione, la classificazione degli ambienti abitativi, le grandezze di riferimento con relative definizioni, metodi di calcolo; sono dati inoltre i valori limite dei requisiti acustici passivi e dei livelli di rumorosità indotti dalle sorgenti sonore interne agli edifici.

Di seguito la classificazione degli ambienti:

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

Le grandezze riportate per le valutazioni delle prestazioni degli edifici sono riprese e ridefinite sulla base delle precedenti leggi in materia di acustica degli edifici:

- l'isolamento acustico tra ambienti adiacenti e sovrapposti;
- l'isolamento acustico degli ambienti ai rumori provenienti dall'esterno;
- il livello di rumore del calpestio fra ambienti sovrapposti;
- il livello di rumore di servizi ed impianti a funzionamento continuo e discontinuo;

- il tempo di riverberazione.

Nelle tabelle che indicano i valori limite di tali grandezze ne vengono riportati gli indici di valutazione, che permettono di individuare il requisito in oggetto con un solo valore. I descrittori le normative che definiscono i metodi di misura da considerare per la valutazione delle grandezze considerate vengono di seguito elencate.

- Il *Potere fonoisolante apparente di elementi di separazione fra ambienti ( $R'$ )* definisce le proprietà isolanti di una parete divisoria fra due ambienti. Con il termine “apparente” si intende che la misura avviene in opera e quindi prendendo in considerazione tutta la potenza sonora che arriva nell'ambiente ricevente, non solo quella che attraversa la parete divisoria in modo diretto ma anche i fenomeni di trasmissione laterale. Tale parametro indica di quanti dB la partizione è in grado di ridurre il livello sonoro misurato nell'ambiente ricevente considerando tutti i contributi di trasmissione: più il valore è alto, maggiore è la prestazione dell'elemento;  $R'$  varia al variare della frequenza.

Il metodo di misura di  $R'$  è definito nella norma UNI EN ISO 140-4 "Misurazioni in opera dell'isolamento acustico per via aerea tra ambienti". Il decreto riporta il valore limite del suo indice di valutazione  $R'_w$ , indicato dal pedice  $w$ , che definisce un valore ottenuto a partire dai poteri fonoisolanti apparenti alle varie frequenze secondo una procedura normalizzata, descritta dalla norma UNI EN ISO 717-1, "Isolamento acustico per via aerea".

- *L'isolamento acustico di facciata  $D_{2m,nT}$*  è il parametro che definisce le proprietà isolanti di una parete divisoria tra l'ambiente esterno, ovvero dove è situata la sorgente sonora, e l'ambiente interno, definito ricevente. Il pedice  $2m$  indica che la misura del livello di pressione sonora esterno viene effettuata a 2 metri dalla facciata; il pedice  $nT$  si riferisce al fatto che tale risultato viene normalizzato rispetto al tempo di riverberazione dell'ambiente ricevente. Tale parametro indica in sostanza di quanti dB la partizione esterna è in grado di ridurre gli effetti del rumore esterno nell'ambiente ricevente: più il valore è alto, maggiore è la prestazione acustica dell'elemento;  $D_{2m,nT}$  varia con la frequenza.

Il metodo di misura di  $D_{2m,nT}$  è definito nell'norma UNI EN ISO 140-5 "Misurazioni in opera dell'isolamento acustico per via aerea degli elementi di facciata e delle facciate"

Il decreto riporta il valore limite del suo indice di valutazione  $D_{2m,nT,w}$  ottenuto dai valori dell'isolamento normalizzato di facciata in frequenza secondo la procedura descritta dalla norma UNI EN ISO 717-1, menzionata precedentemente.

- Il *livello di rumore da calpestio normalizzato*  $L'_n$  è il parametro che definisce il livello di rumore trasmesso essenzialmente per via strutturale e che interessa il complesso pavimento-solaio. Tali valori indicano la capacità di un solaio di abbattere il livello sonoro dovuto a rumori impattivi, con riferimento al rumore misurato nell'ambiente ricevente, di conseguenza più basso è il livello di rumore misurato migliori sono le prestazioni di isolamento del solaio. Il pedice  $n$  indica che la misura viene normalizzata rispetto all'area equivalente di assorbimento acustico.

La misura di  $L'_n$  è definita nella UNI EN ISO 140-7 "Misurazioni in opera dell'isolamento da rumori di calpestio di solai"

Il decreto riporta il valore limite dell'indice di valutazione  $L'_{n,w}$  ottenuto dai valori del livello di rumore al calpestio normalizzato in frequenza secondo la procedura descritta dalla norma UNI EN ISO 717-2, "isolamento del rumore di calpestio".

- Il *livello massimo di pressione sonora ponderata A con costante di tempo slow*,  $L_{ASmax}$ , è il valore massimo del livello istantaneo di pressione sonora misurato durante l'evento sonoro causato da un impianto a ciclo discontinuo. Si valuta in sostanza misurando il picco massimo di rumore emesso da un impianto. Il DPCM considera impianti a funzionamento discontinuo: ascensori, scarichi idraulici, bagni, servizi igienici e rubinetteria. La misura del livello sonoro deve essere eseguita nell'ambiente nel quale il livello di rumore è più elevato.
- Il *livello continuo equivalente di pressione sonora, ponderata A*,  $L_{Aeq}$  è il valore medio energetico del livello di pressione sonora prodotto da un impianto a ciclo continuo. La misura del livello sonoro deve essere eseguita nell'ambiente nel quale il livello di rumore è più elevato.

Per la misura del rumore da impianti il DPCM non richiama alcuna norma tecnica. Indica solo che “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”. Per l'esecuzione dei rilievi ci si può riferire a quanto riportato nel D.M. 16/03/98 “Tecniche di rilevamento e di misurazione dell'inquinamento acustico” e nelle norme tecniche: UNI 8199/1998 “Collaudo acustico degli impianti di climatizzazione e ventilazione –Linee guida contrattuali e modalità di misurazione”; UNI EN ISO 10052/2005 “Misurazioni in opera dell'isolamento acustico per via aerea, del rumore da calpestio e della rumorosità degli impianti - Metodo di controllo”; UNI EN ISO 16032/2005 “Misurazione del livello di pressione sonora di impianti tecnici in edifici – Metodo tecnico progettuale”.

- *Il tempo di riverberazione*  $T_{60}$ , come precedentemente riportato, è il tempo necessario affinché in un determinato punto dell'ambiente, il livello di pressione sonora si riduca di 60 dB rispetto a quello che si ha nell'istante in cui la sorgente sonora stazionaria cessa di funzionare. Tali valori sono indicati secondo le differenti frequenze.

Per la misura in opera del tempo di riverbero il DPCM fa riferimento alla norma UNI EN ISO 3382-2:2008, "Misurazione dei parametri acustici degli ambienti - Parte 2: Tempo di riverberazione negli ambienti ordinari".

Nella tabella 3.3 sono riportati i valori limite da rispettare in opera.

Tabella 3.3- Requisiti da determinarsi con misure di opera

Categorie	Parametri [dB]				
	$R'_w$	$D'_{2m,nT,w}$	$L'_{n,w}$	$L'_{ASmax}$	$L'_{Aeq}$
D	55	45	58	35	25
A, C	50	40	63	35	35
<b>E</b>	<b>50</b>	<b>48</b>	<b>58</b>	<b>35</b>	<b>25</b>
B, F, G	50	42	55	35	35

Con riferimento all'edilizia scolastica, i limiti per il tempo di riverberazione sono quelli riportati nella circolare del Ministero dei lavori pubblici del 22 maggio 1967, accennata nel paragrafo 3.1.

### **3.2.1\_Osservazioni**

Vi sono una serie di problemi interpretativi sul DPCM 5/12/1997, legati sia ad aspetti tecnici che economici per il soddisfacimento dei requisiti acustici.

Per quanto riguarda il potere fonoisolante apparente si fa riferimento ad unità immobiliari distinte, il che escluderebbe dall'applicazione del decreto, ad esempio, le pareti divisorie tra appartamenti e vani scale, tra camere di ospedale appartenenti allo stesso reparto, pareti di separazione tra aule della stessa scuola.

Facendo riferimento all'isolamento di facciata si nota invece come i requisiti acustici passivi non tengano conto della classificazione acustica del territorio imponendo limiti indifferenziati che in alcuni casi potrebbero non essere adeguati rispetto al reale clima acustico circostante.

Il decreto inoltre riguardo all'isolamento a calpestio non specifica che la sorgente debba essere posizionata nell'ambiente soprastante la stanza ricevente: è quindi possibile realizzare rilevazioni tra stanze adiacenti sullo stesso piano o su piani sfalsati.

Per i limiti imposti agli impianti a funzionamento continuo e discontinuo, il disturbo deve essere misurato in ambienti diversi da quello in cui è generato il rumore, escludendo misurazioni che in alcuni casi possono essere significative.

Oltre a queste possiamo trovare altre imprecisioni che generano incertezza sulle modalità di applicazione del decreto. La successiva norma UNI 11367 illustrata nel paragrafo 3.2.1 chiarirà alcuni punti.

Si precisa che il DPCM del 1997 non prevede sanzioni amministrative nei casi in cui l'edificio non rispetti le prescrizioni imposte. Queste, nella legge, sono rimandate a disposizioni regionali, che di fatto non sono ad oggi state definite dalle stesse regioni. Questa situazione di incertezza ha generato numerosi contenziosi, le cui sentenze rispondono al vuoto legislativo presente in materia.

## 3.2\_Normativa

### 3.2.1\_ UNI 11367 : 2010 "Classificazione acustica delle unità immobiliari"

Nel 2010 è stata varata la norma UNI 11367, "Classificazione acustica delle unità immobiliari". Tale norma, che al momento non è cogente ed ha applicazione volontaria, introduce da un lato un necessario chiarimento di molti degli aspetti dubbi presenti nel DPCM 5/12/1997 e dall'altro introduce una complicazione della procedura di valutazione. La nuova normativa fa quindi riferimento alle grandezze già considerate dal vecchio DPCM, integrandole con nuovi parametri limite e stabilendo delle classi in base ai valori ottenuti attraverso le misurazioni degli stessi indici di valutazione.

Fra gli aspetti contenuti nella UNI 11367 è bene evidenziare l'estensione della verifica dei requisiti alle partizioni di una stessa unità immobiliare per edifici con destinazione ricettiva, ospedali, case di cura e scuole; inoltre ha chiarito che l'indice di valutazione del potere fonoisolante apparente deve essere determinato anche per elementi di separazione tra spazi di uso comune o per locali adibiti a garage, mentre l'isolamento di facciata va determinato anche per le falde dei tetti ove il sottotetto sia abitabile.

Per quanto riguarda le modalità di valutazione dei requisiti, in generale, la determinazione del valore si ottiene attraverso misurazioni in opera dei singoli elementi misurabili. Tuttavia la norma prevede nel caso di sistemi edilizi caratterizzati da tipologie seriali, ovvero con elementi tecnici che si ripetono, la possibilità di effettuare le prove su campioni e di estenderne il risultato agli altri. Nell'appendice della norma vengono descritti i criteri di campionamento.

Di seguito ripropongo brevemente i requisiti acustici passivi sottolineandone le novità.

I descrittori utilizzati nella UNI 11367 fanno riferimento per quanto riguarda i metodi di misurazione alla stessa normativa descritta nel DPCM 5/12/1997, a meno di differenti indicazioni.

- L'isolamento ai rumori aerei di partizioni verticali e orizzontali, è da valutare fra ambienti di differenti unità immobiliari e all'interno della medesima unità immobiliare; gli indici di valutazione sono il potere fonoisolante apparente  $R'_w$  e l'isolamento acustico normalizzato al tempo di riverberazione  $D_{nT,w}$ .
- L'isolamento di facciata, è misurato con l'indice di isolamento acustico di facciata normalizzato al tempo di riverberazione,  $D_{2m,nT,w}$ .

- Il livello di rumore di calpestio è da valutare fra ambienti di differenti unità immobiliari e della stessa unità immobiliare; è misurato con l'indice di valutazione del livello di pressione sonora di calpestio normalizzato rispetto all'area equivalente di assorbimento acustico,  $L'_{n,w}$ .
- Le caratteristiche acustiche interne degli ambienti: la UNI 11367 aggiorna i parametri di comfort acustico, in merito ai quali la letteratura scientifica ha fatto notevoli progressi rispetto alla legge del '97, dando indicazioni per gli ambienti dove l'intelligibilità del parlato rivesta importanza e/o l'assorbimento acustico risulta essere critico. I descrittori riportati dalla presente norma sono la Chiarezza  $C_{50}$ , lo STI, *Speech Transmission Index* e i tempi di riverbero  $T_{60}$ .  
Le modalità di misurazione e di valutazione sono descritte nella serie UNI EN ISO 3382, per quanto riguarda  $C_{50}$  e  $T_{60}$ , e nella CEI EN 60268-16, per lo STI.
- Il livello sonoro immesso da impianti a funzionamento continui si valuta con l'indice del livello continuo equivalente di pressione sonora ponderato, secondo la curva A, del rumore indotto dall'impianto, corretto per tener conto sia della differenza tra il livello del rumore ambientale indotto dall'impianto ed il livello del rumore residuo, sia del tempo di riverberazione dell'ambiente ricevente,  $L_{ic}$ . La definizione di tale parametro è illustrata nell'appendice D della stessa norma UNI 11637.
- Il livello sonoro immesso da impianti a funzionamento discontinuo si valuta con il livello massimo di pressione sonora ponderato rilevato con costante di tempo "slow" (S) del rumore indotto dall'impianto, corretto per tenere conto del tempo di riverberazione dell'ambiente ricevente,  $L_{id}$ . La definizione di tale parametro è definita nell'appendice D della stessa norma.

La classificazione acustica indicata nella norma utilizza 4 classi di riferimento ed è utilizzata per le unità immobiliari.

Tabella 3.4- Classificazione acustica di unità immobiliari

Classe acustica	Indici di valutazione [dB]				
	$D'_{2m,nT,w}$	$R'_w$	$L'_{n,w}$	$L_{ic}$	$L_{id}$
I	$\geq 43$	$\geq 56$	$\leq 53$	$\leq 25$	$\leq 30$
II	$\geq 40$	$\geq 53$	$\leq 58$	$\leq 28$	$\leq 33$
III	$\geq 37$	$\geq 50$	$\leq 63$	$\leq 32$	$\leq 37$
IV	$\geq 32$	$\geq 45$	$\leq 68$	$\leq 37$	$\leq 42$

Nel caso vengano rilevate in opera prestazioni peggiori rispetto alla classe IV il requisito risulta non classificabile e viene identificato con l'acronimo NC, non classificabile.

I limiti della tabella sono validi per tutte le destinazioni d'uso ad eccezione di ospedali e scuole. Per queste tipologie di edifici la norma propone nell'Appendice A alcuni valori di riferimento per definire gli edifici con prestazioni acustiche "base" o "superiori".

Tabella 3.5- Requisiti acustici di scuole, ospedali e case di cura

Descrittore	Indice[dB]	Prestazione base[dB]	Prestazione superiore [dB]
Isolamento acustico normalizzato di facciata	$D'_{2m,nT,w}$	38	43
Potere fonoisolante apparente di partizioni fra ambienti di differenti unità immobiliari	$R'_w$	50	56
Livello di pressione sonora di calpestio normalizzato fra ambienti di differenti unità immobiliari	$L'_{n,w}$	63	53
Livello sonoro corretto immesso da impianti a funzionamento continuo, $L_{ic}$ in ambienti diversi da quelli di installazione [dB(A)]	$L'_{ic}$	32	28
Livello sonoro massimo corretto immesso da impianti a funzionamento discontinuo, $L_{id}$ in ambienti diversi da quelli di installazione [dB(A)]	$L'_{id}$	39	34
Isolamento acustico normalizzato di partizioni fra ambienti sovrapposti della stessa unità immobiliare,	$D'_{nT,w}$	50	55
Isolamento acustico normalizzato di partizioni i fra ambienti adiacenti della stessa unità immobiliare	$D'_{nT,w}$	45	50
Livello di pressione sonora di calpestio normalizzato fra ambienti sovrapposti della stessa unità immobiliare	$L'_{n,w}$	63	53

Dato che le misurazioni vengono effettuate per ogni singolo elemento dell'ambiente, anche nel caso si esegua un campionamento, vi è la necessità di ottenere un valore complessivo per ogni requisito: per fare ciò si mediano i valori utili degli elementi presi in considerazione, utilizzando le formule sottostanti.

Tabella 3.6 - Formule per ottenere i valori medi dei rispettivi indici di valutazione

$R'_w, D'_{2m,nT,w}, D'_{nT,w}$	$L'_{n,w}, L'_{ic}, L'_{id}$
$X_r = -10 \log \frac{\sum_{i=1}^n 10^{\frac{-X_i}{10}}}{n}$	$Y_r = -10 \log \frac{\sum_{i=1}^n 10^{\frac{Y_i}{10}}}{n}$

Le indicazioni per la valutazione delle caratteristiche acustiche interne degli ambienti sono contenute nell'Allegato C. Per quanto riguarda il  $C_{50}$  e lo STI i valori prescritti sono:

Tabella 3.7 - Valori consigliati dei parametri  $C_{50}$  e STI

	$C_{50}$	STI
Ambienti adibiti al parlato	$\geq 0$	$\geq 0,6$
Ambienti adibiti ad attività sportive	$\geq -2$	$\geq 0,5$

Il tempo di riverberazione, viene definito nella norma stessa come generalmente meno affidabile per valutare la qualità acustica di un ambiente in termini di intelligibilità; sono comunque riportati i valori ottimali media tra i 500 e 1000 Hz, ricavabili dalle espressioni seguenti:

- $T_{ott} = 0,32 \log (V) + 0,03$  per ambienti non occupati adibiti al parlato;
  - $T_{ott} = 1,27 \log (V) - 2,49$  per ambienti non occupati adibiti ad attività sportive;
- dove  $V$  è il volume dell'ambiente.

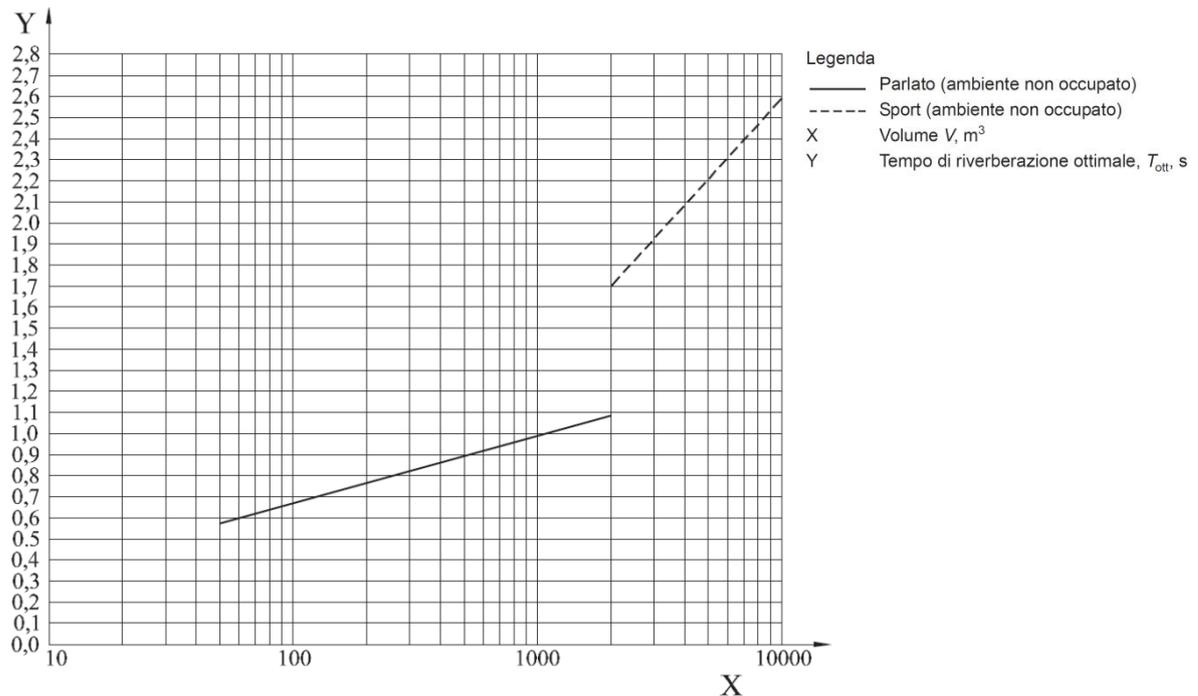


Figura 3.1 - Diagramma del  $T_{ott}$  in funzione del volume V, in accordo con le formule

La norma suggerisce inoltre che le misurazioni del tempo di riverberazione ad ambiente non occupato, rispettino il seguente criterio, in tutte le bande di ottava comprese fra i 250 Hz e i 4000 Hz:

$$T \leq 1,2 T_{ott}$$

### 3.2.2\_ UNI 10140

La norma UNI 10140 è stata creata per garantire la coerenza, semplificare e rendere riproducibili le operazioni di misurazione dei requisiti acustici passivi di un edificio.

Nel dettaglio contiene:

- le grandezze specifiche misurate;
- le dimensioni dell'elemento di prova;
- le condizioni limite e di montaggio;
- le condizioni al contorno, le ipotesi e le condizioni operative;
- le specifiche ulteriori per il rapporto di prova.

### 3.2.2.1\_ UNI EN ISO 10140-4 : 2000 "Misura dell'isolamento acustico per via area tra ambienti"

L'isolamento acustico tra ambienti è principalmente espresso in termini di potere fonoisolante apparente,  $R'$ , in quanto nella trasmissione del rumore tra ambienti è considerata non solo la trasmissione attraverso la parete in oggetto, ma anche attraverso percorsi laterali, responsabili di un forte abbassamento del potere fonoisolante.

Nell'ipotesi che vi siano campi sonori sufficientemente diffusi nei due ambienti il potere fonoisolante apparente è determinato secondo la seguente relazione:

$$R' = D + 10 \log \frac{S}{A} = L_1 - L_2 + 10 \log \frac{S}{A}$$

dove:

$S$  è l'area dell'elemento divisorio in metri quadri

$A$  è l'area di assorbimento equivalente

$$A = 0,16 \frac{V}{T}$$

$L_1$  livello medio di energia nell'ambiente emittente

$L_2$  livello medio di energia nell'ambiente ricevente

La verifica del potere fonoisolante apparente può essere svolta sia attraverso calcoli empirici, sia attraverso delle misurazioni in opera, secondo la procedura definita dalla norma ISO 140-4.

Quest'ultimo metodo prevede che l'elemento da testare abbia una superficie in comune con i due ambienti di almeno  $10 \text{ m}^2$  e che gli ambienti di prova siano entrambi arredati. Il suono emesso nell'ambiente disturbante deve essere costante e con una larghezza di banda sufficiente a coprire le frequenze di interesse acustico: un intervallo minimo che comprende le bande di terzo di ottava da 100 Hz a 3150 Hz. Il livello di ciascuna banda di terzo di ottava non deve eccedere di più di 6 dB il livello nelle bande adiacenti e deve essere sufficientemente elevato da consentire di avere, nell'ambiente ricevente, un livello di almeno 10 dB superiore al rumore di fondo. La sorgente sonora dovrà essere collocata in almeno due punti diversi dell'ambiente e comunque tali da generare un suono il più diffuso possibile, avendo cura di evitare l'eccessiva prossimità all'elemento da testare e agli elementi a esso solidali. È possibile impiegare più altoparlanti a condizione che il segnale che li alimenta non sia correlato.

La misura del livello di pressione sonora dei due ambienti deve essere effettuata impiegando uno o più microfoni da collocare in almeno cinque punti distribuiti uniformemente e distanti almeno 0,7 metri l'uno dall'altro, 0,5 metri dalle pareti e di 1,0 m dalla sorgente. Le combinazioni di sorgenti e ricevitori dovrebbero essere variate in funzione delle dimensioni degli ambienti. Per misure su partizioni verticali la posizione delle sorgenti sonore deve essere la più vicina possibile agli spigoli della parete opposta a quella da rilevare rimanendo comunque ad una distanza di almeno 10 metri da quest'ultima, o di 2,5 volte la sua larghezza. Per misure su partizioni orizzontali le sorgenti vanno comunque posizionate in corrispondenza degli angoli dell'ambiente.

La misura del livello di pressione sonora deve essere espressa in bande di terzo di ottava alle frequenze da 100 Hz fino almeno a 3150 Hz e, preferibilmente, fino a 5000 Hz.

### **3.2.2.2\_UNI EN ISO 10140-5 : 2010 "Misura dell'isolamento acustico per via aerea delle facciate"**

L'isolamento acustico di facciata è valutato ponendo il fonometro esterno ad una distanza di 2 metri dalla facciata, che misura il livello di pressione sonora esterno  $L_{1,2m}$ .

Nell'ambiente ricevente la misura del livello sonoro  $L_2$  segue sostanzialmente le stesse regole della misura del potere fonoisolante: almeno cinque punti distribuiti uniformemente e distanti almeno 0,7 metri l'uno dall'altro e 0,5 metri dalle pareti.

Analogamente alla misura dell'isolamento acustico di partizioni interne la misura del tempo di riverberazione è necessaria a normalizzare i risultati e deve essere fatta impiegando almeno una posizione della sorgente e tre posizioni dei ricevitori, eseguendo due letture per ogni combinazione.

In tutti i casi il campo di frequenze da caratterizzare deve includere almeno le bande di terzo di ottava da 100 Hz a 3150 Hz.

Una volta effettuate le misure del livello esterno  $L_{1,2m}$ , del livello interno  $L_2$  e del tempo di riverberazione interno  $T$  è possibile calcolare l'isolamento acustico di facciata normalizzato rispetto al tempo di riverberazione con la relazione:

$$D_{2m,nT} = L_{1,2m} - L_2 + 10 \log \left( \frac{T}{T_0} \right)$$

con  $T_0$  tempo di riverberazione di riferimento pari a 0,5 secondi.

La norma UNI EN 140-5 specifica due serie di metodi per la misurazione dell'isolamento al rumore aereo: il metodo globale, riferito cioè al comportamento globale della facciata, e il metodo per elementi, che consente di misurare il potere fonoisolante apparente riferito a singoli elementi della facciata.. Il primo metodo è preferibile quando la misurazione è la valutazione delle prestazioni di tutta la facciata. Il secondo metodo è preferibile quando si ha la necessità di valutare uno specifico elemento di facciata in relazione alle sue prestazioni ricavate in laboratorio. Entrambi i metodi prevedono la possibilità di usare come sorgente sonora esterna il traffico stradale oppure una sorgente elettroacustica.

Affinché la misura dell'isolamento acustico di facciata sia assicurata è necessario, come per la misura del potere fonoisolante apparente, che il livello misurato nell'ambiente ricevente sia superiore di almeno 10 dB rispetto al rumore di fondo.

Nel caso di utilizzo di una sorgente elettroacustica, la norma prevede il posizionamento della stessa ad una distanza di almeno 7 metri dal centro della parete da testare e in modo tale da formare un angolo di  $45 \pm 5^\circ$  rispetto alla normale della parete. Essa deve produrre su una superficie immaginaria con le stesse dimensioni e orientamento di quella in esame, differenze locali di livello inferiori a 5 dB in ogni banda di frequenza esaminata. Tali differenze, indipendentemente dalle caratteristiche di direttività della sorgente utilizzata, è più probabile che si manifestino per effetto di fenomeni di interferenza localizzati dovuti alla particolare posizione della sorgente sonora o alla presenza di ostacoli.

### **3.2.2.3\_ UNI EN ISO 10140-7 : 2000 "Misura del livello di calpestio"**

La misura della capacità di un elemento orizzontale di proteggere l'ambiente ricevente dalla trasmissione dei rumori di tipo impattivo, in particolare il calpestio, viene fatta tramite l'utilizzo di un apposito generatore normalizzato posto in opera sul solaio da testare e misurando il livello di pressione sonora che si instaura nell'ambiente sottostante. Il livello sonoro misurato deve poi essere opportunamente corretto per tenere conto del contributo dell'assorbimento acustico, ottenendo così il livello normalizzato di calpestio.

$$L'_n = L_i + 10 \log \left( \frac{A}{A_0} \right)$$

dove  $L_i$  misura del livello di pressione sonora nell'ambiente ricevente;

$A$  è l'area equivalente di assorbimento acustico;

$A_0$  è posto convenzionalmente pari a  $10\text{m}^2$ .

Tale misurazioni sono determinate anche dal suono che si propaga per trasmissione laterale attraverso gli elementi strutturali collegati al solaio.

La norma secondo cui va effettuata la misurazione in opera del livello normalizzato di calpestio definisce in primo luogo le caratteristiche del generatore normalizzato e stabilisce che esso va posizionato su una superficie piana e non inclinata in almeno quattro punti distinti del pavimento scelti in modo casuale, disponendo il generatore con la linea di caduta dei pesi inclinata di 45° rispetto all'asse delle travi. Nel caso di solai non omogenei, misti o con nervature, l'inclinazione deve essere aumentata secondo le specifiche indicate.

Poiché vari studi hanno evidenziato che il raggiungimento delle condizioni stazionarie nell'ambiente ricevente può avvenire con relativa lentezza è necessario sempre verificare che il livello sonoro sia stabile prima di iniziare la misurazione vera e propria.

La misura del livello di pressione sonora  $L_i$  nell'ambiente ricevente va condotta mediante l'impiego di uno o più microfoni posti in almeno 4 posizioni fisse oppure utilizzando un unico microfono mobile. Nel primo caso i microfoni devono distare almeno 0,7 metri l'uno dall'altro, 0,5 metri dalle pareti e almeno 1 metro dal solaio su cui agisce il generatore a calpestio e che rappresenta la sorgente.

La misura deve avere una durata di almeno 6 secondi per ogni postazione fissa e i livelli devono essere misurati nelle bande di terzo di ottava da almeno 100Hz a 3150Hz, oppure nelle bande di ottava da 125Hz a 2000Hz.

Per la determinazione dell'area equivalente di assorbimento acustico, richiesta per determinare il valore normalizzato, è necessario misurare il tempo di riverberazione nell'ambiente ricevente. Una volta determinato il tempo di riverberazione  $T$  è possibile ricavare l'assorbimento acustico della formula di Sabine. Anche in questo caso è necessario verificare, per ciascuna banda di ottava o terzo di ottava, che siano soddisfatte le condizioni di superamento del rumore di fondodi 10 dB e applicare nel caso contrario le opportune correzioni.

Nella norma è anche previsto il livello di pressione sonora normalizzato rispetto al tempo di riverberazione:

$$L'_{nT} = L_i + 10 \log \left( \frac{T}{T_0} \right)$$

dove  $T$  e  $T_0$  sono gli stessi valori utilizzati per calcolare  $A$  e  $A_0$ .

Al fine di calcolare il livello normalizzato di calpestio è possibile consultare la norma UNI EN 140-14, che contempla diverse situazioni particolari: ad esempio la presenza di due rivestimenti differenti in uno stesso ambiente o ambienti sovrapposti con forme diverse.

### **3.2.3\_UNI EN ISO 3382 : 2008 "Misura del tempo di riverberazione in ambienti ordinari"**

La UNI EN ISO 3382 è divisa in due parti: la parte 1 specifica i metodi per la misurazione del tempo di riverberazione e altri parametri acustici nelle sale da concerto, mentre la parte 2 si riferisce agli ambienti ordinari. In entrambe vengono descritti i procedimenti di misurazione, l'apparecchiatura necessaria, il numero richiesto di posizioni di misurazione e il metodo per la valutazione dei dati.

#### **3.2.3.1\_UNI EN ISO 3382-1 : 2009 "Spazi performanti"**

Nella prima parte della UNI EN ISO 3382 del 2009, come precedentemente accennato, viene stabilito un metodo per misurare il tempo di riverberazione nelle sale che richiedono alte performance acustiche.

In essa è descritto come valutare i tempi di riverberazione dal metodo a impulso o metodo del rumore interrotto. Il tempo di riverberazione è uno dei descrittori delle caratteristiche acustiche delle sale, ma esistono parametri che forniscono un'idea più completa della qualità acustica di un ambiente.

Nell'Appendice A della norma vengono introdotti una serie di parametri che possono essere ricavati dal metodo di misura di risposta all'impulso, e che riguardano lo studio delle caratteristiche di qualità acustica degli auditorium. Tra questi ne troviamo uno menzionato nella UNI 11367, denominato *chiarezza*, che può essere utilizzato per la determinazione del livello di intelligibilità del parlato in un ambiente.

Essa rappresenta un bilancio di energia sonora, tra le riflessioni acustiche precedenti e successive ad un intervallo di tempo: per quanto riguarda la determinazione della nitidezza e possibilità di comprensione di un discorso tale intervallo è fissato in di 50 millisecondi. Questa norma riporta l'equazione per la C50, chiarezza del parlato, precedentemente riportata nel paragrafo 2.6.2.2.

Quest'ultimo indice è stato precedentemente definito come *chiarezza*  $C_{50}$  e questa è la norma che riporta l'equazione precedentemente riportata.

### **3.2.3.1\_UNI EN ISO 3382-2 : 2008 "Ambienti ordinari"**

Nella seconda parte della UNI EN ISO 3382, 2008, sono determinate le procedure di misura del tempo di riverberazione con il metodo del rumore interrotto e con il metodo di risposta all'impulso, ci soffermiamo sul primo metodo.

Il fenomeno della riverberazione è stato definito come la permanenza del suono in un ambiente chiuso, a causa delle successive riflessioni del suono sulle pareti che lo delimitano. Esso dipende quindi dal volume del locale e dalle caratteristiche di assorbimento delle superfici presenti. Il tempo di riverberazione è l'intervallo necessario affinché il livello di pressione sonora in un ambiente diminuisca di 60 dB dal momento in cui viene interrotta l'emissione della sorgente sonora. Tale relazione è rappresentata dalla curva di decadimento, in cui viene definito il livello sonoro in funzione di tempo.

Per la misura del tempo di riverberazione è necessaria una sorgente sonora omnidirezionale in grado di emettere il segnale desiderato e generare un campo diffuso, ed almeno un fonometro in grado di registrare, analizzare e filtrare il segnale acquisito.

Il segnale emesso dalla sorgente dipende dalle finalità delle misurazioni, deve comprendere una gamma di frequenze in terzi di ottava almeno tra i 100 Hz e i 5000 Hz.

Il numero minimo di combinazioni di misura definite nella norma è 6, per valutazioni ingegneristiche: minimo di 2 posizioni della sorgente ad ognuna delle quali corrispondono 3 posizioni del microfono, 2 misure di decadimento in ogni posizione microfonica.

La posizione della sorgente deve essere scelta in accordo all'utilizzo del locale, coerentemente alle emissioni che normalmente vi si producono all'interno.

La distanza dei microfoni dalla più vicina superficie riflettente deve essere almeno di 1 metro, tra gli stessi fonometri di almeno 0,7 metri, la disposizione dei ricevitori all'interno dell'ambiente non deve essere simmetrica.

Posta in funzione la sorgente e raggiunte le condizioni di regime, interrompendo bruscamente l'emissione si registra il decadimento sonoro in secondi. La parte iniziale del decadimento è caratterizzata dalle prime riflessioni e pertanto la norma impone

escludere i primi 5 dB dalla valutazione. Considerata la difficoltà pratica di conseguire 60 dB di decadimento, a causa dei livelli sonori del rumore di fondo, la norma individua come intervallo ottimale di valutazione quello corrispondente ai successivi 30 dB, incorrispondenza dei quali si individua la retta di miglior adattamento e da essa si estrapola il tempo di decadimento sui 60 dB teorici.

Ove per problemi contingenti o per limiti della strumentazione non si disponga di un rapporto segnale-rumore sufficientemente elevato la norma consente di limitare anche a 20 dB l'intervallo di valutazione.

I valori dei tempi di riverberazione ottenuti dalle combinazioni sorgente-fonometro vengono mediati al fine di ottenere un solo valore per ogni frequenza analizzata.

### **3.2.4\_UNI EN 717"Norme per la misurazione degli indici di valutazione dei parametri acustici degli ambienti"**

La valutazione del comportamento acustico di un materiale o di un componente, con riferimento alla sua capacità di isolare dai rumori aerei e da quelli impattivi viene fatta esprimendo i valori in bande di terzi di ottava o, più raramente, in bande di ottava. Tali informazioni risultano utili per comprendere quello che sarà l'effettivo comportamento dell'elemento in esame. Quando invece si tratta di definire dei parametri di riferimento nell'ambito di norme e regolamenti, che riguardano le prestazioni acustiche degli edifici o dei suoi componenti, si utilizza un unico indicatore.

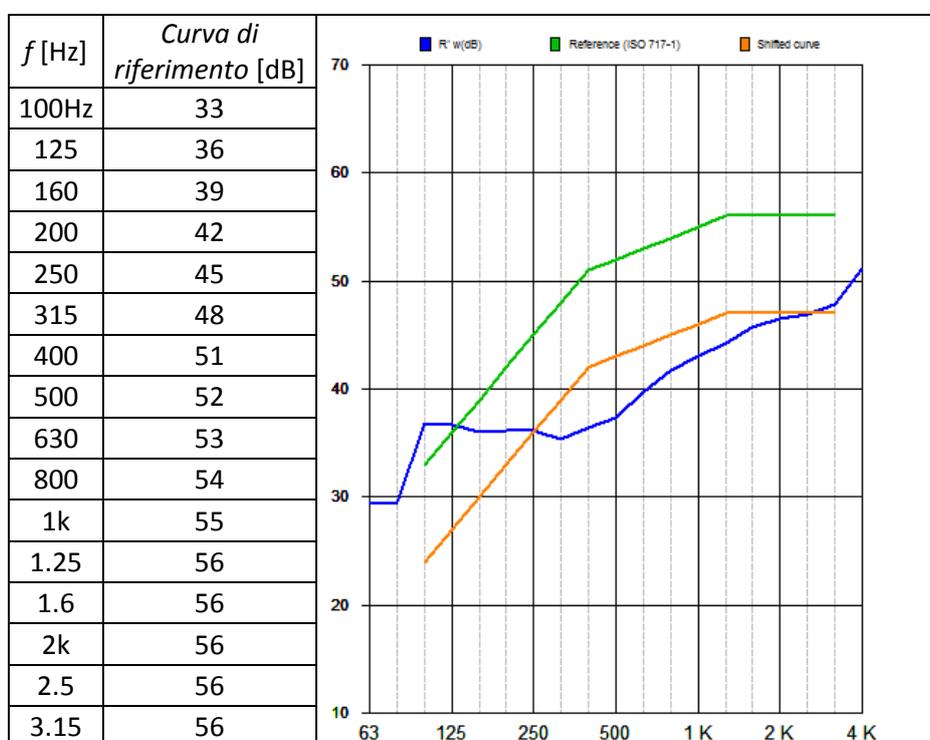
La determinazione degli indici di valutazione può essere effettuata sulla base della norma UNI EN 717-1 per quanto riguarda l'isolamento da rumori aerei e della UNI EN 717-2 per i rumori di tipo impattivo a partire dalla conoscenza dello spettro dei valori misurati e dal loro confronto con le curve di riferimento.

#### **3.2.4.1\_UNI EN 717-1:2013 "Isolamento rumori aerei"**

Per determinare l'indice di valutazione del potere fonoisolante e dell'isolamento acustico di facciata bisogna confrontare la curva ottenuta sperimentalmente, da misure in opera o di laboratorio, con una particolare curva di riferimento che, in certa misura, tiene conto della sensibilità media alle varie frequenze dell'orecchio umano per suoni di media intensità.

La curva di riferimento viene traslata di 1 dB alla volta fino a che la somma degli scarti favorevoli (ovvero di segno positivo) calcolati banda per banda, fra essa e la curva dei valori sperimentali, è la massima possibile ma comunque inferiore a 32 dB. Il confronto tra le due curve viene effettuato graficamente. Il fatto di considerare solo gli scarti favorevoli sta a significare che avere valori sperimentali superiori a quelli della curva di riferimento alle alte frequenze non compensa ad esempio un comportamento meno performante alle basse frequenze. La curva di riferimento è limitata a un intervallo di frequenze compreso tra i 100 e i 3500 Hz.

Tabella 3.8 - Valori della curva di riferimento in frequenza, definiti nella UNI EN 717-1, ed esempio di traslazione della stessa per il calcolo di  $R'_w$



Una volta effettuata la traslazione, l'indice di valutazione caratterizzato da pedice  $w$ , è fornito dal valore assunto dalla curva di riferimento alla frequenza di 500Hz.

La curva di riferimento può essere applicata indifferentemente al potere fonoisolante, al potere fonoisolante apparente e all'isolamento normalizzato di facciata.

Oltre alla determinazione dell'indice di valutazione  $X_w$  la norma prevede la possibilità di definire due ulteriori termini che prendono il nome di *termini di adattamento spettrale*  $C$  e  $C_{tr}$  definiti come segue:

$$C = X_{A,1} - X_w$$

$$C_{tr} = X_{A,2} - X_w$$

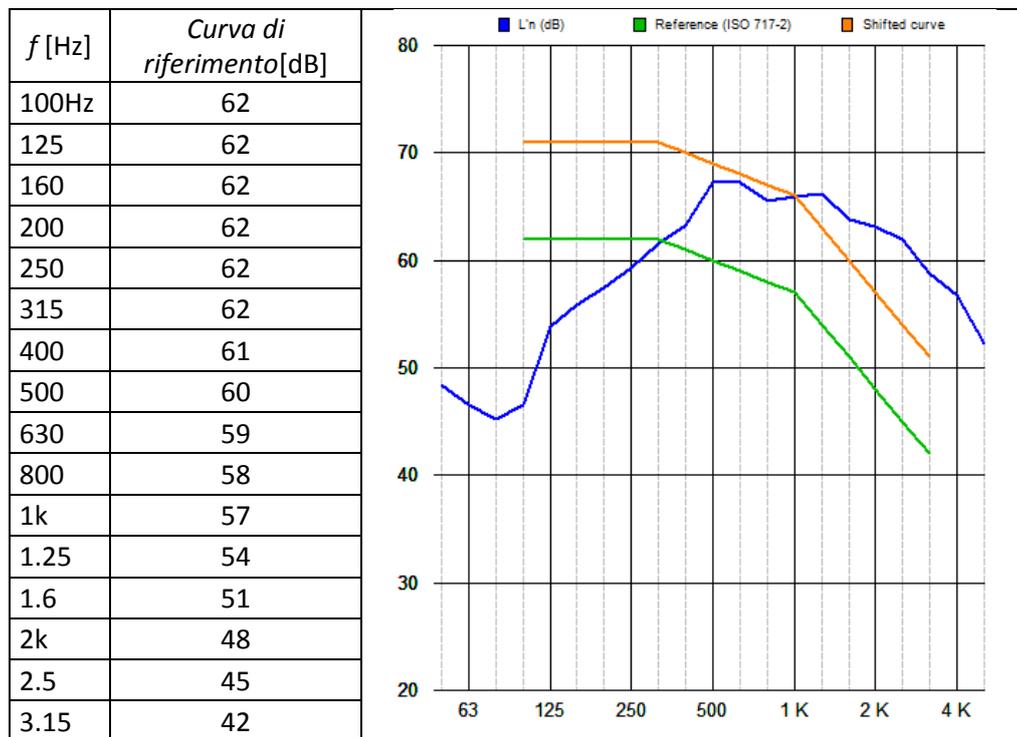
dove  $X_{A,1}$  è la differenza normalizzata del livello di pressione sonora ponderato in scala A fra l'ambiente disturbante e quello disturbato quando lo spettro del segnale emesso è rosa,  $X_{A,2}$  rappresenta la medesima differenza normalizzata nell'ipotesi che lo spettro del rumore emesso sia quello tipico del rumore da traffico, e infine,  $X_w$  rappresenta l'indice di valutazione determinato in precedenza. Pertanto i termini di adattamento sommati all'indice di valutazione forniscono una valutazione convenzionale della differenza di livello ponderato in scala A che si avrebbe se dal lato emittente agisse una sorgente sonora con uno spettro di emissione rosa oppure assimilabile a quello del traffico stradale, fornendo così una descrizione più completa, ma sempre sintetica, dell'effettivo andamento dei valori determinati sperimentalmente che potrebbero non essere adeguatamente descritti dall'indice unico di valutazione.

#### **3.2.4.2\_UNI EN 717-2:2013"Rumori di tipo impattivo"**

La seconda parte della norma UNI EN ISO 717 definisce la procedura per determinare l'indice di valutazione del livello di calpestio normalizzato. L'approccio è del tutto analogo al precedente, ma la forma della curva di riferimento cambia per adeguarsi all'andamento spettrale.

Nel caso del livello di calpestio i valori più bassi corrispondono a prestazioni migliori, gli scarti favorevoli diventano quelli in cui i valori sperimentali sono superiori alla curva di riferimento. Si procede quindi confrontando la curva dei dati sperimentali con la curva di riferimento traslata di 1 dB fino a quando la somma degli scarti sfavorevoli sarà il più grande possibile ma comunque minore di 32dB. Stabilita la posizione di quest'ultima, si ottiene il valore dell'indice di valutazione in dB leggendo il livello di pressione sonora sulla curva di riferimento in corrispondenza della frequenza di 500 Hz.

Tabella 3.9 - Valori della curva di riferimento in frequenza, definiti nella UNI EN 717-2, ed esempio di traslazione della stessa per il calcolo di  $L'_{n,w}$



Il termine di adattamento spettrale  $C_1$  per l'indice di valutazione del livello normalizzato di calpestio  $L'_{n,w}$ , dove il pedice sottolineato si riferisce ai suoni impattivi. Il termine  $C_1$  è definito come la quantità che sommata a  $L'_{n,w}$  fornisce la somma energetica dei livelli  $L'_n$  in bande di terzi di ottava diminuita di 15 dB:

$$C_1 = 10 \log \left( \sum_j 10^{L_j/10} \right) - L'_{n,w} - 15$$

### 3.2.4\_UNI EN 12354 "Valutazioni delle prestazioni acustiche di edifici a partire dalle prestazioni dei prodotti"

La UNI EN 12354 propone un metodo previsionale basato su alcune ipotesi semplificative e permette di stimare i requisiti acustici passivi. L'affidabilità del modello dipende dai dati in ingresso, dalla corrispondenza tra modello e situazione reale, dalla conoscenza del tipo di elementi e dei giunti coinvolti, dall'accuratezza della messa in opera.

Ad oggi non essendo ancora stato emanato il decreto inerente le modalità per la progettazione acustica degli edifici, la normativa UNI EN 12354 rimane il riferimento per una stima dei requisiti.

### 3.2.4.1\_UNI EN 12354-1 "Isolamento dal rumore per via area tra ambienti"

Questa prima parte della norma descrive i modelli di calcolo per valutare l'isolamento dal rumore trasmesso per via aerea tra ambienti, utilizzando principalmente i dati che caratterizzano gli elementi strutturali in funzione della valutazione della propagazione sonora attraverso gli stessi, considerando anche i contributi di trasmissione laterale diretta e indiretta.

Sono definiti due modelli per la determinazione del potere fonoisolante: un modellodettagliato è descritto per il calcolo in bande di frequenza e un modello semplificato utilizzato per calcolare l'indice di valutazione.

Il potere fonoisolante apparente  $R'$  dipende dal suono irradiato dai prodotti di separazione strutturali, dagli elementi laterali e dalla relativa trasmissione sonora diretta e indiretta per via aerea. Il fattore o coefficiente di trasmissione totale può essere suddiviso in diverse componenti:

$$R' = -10 \log \tau'$$
$$\tau' = \tau_d + \sum_{f=1}^n \tau_f + \sum_{e=1}^m \tau_e + \sum_{s=1}^k \tau_s$$

dove i pedici "d", "e", "f" ed "s" si riferiscono ai diversi contributi alla trasmissione sonora e n, m, k si riferiscono rispettivamente al numero degli elementi laterali, degli elementi con trasmissione laterale diretta e indiretta per via aerea.

- $\tau'$  è il fattore di trasmissione definito come il rapporto tra la potenza sonora totale irradiata nell'ambiente ricevente e la potenza sonora incidente sulla parete in comune dell'elemento di separazione.
- $\tau_d$  è il fattore di trasmissione definito come il rapporto tra la potenza sonora irradiata dalla parte in comune dell'elemento di separazione e la potenza sonora incidente sulla parte in comune dell'elemento di separazione. Comprende i percorsi  $D_d$  e  $F_d$  illustrati nella figura sottostante.

- $\tau_f$  è il fattore di trasmissione definito come il rapporto tra la potenza sonora irradiata dall'elemento laterale  $f$  nell'ambiente ricevente e la potenza sonora incidente sulla parte in comune dell'elemento di separazione. Comprende i percorsi  $D_f$  e  $F_d$  illustrati.
- $\tau_e$  è il fattore di trasmissione definito come rapporto tra la potenza sonora irradiata nell'ambiente ricevente da un elemento nell'elemento di separazione, dovuta alla trasmissione diretta per via aerea del rumore incidente su questo elemento, e la potenza sonora incidente sulla parte in comune dell'elemento di separazione.
- $\tau_s$  è il fattore di trasmissione definito come rapporto tra la potenza sonora irradiata nell'ambiente ricevente, dovuta alla trasmissione indiretta per via aerea del rumore incidente su questo sistema di trasmissione, e la potenza sonora incidente sulla parete in comune dell'elemento di separazione.

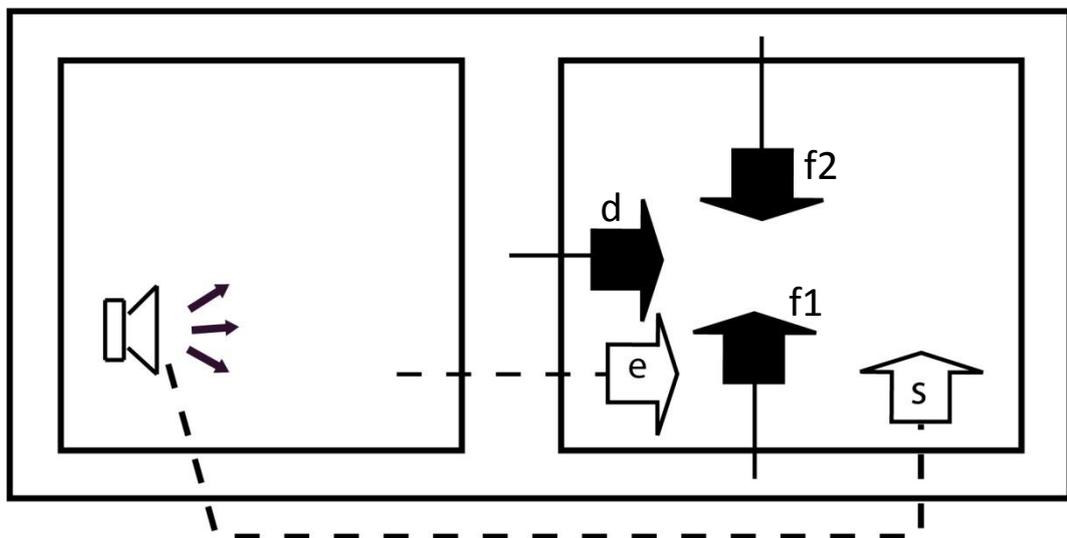


Figura 3.2- Illustrazione dei diversi contributi alla trasmissione sonora totale ad un ambiente

Il suono irradiato da un elemento strutturale può essere considerato come la somma delle trasmissioni sonore per via strutturale attraverso i diversi percorsi considerati indipendenti.

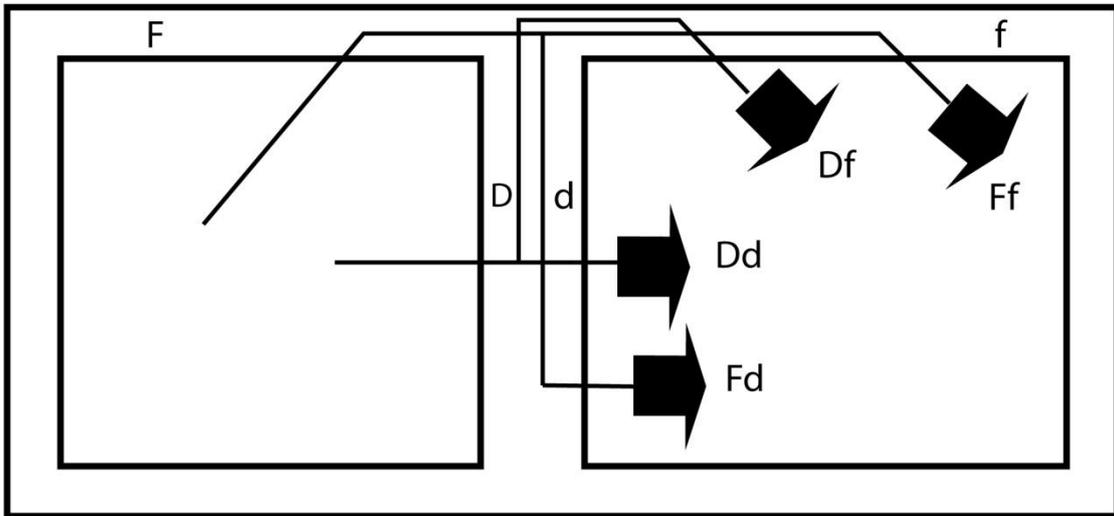


Figura 3.3 - Percorsi di trasmissione sonora tra i due ambienti

Un'altra ipotesi necessaria, per l'utilizzo dei metodi previsionali, riguarda i campi sonori e vibratorie che si generano nell'ambiente, il cui comportamento è determinato su basi statistiche.

Il modello dettagliato tratta separatamente la trasmissione per via strutturale, diretta e laterale, e la trasmissione per via aerea. I dati di ingresso necessari, per eseguire i calcoli, sono i poteri fonoisolanti degli elementi costruttivi, i relativi dati geometrici e i coefficienti di riduzione indicati nella norma.

Il potere fonoisolante per la trasmissione strutturale diretta è dato dalla seguente relazione:

$$R_{Dd} = R_{s,situ} + \Delta R_{D,situ} + \Delta R_{d,situ}$$

dove i valori in ingresso sono  $R_s$  che è il potere fonoisolante dell'elemento di separazione,  $\Delta R_D$  e  $\Delta R_d$  che sono gli incrementi del potere fonoisolante dovuto a strati addizionali per l'elemento di separazione nell'ambiente emittente e/o ricevente. Questi ultimi devono essere convertiti da valori in ingresso a valori in opera tramite la formula:

$$R_{situ} = R - 10 \log \frac{T_{s,situ}}{T_{s,lab}}$$

dove  $T_{s,situ}$  e  $T_{s,lab}$  sono i tempi di riverberazione strutturale dell'elemento in opera e in laboratorio.

Il potere fonoisolante per la trasmissione strutturale laterale è determinato dai valori in ingresso corretti secondo quanto segue, con  $ij = Ff, Fd$  e  $Df$ :

$$R_{ij} = \frac{R_{i,situ}}{2} + \Delta R_{i,situ} + \frac{R_{j,situ}}{2} + \Delta R_{j,situ} + D_{v,ij,situ} + 10 \log \frac{S_s}{\sqrt{S_i S_j}}$$

dove  $R_i$  e  $R_j$ , sono il potere fonoisolante dell'elemento  $i$  e  $j$  nell'ambiente emittente e ricevente;  $\Delta R_i$  e  $\Delta R_j$  rappresentano l'incremento del potere fonoisolante mediante strati addizionali per l'elemento  $i$  nell'ambiente emittente e/o l'elemento  $j$  in quello ricevente.  $D_{v,ij,situ}$  è l'indice di riduzione delle vibrazioni in opera.

$S_s, S_i$  e  $S_j$  sono l'area dell'elemento di separazione, dell'elemento  $i$  nell'ambiente emittente, dell'elemento  $j$  nell'ambiente ricevente.

Per quanto riguarda il modello dettagliato per il calcolo di  $R$  riferito alla trasmissione per via aerea, l'unico metodo disponibile riguarda la trasmissione diretta misurata per piccoli elementi  $D_{n,e}$ , calcolata utilizzando la relazione che ricava  $R$  normalizzato in funzione del coefficiente di trasmissione  $\tau_e$ .

La versione semplificata del modello prevede il calcolo dell'indice di valutazione del potere fonoisolante, sulla base degli indici degli elementi coinvolti e in conformità con la EN ISO 717-1. Viene quindi calcolato  $R'_w$ , a partire dai valori del potere fonoisolante  $R_{Dd}$  e del potere fonoisolante relativo a diversi percorsi di trasmissione strutturale:

$$R'_w = -10 \log \left( 10^{\frac{-R_{Dd,w}}{10}} + \sum 10^{\frac{-R_{Ff,w}}{10}} + \sum 10^{\frac{-R_{Df,w}}{10}} + \sum 10^{\frac{-R_{Fd,w}}{10}} \right)$$

Gli indici del potere fonoisolante riferito ai percorsi laterali,  $ij = Ff, Fd$  e  $Df$ , sono determinati con la seguente equazione:

$$R_{ij,w} = \frac{R_{i,w} + R_{j,w}}{2} + \Delta R_{ij,w} + K_{ij} + 10 \log \frac{S_s}{l_0 l_f}$$

dove  $K_{ij}$  è l'indice di riduzione delle vibrazioni che dipende dal tipo di giunto di lunghezza  $l_f$ ,  $l_0$  è la lunghezza di riferimento pari a 1 metro.

Il modello semplificato presuppone prodotti per i quali l'incremento del potere fonoisolante dipende in modo simile dalla frequenza; nel caso presentino un comportamento di frequenza deviante, l'accuratezza può risultare inferiore.

### 3.2.4.2\_UNI EN 12354-2 "Isolamento acustico al calpestio tra ambienti"

Nella seconda parte della norma vengono definiti i modelli di calcolo per valutare l'isolamento acustico al calpestio tra ambienti sovrapposti, basandosi principalmente sulle caratteristiche di trasmissione diretta e laterale indiretta. Il suono irradiato da ciascun elemento strutturale è generato da una sorgente al calpestio posta sul solaio sovrastante l'ambiente ricevente. Si suppone che le modalità di trasmissione possano essere

considerate indipendenti e che i campi sonori e vibratori possano essere determinati in modo statistico.

Il livello di pressione sonora di calpestio normalizzato rispetto all'assorbimento acustico,  $L'_n$ , può essere ottenuto sommando i contributi di trasmissione diretta e laterale indiretta, rispettivamente i percorsi  $d$  ed  $f$  rappresentati in figura 3.4.

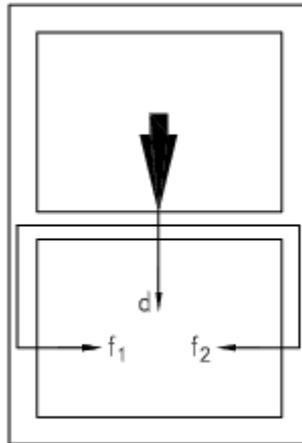


Figura 3.4- Percorsi di trasmissione sonora tra ambienti sovrapposti

Il livello di calpestio normalizzato  $L'_n$  nell'ambiente ricevente è determinato mediante la seguente formula:

$$L'_n = 10 \log \left( 10^{\frac{L_{n,d}}{10}} + \sum_{j=1}^n 10^{\frac{L_{n,ij}}{10}} \right)$$

dove:

$L_{n,d}$  è il livello di pressione sonora di calpestio normalizzato per trasmissione diretta;

$L_{n,ij}$  è il livello di pressione sonora di calpestio normalizzato per trasmissione laterale

Per determinare con il modello dettagliato il livello per trasmissione diretta sommo i seguenti componenti:

$$L_{n,d} = L_{n,situ} + \Delta L_{situ} - \Delta L_{d,situ}$$

$L_n$  è il livello di pressione sonora di calpestio normalizzato del solaio;

$\Delta L$  è l'attenuazione del livello di pressione sonora di calpestio dovuto al rivestimento di pavimentazione;

$\Delta L_d$  è l'attenuazione del livello di pressione sonora di calpestio dovuto a rivestimenti supplementari sul lato ricevente dell'elemento divisorio.

Tali elementi sono convertiti in valori in opera tramite la relazione:

$$L_{n,situ} = L_n + 10 \log \frac{T_{s,situ}}{T_{s,lab}}$$

Mentre in riferimento alla trasmissione laterale dell'elemento divisorio  $i$ , all'elemento laterale  $j$ , il livello di pressione sonora di calpestio normalizzato è dato:

$$L_{n,ij} = L_{n,situ} - \Delta L_{situ} + \frac{R_{i,situ} - R_{j,situ}}{2} - \Delta R_{j,situ} - D_{v,ij,situ} - 10 \log \sqrt{\frac{S_i}{S_j}}$$

dove:

$R_i$  è il potere fonoisolante del solaio convertito in opera;

$R_j$  è il potere fonoisolante per trasmissione diretta dell'elemento laterale  $j$  nell'ambiente ricevente;

$\Delta R_j$  è l'incremento del potere fonoisolante dovuto ai rivestimenti interni dell'elemento laterale  $j$  nell'ambiente ricevente;

$D_{v,ij,situ}$  è l'indice di riduzione delle vibrazioni dei giunti;

$S_i$  è l'area dell'elemento eccitato;

$S_j$  è l'area dell'elemento irradiante dell'ambiente ricevente, in metri quadri.

Dai valori di  $L_{n,ij}$  ottenuti segue il calcolo dell'indice di valutazione.

Tale modello è applicabile unicamente a combinazioni di elementi il cui indice di trasmissione del giunto è noto o può essere stimato a partire da valori conosciuti; gli elementi dovrebbero avere approssimativamente le stesse caratteristiche di irradiazione sonora su entrambi i lati; il contributo delle vie di trasmissione secondarie, che comprendono più di un giunto sono ignorate.

La versione semplificata del modello prevede l'indice di valutazione del livello di pressione sonora di calpestio normalizzato ottenuto sulla base degli indici di valutazione degli elementi considerati, determinati in conformità alla UNI EN 717-2.

La sua applicazione è limitata agli ambienti sovrapposti e ai pavimenti omogenei di uso comune. L'influenza dello smorzamento strutturale è considerato in modo mediato, ignorando la specificità della situazione; la trasmissione laterale è considerata in modo globale, sulla base dei calcoli effettuati nel modello dettagliato.

$$L'_{n,w} = L'_{n,w,eq} - \Delta L_w + K$$

dove:

$L'_{n,w,eq}$  è l'indice di valutazione del livello equivalente di pressione sonora di calpestio normalizzato del pavimento;

$\Delta L_w$  è l'indice di valutazione dell'attenuazione del livello di pressione dovuta al rivestimento;

$K$  è la correzione per la trasmissione dei rumori di calpestio in dB, attraverso elementi costruttivi laterali omogenei.

### **3.2.4.3\_UNI EN 12354-3 "Isolamento acustico contro il rumore proveniente dall'esterno per via aerea"**

La norma definisce un modello di calcolo per valutare l'isolamento acustico di una facciata o di una diversa superficie esterna di un edificio. Il calcolo è basato sul potere fonoisolante dei diversi elementi che costituiscono la facciata e considera la trasmissione diretta e laterale. Il calcolo fornisce dei risultati che corrispondono approssimativamente ai risultati ottenuti con misurazioni in opera, conformemente a quanto indicato dalla UNI EN ISO 140-5.

I calcoli possono essere eseguiti per bande di frequenza o utilizzando gli indici di valutazione.

Si presuppone che la trasmissione di ogni elemento sia indipendente da quella degli altri componenti costituenti la facciata in oggetto di valutazione. Si considera inoltre il campo sonoro esterno diffuso.

Il potere fonoisolante apparente della facciata è definito dalla somma tra la potenza sonora trasmessa in modo diretto da ciascuno degli elementi e la potenza sonora trasmessa mediante trasmissione laterale.

$$R' = -10 \log \left( \sum_{i=1}^n \tau_{e,i} + \sum_{i=1}^n \tau_f \right)$$

dove:

- $\tau_{e,i}$  è il fattore di trasmissione della potenza sonora irradiato da un elemento  $i$  di facciata, dovuto alla trasmissione diretta del suono incidente su tale elemento, e la potenza sonora incidente sull'intera facciata. Può essere determinato per ciascun elemento di facciata direttamente a partire dai dati acustici di quell'elemento, includendo il contributo di ciascun componente.

- $\tau_f$  è il fattore di trasmissione laterale della potenza sonora. Si ottiene a partire dalla somma dei coefficienti di trasmissione laterale di tutti gli elementi. Il contributo della trasmissione laterale è trascurabile, salvo la presenza di collegamenti rigidi all'interno dell'ambiente ricevente;
- $n$  è il numero di elementi della facciata per la trasmissione diretta;
- $m$  è il numero degli elementi della facciata.

L'isolamento acustico di facciata normalizzato rispetto al tempo di riverberazione dipende dal potere fonoisolante della facciata stessa, dalla forma esterna della parete e dalle dimensioni degli ambienti.

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

dove  $V$  è il volume dell'ambiente ricevente,  $S$  è l'area totale della facciata vista dall'interno,  $\Delta L_{fs}$  è la differenza del livello di pressione sonora per la forma della facciata,  $T_0$  è pari a 0,5 secondi,  $V$  è il volume dell'ambiente ricevente e  $S$  l'area dell'elemento di edificio.

Tale modello può essere utilizzato sia per calcolare le prestazioni di un edificio in bande di frequenza, sia per calcolare in modo diretto l'indice di valutazione  $D_{2m,nT,w}$ , a partire dagli indici di valutazione degli elementi che compongono la facciata.

#### **4\_Requisiti acustici nell'edilizia scolastica**

I requisiti acustici rivestono una particolare importanza nella progettazione degli edifici scolastici, poiché le attività che si svolgono all'interno necessitano di una qualità della comunicazione e dell'intelligibilità del parlato elevata. La presenza di rumori indesiderati nelle aule, durante le ore di lezione, ha degli effetti sull'apprendimento e sulle prestazioni scolastiche degli studenti, inoltre determina condizioni sfavorevoli per l'insegnamento.

L'obiettivo della progettazione acustica è pertanto quello di assicurare un'elevata qualità della comunicazione all'interno degli ambienti destinati alla didattica.

Questo può essere raggiunto rispettando i limiti dei requisiti acustici passivi ed altri parametri utili, già introdotti dalla normativa.

Il tempo di riverberazione è un fattore che influenza la qualità della comunicazione e vi sono studi che ne definiscono i valori ottimali. L'Organizzazione mondiale della sanità (WHO) suggerisce tempi di riverberazione nell'ordine di 0,6 secondi; la normativa tecnica di paesi come Gran Bretagna, Stati Uniti, Svizzera, Francia e Svezia, indica generalmente per volumi inferiori ai 250 m<sup>3</sup>, valori tra 0,4 e 0,8 secondi alle medie frequenze, 0,6 secondi a 500 Hz. Non è consigliabile raggiungere valori inferiori a 0,4 secondi poiché una riduzione eccessiva implica una limitazione del livello sonoro della voce dell'insegnante verso il fondo dell'aula.

La rumorosità interna è un'altro parametro da controllare per garantire la buona comprensione della parola e un buon confort acustico all'interno degli ambienti scolastici. Il DPCM del 14/11/1997, oltre a fissare limiti di immissione per le diverse zone acustiche, stabilisce un valore limite relativo al livello sonoro equivalente presente all'interno degli ambienti nel periodo diurno, pari a 45 dB(A), misurato al centro della stanza vuota e finestre chiuse. Soglia che l'Organizzazione mondiale della sanità fissa a 35 dB(A) per le aule didattiche.

Per quantificare il livello di confort acustico di un'aula è stato definito l'indice STI, introdotto nel capitolo 2.6.2.1. Quest'ultimo determina in maniera oggettiva l'intelligibilità del parlato in un punto dell'ambiente. Nelle aule la norma EN 60268-16, per ragazzi normo udenti, propone un intervallo di STI tra 0,58 e 0,66, per ambienti destinati all'insegnamento non in madre lingua tra 0,68 e 0,86.

#### **4.1\_Edilizia scolastica in Italia**

Tra gli edifici scolastici italiani, più della metà delle strutture sono di costruzione antecedente gli anni '70. Salvo pochi interventi di adeguamento eseguiti in questi ultimi anni da amministrazioni virtuose ed attente, il patrimonio scolastico nella sua complessità non offre adeguate risposte alla qualità acustica degli ambienti. In molti casi, infatti, non è presente un progetto acustico seppur richiesto dalle normative vigenti.

Nove scuole su dieci in Italia registrano all'interno degli ambienti livelli di rumore fuori norma e al di sopra delle prassi europee.

Negli ultimi anni anche in Italia è cresciuta l'attenzione dei media e della politica nei confronti della situazione inadeguata in cui ci trova l'edilizia scolastica italiana, anche a seguito di spiacevoli fatti di cronaca.

Nel mese di Gennaio 2014 il Governo in carica ha aggiornato, nell'ambito della "Legge di stabilità", i parametri specifici di valutazione delle istanze relative alla ripartizione della quota Irpef dell'otto per mille a diretta gestione statale per l'anno 2014. Il decreto del Segretario generale della Presidenza del Consiglio dei Ministri del 14 Gennaio 2014 ha previsto un'ulteriore categoria beneficiaria rispetto alle precedenti che riguarda gli interventi a favore dell'edilizia scolastica.

L'adeguamento della qualità acustica delle scuole rientra tra i "Progetti di ristrutturazione o miglioramento volti ad adeguare l'idoneità igienico sanitaria dell'edificio". Questi progetti, tra altre cinque tipologie, in una scala da 0 a 100 sono valutati con "PESO 15". Questa iniziativa parlamentare ha portato al possibile stanziamento di 1,5 miliardi di euro destinati ad interventi migliorativi o di adeguamento sul patrimonio edilizio scolastico.

In quest'ottica il Dipartimento di Ingegneria Industriale ha iniziato una attività di collaborazione con la scuola media Galileo Galilei, presso il Comune di Casalecchio di Reno, nell'ambito di una verifica dei requisiti acustici dell'edificio e di eventuali miglioramenti realizzabili.

## 5 \_ Misure, risultati e considerazioni del caso di studio

L'edificio di cui sono state valutate le prestazioni acustiche, come accennato nel capitolo 4.1, è la scuola media Galileo Galilei, progettata dagli architetti Giuseppe Boschi e Luciano Lullini, i cui elaborati di progetto risalgono agli inizi degli anni '70.

Nell'ambito della zonizzazione acustica comunale il complesso è localizzato in classe III, aree di tipo misto, in cui rientrano le aree urbane interessate da traffico veicolare locale o di attraversamento, con media densità di popolazione e assenza di attività industriali. Ciò significa che i limiti di immissione di rumore delle sorgenti sono di 60 dBA per il livello equivalente sonoro diurno e di 50 dBA per quello notturno.



Figura 5.1 - Scuola media Galileo Galilei



Figura 5.2 - Foto dell'esterno del complesso

Gli ambienti sono distribuiti su tre livelli parzialmente sovrapposti.

La struttura dell'edificio è in cemento armato non intonacato, le finestre sono disposte a nastro lungo le pareti esterne e sostenute da un telaio in alluminio verniciato di rosso. Sotto gli infissi scorre un elemento sporgente obliquo in cemento armato che ripara le vetrate dalle intemperie. All'interno del complesso sono presenti degli spazi quadrati, aperti in sommità e vetriati, con un

area di circa 17 mq, probabilmente progettati per aumentare la superficie illuminata.

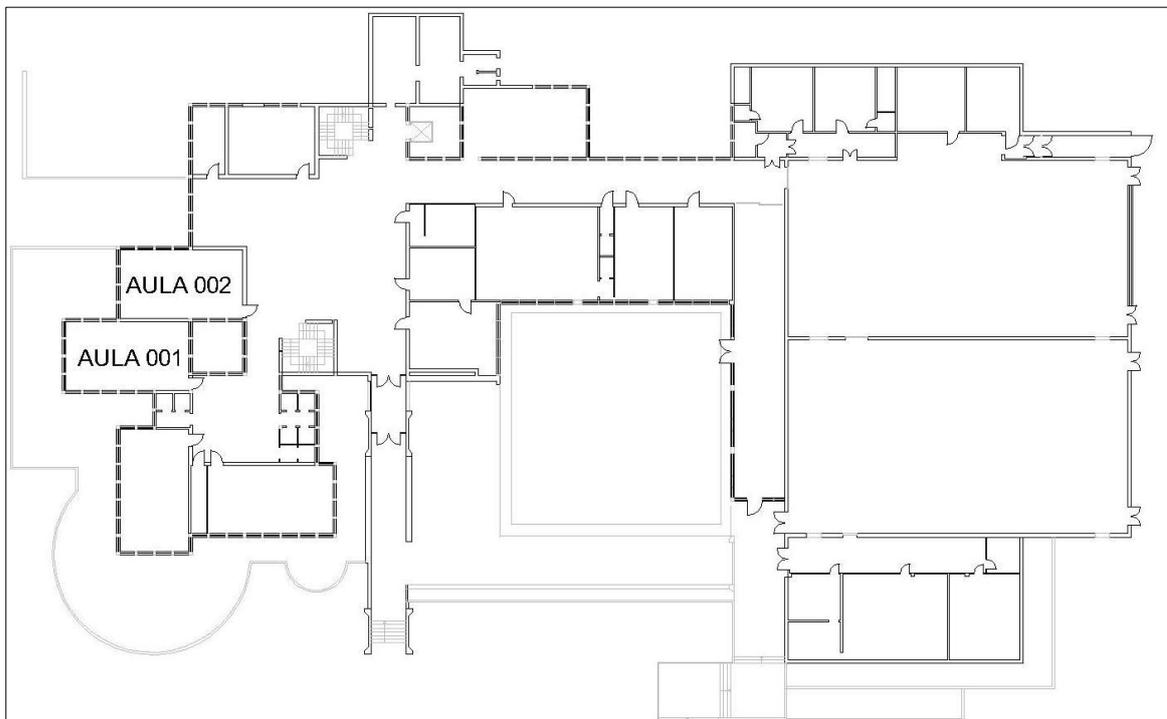


Figura 5.3- Pianta del piano terra

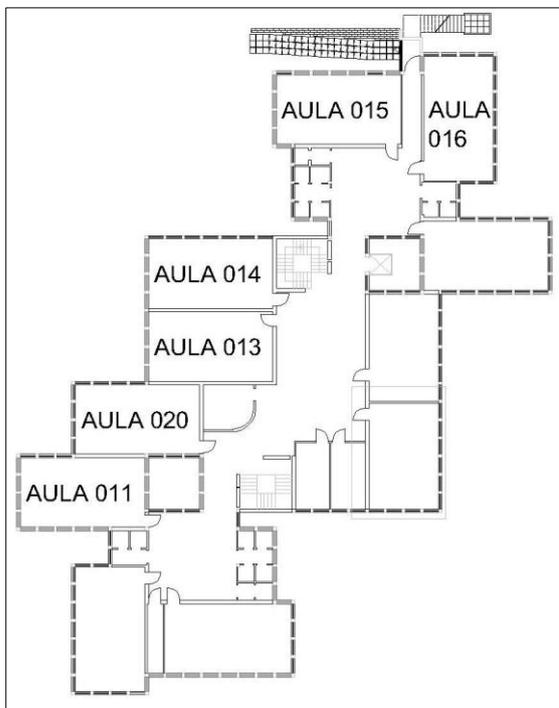


Figura 5.4- Pianta del piano terra

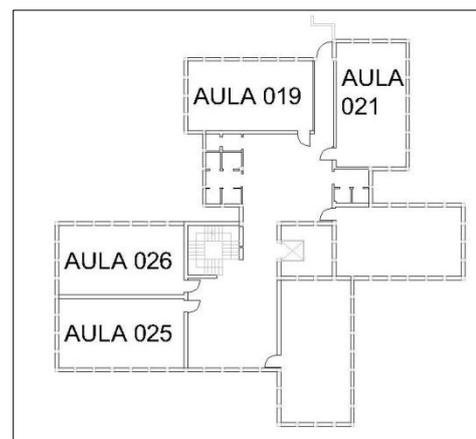


Figura 5.5 - Pianta del piano terra

I localidi cui sono state misurate e analizzatele prestazioni acustiche sono le classipresenti in tutti e tre i piani.

Le aule sono costituite da un modulo spaziale che presenta dimensioni pressoché costanti: il volume è di circa  $178\text{m}^3$ , la superficie calpestabile è  $58\text{m}^2$ , la distanza tra il piano del pavimento e l'intradosso del soffitto è 3 metri. Essendo le aule disposte in tre piani in maniera non regolare, gli elementi costruttivi che delimitano gli ambienti sono gli stessi ma distribuiti diversamente. La stratigrafia delle pareti e dei solai è stata determinata in maniera diretta effettuando dei sopralluoghi con il personale tecnico dell'ente manutentore, responsabile dell'edilizia scolastica del Comune di Casalecchio di Reno, Adopera Srl, e in maniera indiretta attraverso la documentazione pervenuta presso gli archivi dello stesso ente.

- La struttura di sostegno è in cemento armato: pilastri  $30 \times 40$  cm e travi perimetrali tipo veletta.
- Le pareti esterne sono parte delle travi veletta in cemento armato, i cui elementi verticali in corrispondenza delle finestrate hanno uno spessore di circa 10 cm; l'isolamento è costituito da pannelli in polistirene espanso estruso di spessore pari a 5 cm, attaccato con silicone; vi è un pannello in alluminio laminato che copre il cassettoni superiore, spessore di 0,55 cm, e sotto le finestre sono alloggiati i radiatori.
- Le finestre a nastro sono costituite da telai formati da profilati a sagoma tubolare in alluminio, con ponte termico interrotto e vetrocamera 3+3 (PVB 0,38), con camera interna di 12 mm di spessore.
- I falsi pilastri in lamiera, posizionati tra i pilastri portanti, hanno dimensioni di  $30 \times 40$  cm e sono isolati con un riempimento in perline di polistirolo e sigillatura superiore formata da uno strato di poliuretano espanso di 5 cm.
- I tramezzi hanno uno spessore di 29 cm, composti da due blocchi forati in laterizio, spessore 12 cm, divisi da un intercapedine d'aria di 2 cm.
- I solai sono in laterocemento, con uno spessore intorno ai 40 cm. Si è esclusa la presenza di un massetto fonoisolante a fronte dei risultati conseguiti nelle misurazioni del relativo potere fonoisolante apparente orizzontale e dei livelli sonori di calpestio. Il pavimento è costituito da piastrelle in ceramica  $15 \times 15$  cm.



*Figura 5.3 - L'immagine mostra la disposizione delle superfici e degli arredi dell'aula 001*

Le grandezze misurate sono quelle menzionate e descritte nel DPCM del '97 e nella norma UNI 11367:

- il tempo di riverberazione delle aule arredate;
- il potere fonoisolante apparente delle pareti di separazione di due aule;
- il potere fonoisolante apparente del solaio di separazione di due aule;
- il livello normalizzato di calpestio riferito al solaio di separazione di due aule;
- l'isolamento acustico per via aerea delle facciate delle aule;
- l'indice di intelligibilità delle aule, attraverso la misura dell'indice STI.

I metodi di misura in opera dei descrittori dei suddetti parametri sono esposti rispettivamente nelle normative tecniche UNI EN ISO 3382-2, UNI EN ISO 16283-1, UNI EN ISO 140-5 e 7, nello standard europeo IEC 60268-16.

## **5.1\_Misure dei tempi di riverberazione**

### **5.1.1\_Strumentazione utilizzata**

Secondo il DM del 16 Marzo 1998, "Tecniche di rilevamento e di misurazione dell'inquinamento acustico", la strumentazione di misura deve essere scelta in modo da

soddisfare le specifiche di cui alla classe 1 delle norme EN 60651/1994 e EN 60804/1994.

Per misurare il tempo di riverberazione degli ambienti è stato utilizzata come sorgente sonora elettroacustica il diffusore omnidirezionale, modello LookLine, dotato di 12 altoparlanti disposti sui lati di un dodecaedro in grado di emettere un campo sonoro sufficientemente diffuso, conforme alle richieste delle norme ISO 16283 e ISO 3382.

I due fonometri utilizzati per l'acquisizione dei suoni sono entrambi modello bicanale Solo Black, permettono la misura dei livelli di pressione sonora, l'analisi e l'acquisizione del segnale sonoro in frequenza.

La strumentazione è controllata in parallelo via wireless, tramite bluetooth, da un computer presente in una postazione mobile esterna agli ambienti, questo grazie al software dBSolo-B.



*Figura 5.4-Diffusore omnidirezionale, modello LookLine, e fonometro bicanale, modello Solo Black*

I dati ottenuti verranno poi mediati ed elaborati con il software dBati dedicato alle misure di acustica edilizia.

### 5.1.2\_Procedura di misura

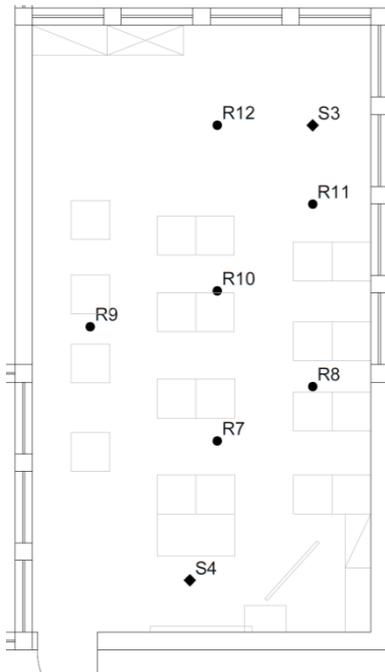


Figura 5.5 - Aula 002: posizioni microfoniche R e della sorgente S

La misura dei tempi di riverberazione delle aule sono stati eseguiti ponendo nell'ambiente arredato in oggetto, sia il dodecaedro che entrambi i fonometri. La determinazione delle posizioni dei punti di misura è stata fatta secondo gli stessi criteri di calcolo del potere fonoisolante apparente: rispettando una distanza minima di 0,5 metri dalle pareti, una distanza minima tra microfoni di 0,7 metri e di 1 metro dalla sorgente, cercando di ottenere una distribuzione omogenea nell'ambiente delle posizioni microfoniche.

Accesa la sorgente, per ogni misura è stata prevista un'attesa di 2 secondi dall'inizio dell'acquisizione, trascorsi i quali è stato spento il dodecaedro. Da questo punto inizia il calcolo del tempo di decadimento del campo sonoro all'interno dell'aula. Sono state

effettuate 2 misurazioni per ognuna delle 6 posizioni dei fonometri, mettendo la sorgente in due diversi punti, ottenendo un totale di 24 misure. Nella *Tabella 5.1*, a titolo di esempio, sono illustrati i risultati delle misure ottenute nell'aula 002 e gli schemi dei punti di misura nell'ambiente, figura 5.5.



Figura 5.6 - L'indicazione dei punti di misura è stata fatta applicando delle etichette alla pavimentazione

Le misurazioni acquisite sono state corrette e controllate sui relativi grafici del tempo di decadimento, spostando sulle curve l'istante iniziale e/o finale della retta, con l'ausilio del software dBati.

Tabella 5.1 - I valori delle 24 combinazioni di misura del T60 in secondi

f[Hz]	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24
50	1,2	1,35	4,04	1,06	0,94	1,32	1,23	0,78	0,74	0,49	1,13	0,63	1,1	0,74	1,42	0,96	1,58	1,38	1,87	1,15	1,26	1,88	1,69	2,11
63	1,39	1,22	1,56	1,33	1,02	1,35	1,02	2,73	1,48	1,3	1,22	1,43	1,58	0,8	1,48	3,04	1,37	1,06	1,32	0,9	1,13	2,11	1,84	1,2
80	1,52	1,32	1,02	0,98	1,12	0,99	1,04	1,5	1,22	0,78	0,71	0,74	1,46	1,35	1,3	2,32	0,87	0,68	0,82	0,6	1,26	0,79	1,22	1,24
100	0,9	0,77	0,92	0,94	1,25	0,97	1,03	0,56	0,65	0,57	0,53	0,93	0,95	0,91	0,62	0,67	0,89	1,02	0,89	0,69	0,88	1,05	1,21	0,75
125	0,89	1,51	1,18	1,08	1,27	1,07	1,69	0,79	1,12	1,04	0,94	0,94	1,73	1,43	1,31	1,24	1,12	1,35	1,28	1,3	1,28	1,92	1,35	1,23
160	0,98	1,23	0,57	1,2	1,3	1,18	0,97	1,23	0,87	0,97	1,12	1,35	1,34	0,99	1,42	1,06	1,18	1,24	1,14	1,18	1,21	1,29	1,1	1
200	1,04	1,22	1,32	1,08	1,21	1,27	1,19	1,24	1,19	1,33	1,25	1,3	1,38	1,14	1,55	1,43	1,07	1,35	1,05	1,28	1,34	1,21	1,45	1,25
250	1,01	1,29	1,18	1,41	1,33	1,32	1,45	1,15	1,35	1,41	1,53	1,25	1,47	1,38	1,39	1,32	1,2	1,44	1,29	1,41	1,38	1,48	1,45	1,21
315	1,42	1,42	1,73	1,6	1,38	1,33	1,49	1,38	1,32	1,46	1,43	1,79	1,45	1,58	1,16	2,05	1,32	1,43	1,4	1,48	1,53	1,5	1,51	1,45
400	1,22	1,51	1,55	1,24	1,23	1,48	1,34	1,33	1,47	1,29	1,31	1,31	1,44	1,5	1,28	1,29	1,24	1,23	1,55	1,44	1,36	1,42	1,49	1,39
500	1,11	1,14	0,96	1,06	1,07	1,05	1,2	1,04	1,08	1,13	1,18	1,2	1,22	1,18	1,23	1,21	1,12	1,09	1,25	1,04	1,13	1,25	1,21	0,97
630	1,29	1,22	1,2	1,18	1,4	1,24	1,24	1,31	1,28	1,29	1,25	1,29	1,22	1,23	1,19	1,27	1,17	1,21	1,32	1,24	1,19	1,25	1,24	1,24
800	1,42	1,47	1,45	1,45	1,41	1,44	1,42	1,44	1,43	1,52	1,43	1,46	1,46	1,45	1,44	1,36	1,39	1,44	1,39	1,44	1,5	1,53	1,42	1,37
1 k	1,59	1,58	1,49	1,7	1,52	1,57	1,52	1,54	1,6	1,58	1,53	1,55	1,54	1,57	1,55	1,61	1,5	1,53	1,51	1,61	1,6	1,66	1,61	1,57
1.25 k	1,71	1,75	1,84	1,64	1,75	1,66	1,7	1,74	1,74	1,76	1,71	1,74	1,76	1,74	1,75	1,73	1,73	1,68	1,7	1,81	1,79	1,8	1,81	1,77
1.6 k	1,84	1,83	1,78	1,82	1,88	1,79	1,81	1,82	1,87	1,83	1,85	1,82	1,84	1,87	1,87	1,82	1,87	1,81	1,83	1,86	1,83	1,82	1,83	1,84
2 k	1,85	1,84	1,92	1,92	1,87	1,8	1,85	1,86	1,84	1,89	1,87	1,84	1,83	1,88	1,84	1,86	1,86	1,81	1,84	1,87	1,82	1,86	1,92	1,82
2.5 k	1,81	1,82	1,88	1,77	1,8	1,85	1,85	1,81	1,82	1,86	1,87	1,93	1,79	1,89	1,82	1,85	1,8	1,82	1,81	1,84	1,84	1,8	1,81	1,79
3.15 k	1,77	1,82	1,77	1,71	1,82	1,76	1,76	1,77	1,83	1,89	1,77	1,9	1,74	1,81	1,77	1,79	1,78	1,73	1,77	1,82	1,76	1,74	1,78	1,76
4 k	1,7	1,68	1,67	1,65	1,68	1,65	1,69	1,69	1,72	1,77	1,71	1,7	1,65	1,73	1,66	1,68	1,68	1,65	1,69	1,66	1,66	1,68	1,69	1,66
5 k	1,56	1,55	1,56	1,53	1,53	1,54	1,54	1,54	1,76	1,78	1,59	1,56	1,56	1,57	1,57	1,53	1,52	1,51	1,53	1,54	1,54	1,57	1,56	1,52

Tali risultati sono stati mediati per ottenere un unico valore del tempo di riverberazione per ogni banda di frequenza, *Tabella 5.2*.

Tabella 5.2 - I valori dei tempi di riverbero dell'aula 002 per frequenza

f[Hz]	100	125	160	200	250	315	400	500	630	800	1 k	1.25 k	1.6 k	2 k	2.5 k	3.15 k
T60 [sec]	0,86	1,25	1,13	1,26	1,34	1,48	1,37	1,13	1,25	1,44	1,57	1,74	1,83	1,86	1,83	1,78

### 5.1.3\_Riepilogo dati e considerazioni

Di seguito sono riportate le misure dei tempi di riverberazione effettuate nelle aule presenti nei tre piani dell'edificio, *Tabella 5.3*.

La normativa specifica che il tempo di riverbero non è un indicatore della qualità acustica di un ambiente, ma sicuramente concorre nel definirne le caratteristiche.

La maggior parte dei valori misurati nell'intorno dei 500 Hz e alle medie frequenze sono superiori a 1,2 secondi. Tale valore è considerato elevato e non adeguato alle aule destinate alla didattica, i cui valori ottimali di riferimento suggeriti in letteratura si

attestano a 0,5-0,6 secondi. Il tempo di riverberazione è alto perché nell'ambiente sono presenti poche superfici assorbenti e molte riflettenti rispetto al volume dell'ambiente.

Tabella 5.3 - I valori dei tempi di riverbero per ogni aula.

n° AULA	100	125	160	200	250	315	400	500	630	800	1 k	1.25 k	1.6 k	2 k	2.5 k	3.15 k [Hz]
001	0,94	1,07	1,17	1,39	1,46	1,67	1,53	1,1	1,24	1,4	1,58	1,81	1,93	1,96	1,94	1,89 [sec]
002	0,86	1,25	1,13	1,26	1,34	1,48	1,37	1,13	1,25	1,44	1,57	1,74	1,83	1,86	1,83	1,78
011	0,81	0,81	0,81	1,01	1,01	1,01	1,00	1,00	1,00	1,21	1,21	1,21	1,34	1,34	1,34	1,20
013	1,36	1,42	1,24	1,01	0,89	0,85	0,92	0,87	0,87	0,94	0,97	1,05	1,1	1,14	1,14	1,15
014	1,41	1,42	1,35	1,25	1,21	1,2	1,29	1,23	1,25	1,31	1,36	1,48	1,56	1,58	1,57	1,55
015	1,28	1,09	1,35	1,35	1,38	1,37	1,42	1,35	1,36	1,5	1,61	1,71	1,8	1,85	1,8	1,74
016	1,29	1,09	1,17	1,2	1,24	1,25	1,31	1,27	1,35	1,41	1,5	1,61	1,72	1,78	1,76	1,69
020	1,4	1,23	1,37	1,41	1,47	1,57	1,51	1,4	1,48	1,55	1,67	1,79	1,87	1,88	1,83	1,79
025	1,09	1,16	1,43	1,44	1,47	1,52	1,58	1,41	1,44	1,51	1,62	1,75	1,87	1,92	1,87	1,81
026	0,96	1,31	1,43	1,34	1,48	1,54	1,53	1,46	1,49	1,63	1,76	1,86	1,97	1,99	1,96	1,88

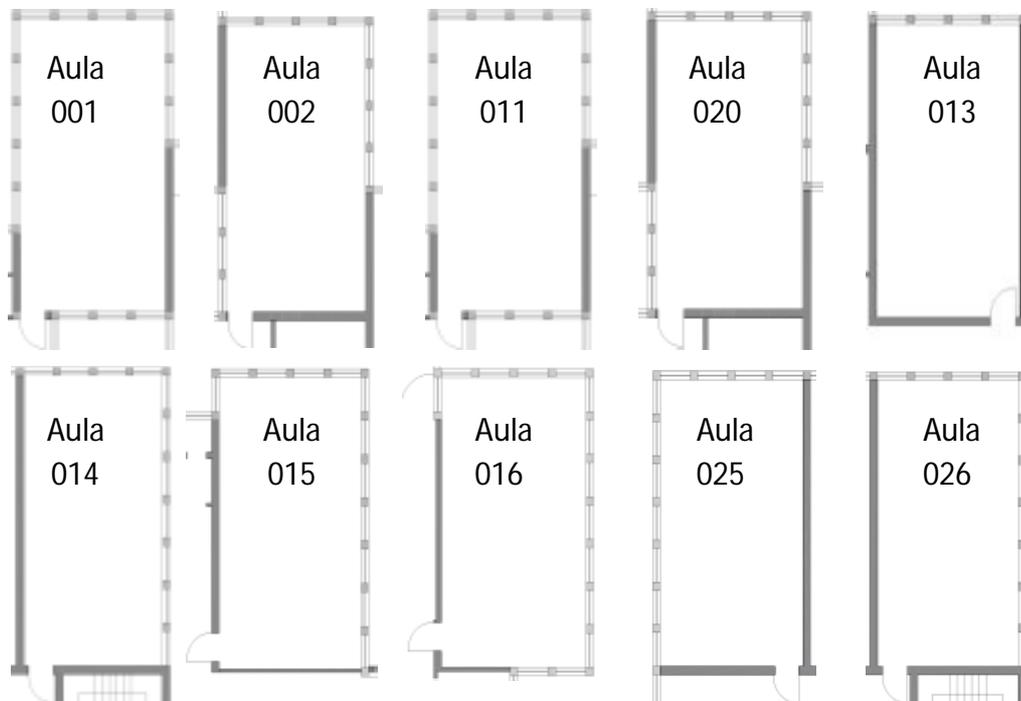


Figura 5.7 - Piante delle aule di cui sono stati misurati i tempi di riverberazione

Tra i dati ottenuti si può infatti notare una significativa differenza tra i valori dell'aula 013 e le altre situazioni. A parità di volume l'aula 013 presenta meno superfici vetrate, che hanno un alto coefficiente di riflessione e un basso coefficiente di assorbimento, e un mobilio più articolato che aumenta l'area di assorbimento equivalente. Da questi elementi deriva un intervallo di decadimento minore per l'aula in questione.

Effettuando un maggior numero di misurazione sarebbe possibile stabilire con maggiore precisione le relazioni tra la percentuale di superficie, vetrata o opaca, il tipo di arredamento e il tempo di riverberazione.



Figura 5.8- Confronto tra l'aula 013 a sinistra e l'aula 019 a destra

La prescrizione del DPCM 5/12/1997, che riprende i limiti dei decreti ministeriali del '67 e del '77, indica che la media dei tempi di riverberazione misurati alle frequenze di 250-500-1000-2000 Hz debba essere minore di 1,2 secondi per quanto attiene gli edifici scolastici. I valori ottimali in frequenza per bande di ottava sono determinati con la seguente formula:

$$T_{\text{ott}} = K (-0,2145 + 0,45 \log V)$$

Tabella 5.4a- Confronto tra i valori dei T60 misurati nelle aule e le prescrizioni del DPCM del '97

	n° AULA	001	002	011	013	014	015	016	020	025	026
<b>DPCM 5/12/1997</b>	media[250-500-1k-2k]<1,2 sec	1,59	1,51	1,14	0,98	1,36	1,55	1,45	1,62	1,62	1,59

Nella *Tabella 5.4*, che riporta tutti i valori mediati secondo le indicazioni del decreto, si riscontra che la gran parte dei tempi di riverberazione sono superiori ai 1,35 secondi.

Tabella 5.4b - Confronto contempi di riverberazione in bande di ottava con i valori ottimali del DM '77

n° AULA	125	250	500	1 k	2 k	4 k [Hz]
DPCM 5/12/1997						
T <sub>ott</sub>	<b>1,36</b>	<b>1,12</b>	<b>0,96</b>	<b>0,88</b>	<b>0,80</b>	<b>0,80</b>
001	<u>1,06</u>	1,51	1,29	1,60	1,94	1,69 [s]
002	<u>1,08</u>	1,36	1,25	1,58	1,84	1,68
011	<u>0,81</u>	<u>1,01</u>	1,00	1,21	1,34	1,21
013	<u>1,34</u>	<u>0,92</u>	<u>0,89</u>	0,99	1,13	1,10
014	<u>1,39</u>	1,22	1,26	1,38	1,57	1,45
015	<u>1,24</u>	1,37	1,38	1,61	1,82	1,61
016	<u>1,18</u>	1,23	1,31	1,51	1,75	1,58
020	<u>1,33</u>	1,48	1,46	1,67	1,86	1,66
025	<u>1,23</u>	1,48	1,48	1,63	1,89	1,66
026	<u>1,06</u>	1,51	1,29	1,60	1,94	1,69

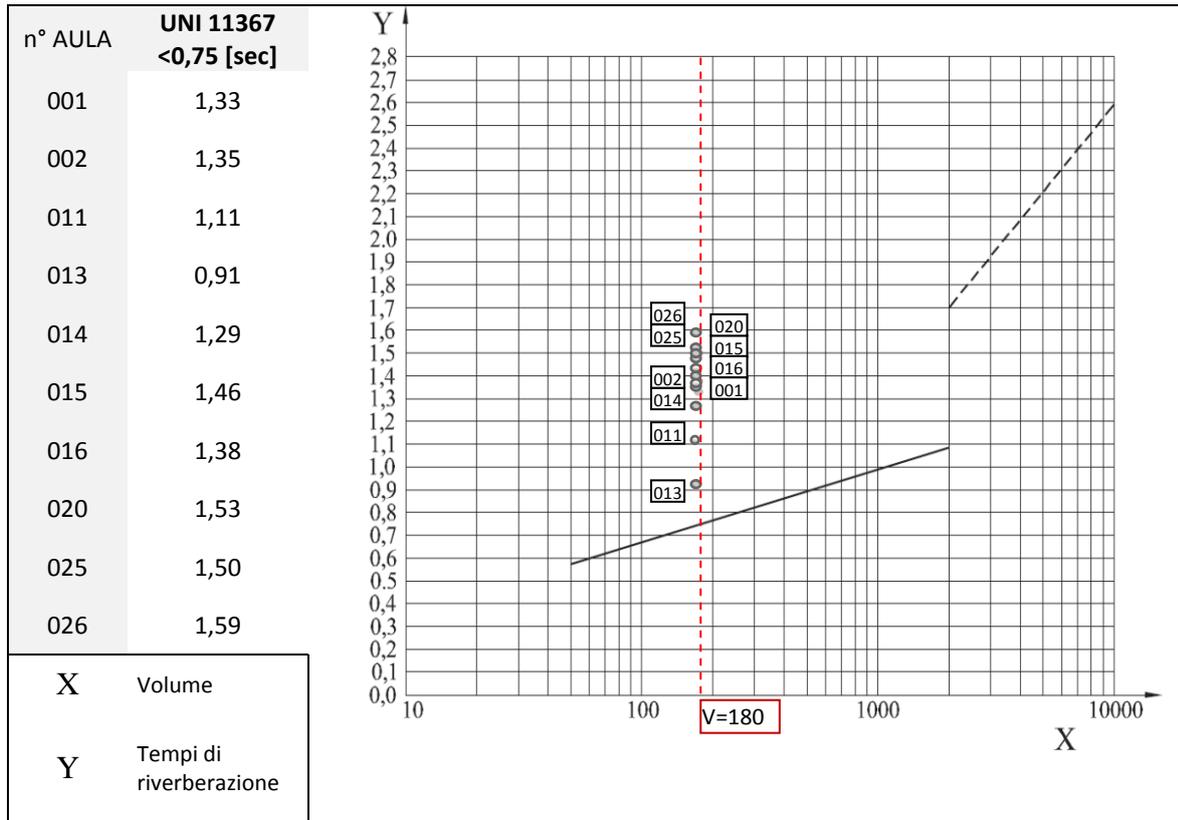
Anche la norma UNI 11367 suggerisce una valutazione basata sui valori ottimali dei tempi di riverbero in funzione del volume dell'ambiente. Come abbiamo visto nel capitolo 3.2.1, i valori ottimali meditra i 500 e 1000 Hz per ambienti non occupati adibiti al parlato sono ricavabili dalla seguente espressione, per V=178 mc:

$$T_{\text{ott}} = 0,32 \log (V) + 0,03 = 0,75 \text{ secondi}$$

Si può notare dalla tabella 5.5 che nessun valore rispetta i limiti imposti dalla suddetta norma e che sono più severi di quelli previsti dal decreto ministeriale.

## Verifica dei requisiti acustici di una scuola media e proposte di miglioramento

Tabella 5.5 - Confronto tra i valori dei T60 misurati nelle aule e le prescrizioni del laUNI 11367 del 2010



La norma UNI 11367 suggerisce inoltre che i risultati ottenuti in ambiente non occupato, rispettino il seguente criterio, in tutte le bande di ottava comprese fra 250 Hz e 4000 Hz:

$$T \leq 1,2 T_{\text{ott}} = 0,9 \text{ secondi}$$

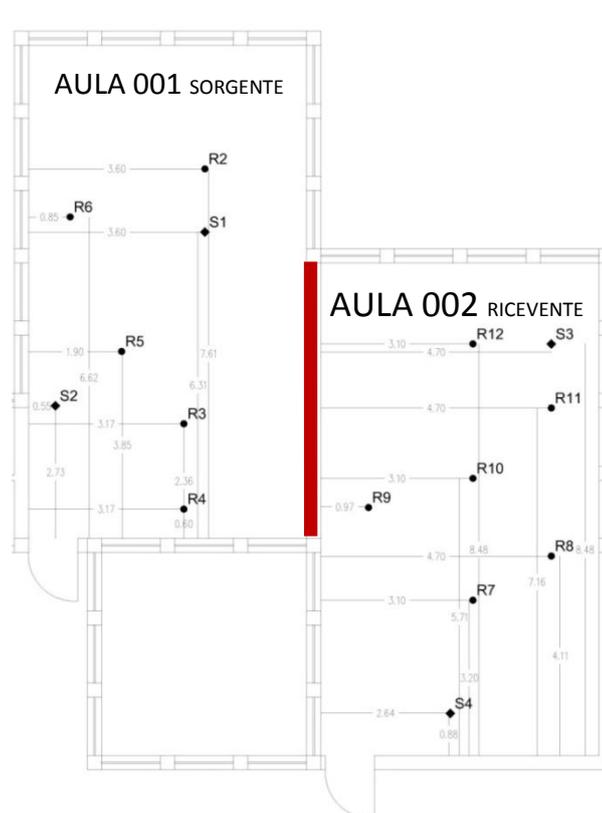
Tabella 5.6 - I valori sottolineati sono inferiori a 0,9 secondi

AULA	250	315	400	500	630	800	1 k	1.25 k	1.6 k	2 k	2.5 k	3.15 k	4 k[Hz]
001	1,46	1,67	1,53	1,1	1,24	1,4	1,58	1,81	1,93	1,96	1,94	1,89	1,76[s ec]
002	1,34	1,48	1,37	1,13	1,25	1,44	1,57	1,74	1,83	1,86	1,83	1,78	1,68
011	1,01	1,01	1	1	1	1,21	1,21	1,21	1,34	1,34	1,34	1,2	1,22
013	<u>0,89</u>	<u>0,85</u>	0,92	<u>0,87</u>	<u>0,87</u>	0,94	0,97	1,05	1,1	1,14	1,14	1,15	1,11
014	1,21	1,2	1,29	1,23	1,25	1,31	1,36	1,48	1,56	1,58	1,57	1,55	1,46
015	1,38	1,37	1,42	1,35	1,36	1,5	1,61	1,71	1,8	1,85	1,8	1,74	1,62
016	1,24	1,25	1,31	1,27	1,35	1,41	1,5	1,61	1,72	1,78	1,76	1,69	1,59
020	1,47	1,57	1,51	1,4	1,48	1,55	1,67	1,79	1,87	1,88	1,83	1,79	1,66
025	1,47	1,52	1,58	1,41	1,44	1,51	1,62	1,75	1,87	1,92	1,87	1,81	1,67
026	1,48	1,54	1,53	1,46	1,49	1,63	1,76	1,86	1,97	1,99	1,96	1,88	1,72

## 5.2\_Misure del potere fonoisolante apparente di pareti e solai

### 5.2.1\_Procedura di misura

La misura del potere fonoisolante apparente  $R$  di pareti solai che dividono due aule adiacenti o sovrapposte, sorgente e ricevente, è stata eseguita secondo le indicazioni della norma UNI EN ISO16283-1. La strumentazione utilizzata è la stessa descritta per il calcolo dei tempi di riverberazione. A titolo di esempio si riporta la procedura di misura di  $R$  e  $R'_w$  della parete divisoria tra l'aula 001 sorgente e l'aula 002 ricevente.



*Figura 5.9 - Pianta delle aule 001 e 002, sono indicate le posizioni microfoniche e di emissione della sorgente*

Nell'ambiente sorgente sono stati individuati e segnati sul pavimento i punti che individuano le posizioni del dodecaedro, 2 posizioni di emissione, e i 6 punti di ricezione del fonometro in ambiente. Ulteriori 6 posizioni sono state individuate per il fonometro nell'aula ricevente. Il criterio di posizionamento della sorgente prevede, in ragione della necessità di un campo il più possibile diffuso, che la direttività della stessa eviti la

trasmissione diretta ai microfoni. In genere una posizione è stata individuata dietro la cattedra dell'insegnante e una in fondo all'aula.

I criteri di determinazione delle posizioni di misura dei microfoni in ambiente ricevente e sorgente prevedono le distanze minimi di 0,7 metri tra gli stessi ricevitori, di 0,5 metri con le pareti dell'ambiente e di un metro dalla sorgente; sono state quindi distribuite in maniera uniforme nell'ambiente.

La misura dei livelli di pressione sonora è stata fatta con la presenza di un fonometro nell'aula ricevente, di un fonometro e del dodecaedro nell'aula sorgente. La misura inizia dopo un'attesa di 5 secondi dal momento di accensione della sorgente sonora elettroacustica, per evitare interferenze ed ottenere un campo omogeneo a seguito delle riflessioni delle onde sonore, ed ha una durata di tempo di 20 secondi. Il suono emesso dal dodecaedro almeno 10 dB maggiore del livello sonoro del rumore di fondo.

Si ottiene così una combinazione di 12 livelli di pressione sonora per ogni microfono, *Tabella 5.7* e *Tabella 5.8*, in un intervallo di frequenze tra i 50 Hz e i 5 KHz, in bande di terzi di ottava, 6 per ognuna delle due posizioni della sorgente sonora.

*Tabella 5.7 - Livelli di pressione sonora nell'ambiente sorgente, aula 001*

f [Hz]	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
50	88,5	86,9	83,9	87,8	89,4	89,9	85,7	85,8	85,1	82,7	83,6	82,8
63	83,5	84,1	78,4	86,0	82,9	84,2	82,8	84,9	90,8	88,6	83,0	83,7
80	82,3	80,3	78,0	80,9	81,3	74,8	81,7	82,3	82,8	82,0	80,2	79,5
100	76,7	82,3	73,8	74,3	83,4	72,8	74,7	80,0	75,7	79,6	74,6	76,9
125	77,4	85,3	86,7	84,2	86,1	81,1	78,1	84,5	86,5	84,2	81,2	80,7
160	79,0	86,2	84,3	84,1	86,1	83,6	76,9	82,4	77,9	79,1	81,1	80,1
200	81,4	87,4	85,4	81,3	87,4	84,4	78,9	84,7	83,6	83,9	80,6	80,5
250	88,8	86,0	87,3	87,6	89,6	85,0	84,0	88,3	89,6	89,3	86,4	87,0
315	88,2	87,9	87,1	84,7	88,5	87,0	84,9	85,8	88,4	89,0	83,1	84,8
400	86,1	87,5	87,0	85,9	86,8	86,7	83,5	86,7	88,0	88,3	84,8	87,5
500	86,8	86,8	85,7	87,2	86,7	85,3	86,0	86,4	85,6	88,2	84,8	85,3
630	87,3	86,7	84,8	85,3	86,9	85,7	84,2	86,5	85,9	86,3	85,6	85,0
800	85,0	88,2	85,6	84,9	85,9	87,3	86,7	86,6	86,6	87,7	85,2	86,0
1 k	87,2	88,1	87,1	86,9	87,3	86,6	86,3	87,3	87,5	87,1	86,3	85,1
1.25 k	87,6	89,3	87,8	87,8	87,3	87,2	87,5	88,1	88,0	87,6	86,8	87,5
1.6 k	90,2	92,1	89,4	89,5	89,6	89,4	89,7	89,2	90,8	89,1	89,2	89,3
2 k	93,0	95,5	93,7	93,5	93,3	92,9	93,1	92,6	94,3	93,4	92,8	93,7
2.5 k	91,0	93,6	91,0	91,0	91,2	91,3	90,7	91,3	91,7	91,4	90,6	90,8
3.15 k	88,2	90,7	87,9	88,5	88,6	88,6	87,6	89,5	88,9	88,7	88,1	88,0
4 k	91,1	95,1	90,4	90,8	90,9	91,1	90,7	91,8	90,9	91,7	90,6	91,2
5 k	86,8	90,2	86,8	86,8	87,3	86,8	86,8	87,0	87,6	87,9	86,3	86,8

Tabella 5.8 - Livelli di pressione sonora nell'ambiente ricevente, aula 002.

f [Hz]	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
50	56,7	50,5	50,3	50,0	56,6	46,2	48,5	57,8	51,8	56,0	55,0	55,0
63	52,0	47,8	51,6	59,3	55,5	56,3	58,5	60,9	59,2	55,7	55,8	57,5
80	50,7	44,6	46,9	51,7	43,4	49,5	49,5	44,5	51,4	47,8	46,5	50,2
100	46,6	47,4	49,4	48,5	44,5	46,3	45,6	42,2	47,1	47,6	42,7	44,9
125	46,3	42,1	46,4	46,8	45,3	42,5	45,0	44,1	45,7	47,1	43,7	48,6
160	49,6	50,7	48,6	49,6	52,6	49,0	44,2	46,9	43,3	43,9	45,8	43,7
200	46,3	49,1	49,5	47,0	48,4	46,2	48,0	45,5	46,3	48,3	49,8	46,1
250	49,7	49,5	50,0	50,6	50,4	49,4	49,2	47,2	49,3	48,6	49,1	47,9
315	50,1	51,9	50,8	52,6	49,6	52,3	51,0	48,7	51,3	52,6	49,7	49,6
400	48,0	50,2	47,0	46,9	48,2	49,5	46,8	47,4	45,9	47,2	48,1	47,0
500	46,1	46,9	47,3	46,5	47,7	47,9	47,0	45,7	46,8	47,4	46,2	46,6
630	44,0	45,0	46,4	44,9	45,2	44,7	45,1	45,1	46,1	45,2	44,7	46,0
800	43,9	42,6	44,1	43,8	44,2	43,8	46,0	44,8	44,6	44,3	42,7	44,2
1 k	43,4	43,8	42,4	43,6	43,0	42,8	43,0	43,7	42,6	42,8	42,3	42,4
1.25 k	40,3	41,5	41,4	40,5	40,3	41,0	41,3	40,8	41,3	41,1	40,5	40,6
1.6 k	38,9	39,6	40,2	39,9	39,7	39,6	39,6	41,1	40,2	40,2	39,4	39,4
2 k	40,5	40,2	40,7	41,7	40,5	40,5	41,0	41,6	40,9	41,5	40,3	40,4
2.5 k	36,2	36,4	37,9	37,7	36,4	36,6	36,8	37,1	36,8	38,4	36,3	36,6
3.15 k	32,4	32,3	33,7	34,0	32,2	32,5	32,6	32,8	32,8	34,9	32,1	32,6
4 k	34,9	34,1	35,3	35,8	34,3	34,7	34,7	35,3	34,8	36,0	34,3	34,6
5 k	28,3	27,7	29,0	28,9	28,0	28,0	28,2	29,5	28,6	29,8	27,6	27,5

Si calcola quindi il livello medio di pressione sonora attraverso la formula:

$$L_M = 10 \log \frac{1}{N} \sum_i 10^{\frac{L_i}{10}}$$

sia per l'ambiente sorgente  $L'_S$ , che ricevente  $L'_R$ .

Tabella 5.9 - Livelli medi di pressione sonora nell'ambiente ricevente  $L'_R$  e sorgente  $L'_S$ , aula 002.

f [Hz]	100	125	160	200	250	315	400	500	630	800	1 k	1.25 k	1.6 k	2 k	2.5 k	3.15 k
$L'_S$ [dB]	86	84,4	80,5	77,1	83	81,7	83,3	87,4	86,6	86,6	86,2	85,9	86,3	86,9	87,7	89,8
$L'_R$ [dB]	52,9	55,8	48,1	46,1	45,3	47,3	47,5	49,2	50,9	47,7	46,8	45,2	44,1	43	40,9	39,8

Ad essi viene sottratto il rumore di fondo  $L_F$ , misurato in assenza dell'emissione del rumore con le finestre chiuse, esso presenta variazioni trascurabili se misurato nell'uno o nell'altro ambiente, ottengo  $L_S$  e  $L_R$  i cui valori sono sostanzialmente invariati rispetto ai precedenti:

Tabella 5.10 - Livelli sonori del rumore di fondo, aula 002.

f [Hz]	100	125	160	200	250	315	400	500	630	800	1 k	1.25 k	1.6 k	2 k	2.5 k	3.15 k
L <sub>F</sub> [dB]	16,6	20,8	21,5	22,6	19,5	18,4	19,8	17,4	12,9	13,1	13,8	10,5	9,6	12,0	11,9	11,2

$$L = 10 \log \left( 10^{\frac{L_M}{10}} - 10^{\frac{L_F}{10}} \right)$$

Otengo quindi i valori per calcolare l'isolamento acustico  $D = L_S - L_R$ . Da cui posso calcolare il potere fonoisolante apparente della parete di separazione fra le due aule per ogni frequenza:

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

S è l'area dell'elemento divisorio in metri quadri, in questo caso la parete divisoria dell'aula 002 e 001 ha una superficie di 16,9m<sup>2</sup>.

A è l'area di assorbimento equivalente:

$$A = 0,16 \frac{V}{T}$$

V volume dell'ambiente di prova, circa 178m<sup>3</sup>;

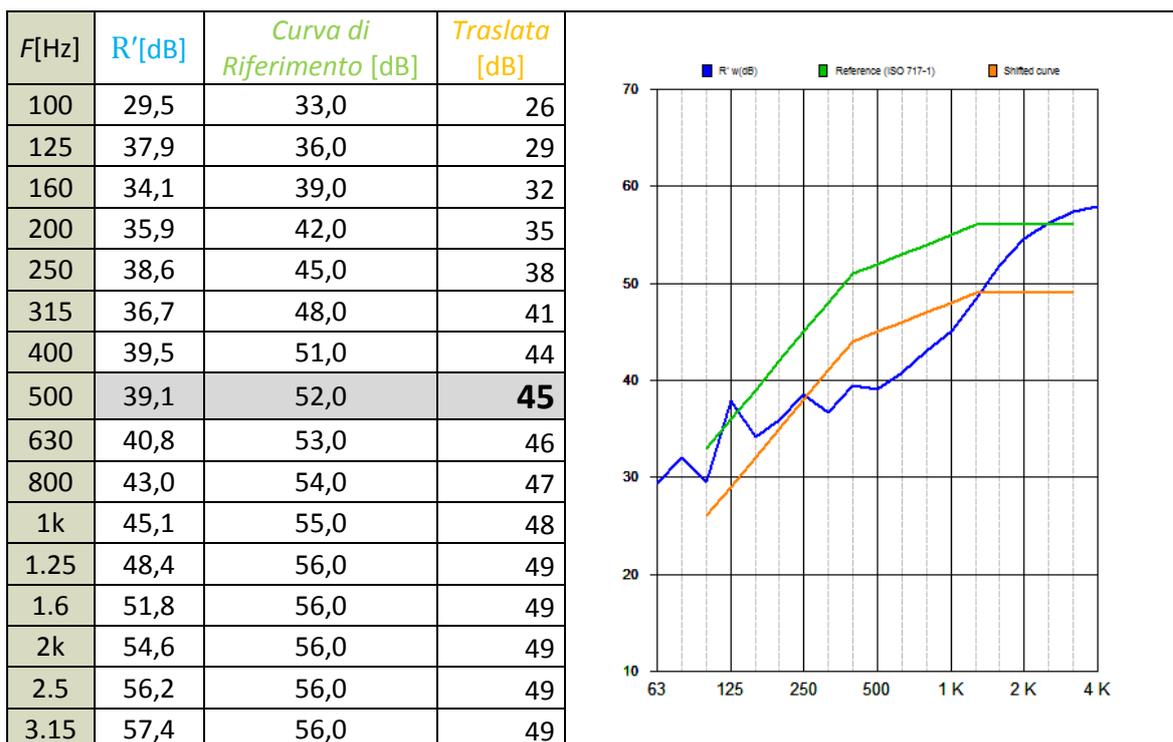
T tempo di riverberazione dell'aula ricevente, paragrafo precedente 5.1.3.

Tabella 5.11- Potere fonoisolante apparente della parete di separazione tra l'aula 001 e l'aula 002.

f [Hz]	100	125	160	200	250	315	400	500	630	800	1 k	1.25 k	1.6 k	2 k	2.5 k	3.15 k
R' <sub>w</sub> [dB]	29,5	37,9	34,1	35,9	38,6	36,7	39,5	39,1	40,8	43	45,1	48,4	51,8	54,6	56,2	57,4

Dai valori ottenuti bisogna ricavare il valore dell'indice di valutazione  $R'_{w}$  confrontando la curva del potere fonoisolante apparente ottenuta in opera con la curva di riferimento; il procedimento è descritto nella norma EN ISO 717-1, capitolo 3.2.4.1.

Tabella 5.12 - Esempio di traslazione della curva di riferimento, UNI EN ISO 717-1



Il software riporta inoltre i termini di adattamento  $R'_w (C ; C_{tr})$  [dB] relativi all'indice di valutazione:

$$R'_w (C ; C_{tr}) = 45 (-1 ; -4)$$

### 5.2.2\_Riepilogo dati e considerazioni

I tramezzi sono composti da due blocchi forati in laterizio di 12 cm di spessore separati da un'intercapedine di 4 cm, intonacato da entrambi i lati. Il potere fonoisolante  $R$  calcolato in laboratorio, secondo la UNI EN ISO 140-3, attribuito a una parete avente la medesima composizione è di 46,4 dB. In opera il rumore viene trasmesso anche per trasmissione laterale, abbassando i valori del potere fonoisolante apparente rispetto a  $R$ . Abbiamo accertato due differenti fenomeni di trasmissione dovuti ad errori costruttivi o di scelta di materiali che hanno peggiorato i dati di misura: il primo avviene nelle aule non allineate sul lato lungo. La criticità riguarda il nodo di attacco del tramezzo in laterizio con la lamiera di collegamento dell'infisso: accostando l'orecchio durante il funzionamento della sorgente sonora si poteva udire un sibilo proveniente dall'interno dell'intercapedine del profilato in alluminio. Ciò può essere dovuto ad una non completa saturazione della fessura con materiale isolante, o addirittura della mancanza del coibente.



*Figura 5.10 - Fonometro posizionato per misurare il livello sonoro del sibilo percepito nel nodo.*

Il secondo riguarda le aule affiancate e allineate. La parete è continua e non presenta nodi costruttivi composti da diversi materiali. Tuttavia, il suono durante le misurazioni veniva trasmesso all'ambiente ricevente attraverso le due porte in compensato affiancate e la vetrata posta sopra l'ingresso, determinando una diminuzione del potere fonosolante.



*Figura 5.11- Porte presenti nelle aule*

Nella tabella 5.13 sono riportati i valori di  $R'$  e  $R'_w$  calcolati, ognuno riferito all'ambiente ricevente nel momento delle misurazioni.

## Verifica dei requisiti acustici di una scuola media e proposte di miglioramento

*Tabella 5.13 - Potere fonoisolante apparente e relativo indice di valutazione delle pareti tra aule adiacenti, pianta con indicati i punti microfonic e le posizioni delle sorgenti.*

AULARICEVENTE [R]	002		014	
$R'_w$ [dB]	45		43	
$R'$ [dB]	100 [Hz]	29,5	36,8	
	125	37,9	36,7	
	160	34,1	36	
	200	35,9	36,1	
	250	38,6	36,2	
	315	36,7	35,3	
	400	39,5	36,4	
	500	39,1	37,3	
	630	40,8	39,8	
	800	43	41,7	
	1 k	45,1	43,1	
	1.25 k	48,4	44,2	
	1.6 k	51,8	45,7	
	2 k	54,6	46,5	
2.5 k	56,2	46,9		
3.15 k	57,4	47,8		
AULARICEVENTE	020		026	
$R'_w$ [dB]	45		44	
$R'$ [dB]	100[Hz]	34,1	33,6	
	125	35	29,2	
	160	37,6	38,1	
	200	37	38,7	
	250	38,8	39,3	
	315	38,6	38,4	
	400	38,8	36,7	
	500	39	40,1	
	630	40,9	41,6	
	800	43,5	43,4	
	1 k	45,5	44,5	
	1.25 k	47,7	45,7	
	1.6 k	49,7	46,8	
	2 k	51	46,9	
2.5 k	51,2	46,8		
3.15 k	52,1	48,3		

Il grafico della *Figura 5.12* confronta l'andamento dei poteri fonoisolanti apparenti per bande di frequenza considerando i risultati dei 4 ambienti. E' possibile individuare nell'intorno dei 125 Hz di frequenze dei fenomeni di risonanza, riconoscibili da un abbassamento repentino di  $R'$ . Inoltre l'abbassamento graduale di  $R'$  alle alte frequenze, intorno ai 1,25 kHz, visibile nelle curve gialla e blu, aula 014 e 026, è dovuta al passaggio di rumore per via aerea attraverso le porte.

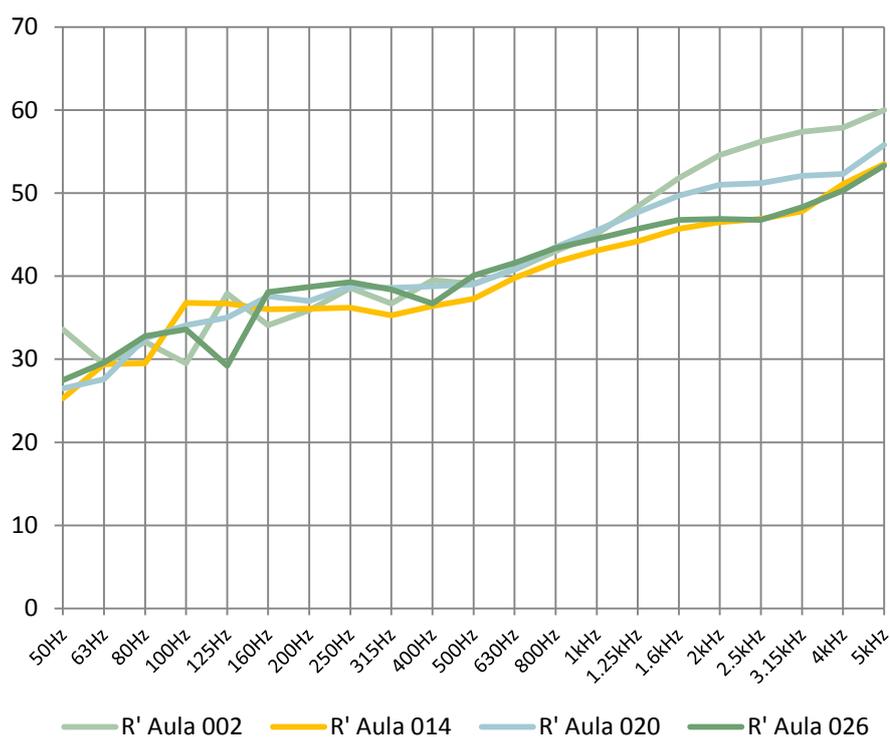


Figura 5.12 - Grafico delle 4 polilinee dei poteri fonoisolanti apparenti calcolati

I limiti legislativi e normativi, non sono rispettati, in quanto gli indici di valutazione sono minori di 50 dB. Vedremo in seguito che attraverso interventi migliorativi, come l'apposizione di una controparete al tramezzo, è possibile rientrare nei limiti stabiliti.

Tabella 5.14- Limiti normativi e legislativi di  $R'_w$

DPCM 5/12/97	$R'_w$
Categorie E	50 dB

UNI 11367	Prestazione base	Prestazione superiore
$R'_w$ [dB]	50	56

Il potere fonoisolante apparente è stato misurato anche per gli elementi orizzontali. Sono stati valutati 4 casi in cui sono stati calcolati i  $R'$  e  $R'_w$  dei solai tra due ambienti sovrapposti. Le aule 013 e 025 sono sovrapposte ed è stato misurato il potere fonoisolante del solaio intermedio ponendo la sorgente sia nel locale superiore che inferiore.

I valori ottenuti dalle misurazioni rivelano buone capacità di isolare da suoni trasmessi per via aerea. Il conseguimento di tali risultati è da attribuire al fatto che il solaio ha una massa elevata. Se valutiamo questi dati con quelli che otterremo dalle prove di misura dei livelli sonori di calpestio, che hanno rivelato scarsa capacità di isolamento da suoni impattivi, possiamo affermare che non è presente nella stratigrafia alcun materiale resiliente in quanto tali prestazioni acustiche sono paragonabili a quelle di un solaio grezzo. Queste considerazioni indicano che negli anni in cui è stato progettato il complesso non vi era attenzione verso le prestazioni acustiche, nonostante l'ingente utilizzo di materiale.

Tabella 5.15a- Potere fonoisolante apparente e relativo indice di valutazione dei solai tra aule sovrapposte, pianta con indicati i punti microfoniche e le posizioni delle sorgenti.

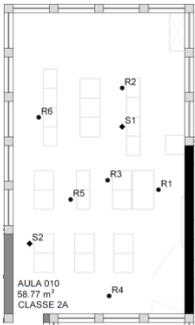
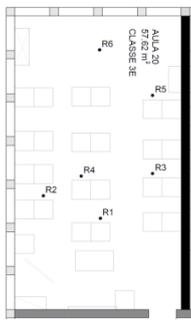
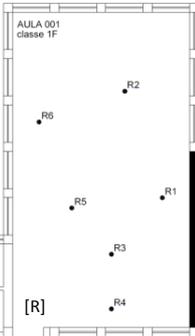
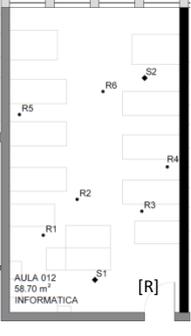
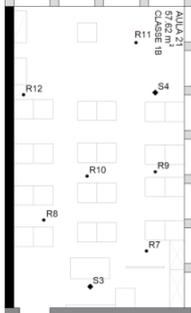
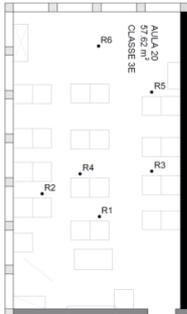
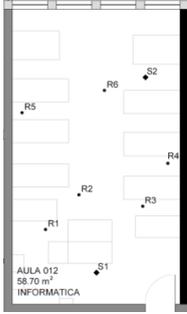
AULARICEVENTE	001		013	
$R'_w$ [dB]	53		52	
$R'$	100	39	33,8	
	125	39,7	38,3	
	160	41,5	45,4	
	200	45,7	45,9	
	250	48,1	48,5	
	315	49,4	46,8	
	400	48,8	48,4	
	500	45,6	45,8	
	630	48,6	47	
	800	51,4	49,5	
1 k	52,3	50,8		
1.25 k	54,5	52,6		
1.6 k	56,5	55,1		
2 k	59,5	57,2		
2.5 k	61,6	59,1		
3.15 k	64,3	61,6		
				

Tabella 5.15b - Potere fonoisolante apparente e relativo indice di valutazione dei solai tra aule sovrapposte, pianta con indicati i punti microfonicici e le posizioni delle sorgenti.

AULARICEVENTE	014		025	
$R'_w$ [dB]	50		52	
$R'$	100		38,2	
	125		38,8	
	160		41,4	
	200		42,8	
	250		45,4	
	315		47,1	
	400		48,8	
	500		46,6	
	630		48	
	800		49,3	
	1 k		51,7	
	1.25 k		53,1	
1.6 k		56,5		
2 k		58,3		
2.5 k		60,9		
3.15 k		63,8		

Nella *Figura 5.13* sono confrontati i risultati ottenuti nei quattro casi: il fatto che l'andamento delle curve del potere fonoisolante è simile indica che i solai hanno la stessa risposta in termini acustici e non vi sono differenti criticità costruttive che determinano i risultati.

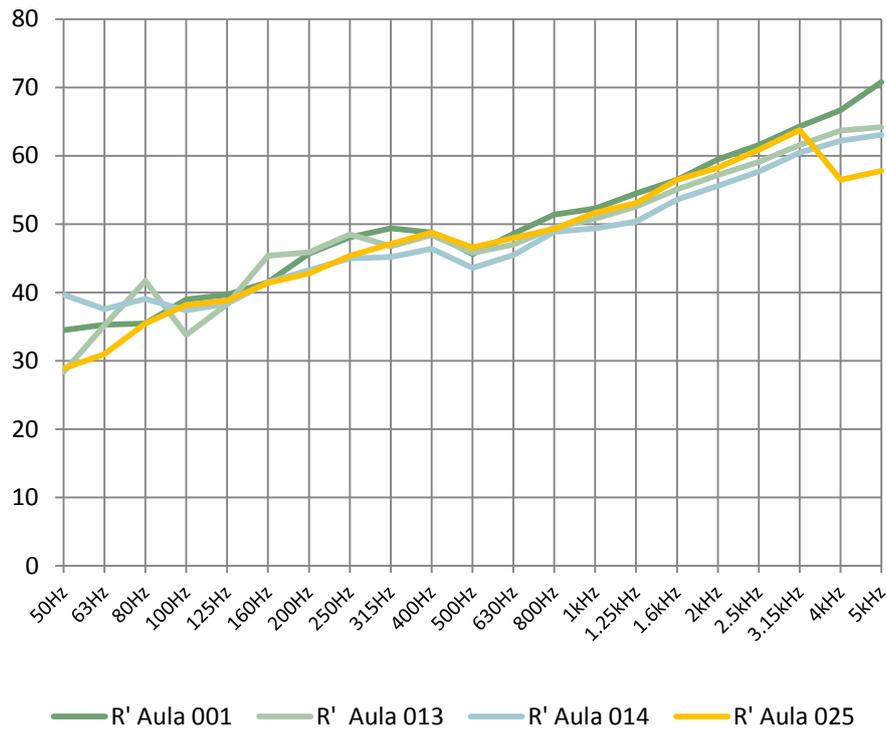


Figura 5.13- Il grafico riporta le curve di interpolazione dei livelli di potere fonoisolante apparente relativi agli elementi orizzontali

### 5.3\_Misure del livello di pressione sonora di calpestio

La misura della trasmissione sonora da impatto di calpestio è stata calcolata utilizzando come sorgente il generatore normalizzato B&K3702, strumento conforme alla normativa vigente menzionata nel paragrafo 5.1.1. Si tratta di un unità che produce rumore attraverso 5 martelletti pesanti in acciaio posti in linea che cadono da un'altezza di 4 cm, la frequenza di battuta è di 10 battute al secondo.



Figura 5.14 - Generatore normalizzato al calpestio

I due fonometri utilizzati per la misura del livello di pressione sonora sono gli stessi descritti per le misure dei tempi di riverbero e del potere fonoisolante nel paragrafo 5.1.1.

### **5.3.2\_Procedura di misura**

La misura della capacità del solaio di isolare dai rumori impattivi nell'ambiente ricevente è stata fatta seguendo le indicazioni della norma UNI EN ISO 140-7, descritta nel capitolo 3.2.2.3.

Sono stati individuati quattro punti di misura nell'ambiente sorgente sovrastante e sei posizioni di misura nell'ambiente ricevente sottostante, in numero maggiore quindi rispetto alle prescrizioni della norma. In ognuna delle posizioni la linea dei martelletti è stata mantenuta con un'inclinazione di 45° rispetto all'asse di orditura del solaio, e ci siamo assicurati, regolando gli appoggi, che il generatore di calpestio fosse orizzontale rispetto alla pavimentazione. Le posizioni microfoniche sono state individuate secondo i criteri già definiti nel calcolo dei tempi di riverbero e del potere fonoisolante: distanze minime di 0,7 metri tra gli stessi ricevitori, di 0,5 metri con le pareti dell'ambiente e di un metro dalla sorgente; sono state inoltre distribuite in maniera uniforme nell'ambiente.

Dalle combinazioni tra le posizioni del generatore di calpestio e i fonometri abbiamo ottenuto 24 misure del livello sonoro nell'aula ricevente, per frequenza per bande di terzo di ottava, *Tabella 5.16*. La misura dei livelli di calpestio è iniziata 5 secondi dopo l'accensione della sorgente impattiva, per avere la certezza che il campo sonoro si fosse stabilizzato; l'acquisizione è avvenuta per un intervallo di tempo di 20 secondi.

A titolo di esempio si riportano i dati di misurazione ottenuti nell'aula 001, ambiente ricevente, esplicitando l'iter che ha portato alla determinazione dell'indice di valutazione del livello normalizzato di calpestio.



Figura 5.15 - Pianta dell'aula ricevente 001, dove sono indicate le posizioni microfoniche, e pianta dell'aula 011 sovrastante dove è stato posizionato il generatore al calpestio nei 4 punti segnalati.

Tabella 5.16 - Livello di pressione sonora nelle aule riceventi, 24 misurazioni.

Hz	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24
50	53,8	55,9	52	54,6	55,8	58,3	55,4	58,4	50,6	55,6	54,8	54,9	54,9	47,9	42,7	48,2	45,4	53,6	61,7	59,5	58,1	55,3	56,1	58,4
63	55,3	57,4	58,4	59	52,1	56,4	46,3	50,8	48,8	51,8	46	49,5	46,9	53,2	45,6	55,6	47	52,6	55	47,9	69,4	66,2	59	52
80	53,7	55,5	53,9	54,1	51,2	56	46	52,6	46,1	53,1	50,8	50,2	49,3	52,8	49	50,9	44	55,4	53,9	49,8	55,4	51,8	55,2	54,4
100	54,6	57,8	54,9	56,4	57,8	57	52,8	54,5	53,9	55,5	53,8	56,3	53,6	57,8	51,9	49,5	52,4	57	51,4	50,4	47,6	47,8	59,9	48,5
125	58,1	59,2	61,1	59	61,3	54,5	61,2	56,8	61	59,8	62,5	60,8	58	63,6	60,7	59,2	61,7	58,3	56,9	59,6	54,8	59	59,6	60,2
160	58,5	59,9	61,1	61,7	59,9	61,5	59,6	56,4	56,9	57,1	58,8	60	59,6	59,6	60,7	58,5	61,7	63,8	59,6	60,2	55,9	57,9	57	58,2
200	57,2	64,9	61,3	65,2	60,1	63,4	57,2	60,5	58,8	62	61,4	62,1	58,6	61,5	60,4	63,6	59,9	60	59,6	59,7	58,8	57,4	61,3	56,4
250	61	64,7	63,1	65,6	61,1	63,7	61,6	59,7	61,1	62,7	60,1	61,7	59,4	61,8	59	61,9	60,2	62,1	57	56,2	59,7	55,6	58,1	56
315	63,1	66,2	65,8	66,1	64,3	64,5	60,1	62	62,5	63,4	61,9	63	60,1	61,8	62,6	63,5	63,1	64,1	60,4	56,3	56,8	56,2	60,2	56,6
400	67,6	68,6	65,9	67,7	66,2	67,8	61,3	63,7	62,9	63,7	62,8	65,2	63,5	66,7	65,8	66,3	64,1	67,7	59,5	58	58,8	58,5	60,1	58,8
500	64,9	69,4	67,2	67,6	68	67,8	64,6	65,2	65,7	66,9	64,9	67,4	67	68,5	68,4	69,8	69,2	70,4	62,2	59,4	62,8	61,1	63,3	63,1
630	65,8	69	67,6	69	66,9	68,2	63	64,9	65,4	67	64,9	66,3	65,2	67,1	65,1	66,9	64,8	69,1	62,2	59,9	62,4	59,9	64,5	59,5
800	64,3	66,9	66,5	68,1	64,8	67,2	61,8	62,7	62,4	65,6	62,9	63,9	64,4	66,4	63,9	64,9	64,7	67,4	63,4	62,3	63,7	61,3	65,6	62,4
1 k	67,7	70,2	68,3	70,2	68,8	70,7	63,1	64,7	64,1	66,8	63,9	65,8	65,6	67,4	65,5	67,5	66,1	68,6	64,3	63,3	65,1	63	66,6	64,4
1.25 k	69,2	71,3	69,5	71,5	69,6	71,2	62,5	63,6	62,5	65,4	62,5	64,1	63,7	65,3	63	64,2	63,4	66,1	65,6	64,1	65,8	64,3	66,9	65,5
1.6 k	68,8	71,7	69,5	71,7	69,7	71,6	61,4	63,4	62,7	64,9	62,9	63,6	62,7	64,9	62,4	64,1	61,8	66,1	67,9	66,2	67,6	66,3	68,9	66,8
2 k	67,6	69,2	67,9	69,9	68,1	69,5	59,9	61,6	61	63,6	60,1	61,7	59,6	61,9	59,6	61,6	59,8	62,8	64,9	63,8	65,5	63,9	65,1	63,9
2.5 k	65	66,9	65,6	67,4	65,1	66,7	59,3	60,5	60,7	63,7	59	60,5	57,3	59,4	56,9	59,3	56,7	59,6	63,6	61,1	63,6	60,7	64,2	61,6
3.15 k	62,4	65,4	64	66	65	65,7	59,7	61,4	61,2	64,1	58,4	60,8	54,6	56,8	53,6	55,9	53,6	58,2	60,7	58,6	61,1	58,9	63	60,3
4 k	60,3	63,3	61,7	63,9	62,1	63,6	56,8	58,3	57,7	61,4	55	57,2	50,1	52,6	48,3	50,4	48	52,4	57,3	55,5	58	55,7	58,8	56,3
5 k	56	58,3	57,2	59,2	58	58,9	51,7	53,7	52,5	56,1	49,5	51,3	41	43,9	40,1	42,3	39,9	45,5	52,2	49,8	52,5	50,6	54,2	51,3

A partire dai 24 valori in frequenza si calcola quindi il livello medio di pressione sonora nell'ambiente ricevente attraverso la formula:

$$L_M = 10 \log \frac{1}{N} \sum_i 10^{\frac{L_i}{10}}$$

Tabella 5.17 - Livello di pressione sonora medio.

f [Hz]	100	125	160	200	250	315	400	500	630	800	1 k	1.25 k	1.6 k	2 k	2.5 k	3.15 k
$L_M$ [dB]	53,9	59,5	59,3	60,5	60,5	61,9	63,8	66	65,2	64,5	66,3	65,9	66,2	63,9	61,9	60,4

Si sottrae il rumore di fondo  $L_F$ , i cui valori sono tabellati nel paragrafo 5.2.2. Ricavo così il livello di pressione sonora nell'ambiente ricevente  $L_i$  in bande di terzo di ottava, in frequenza:

$$L_i = 10 \log \left( 10^{\frac{L_M}{10}} - 10^{\frac{L_F}{10}} \right)$$

Abbiamo pertanto ottenuto tutti gli elementi per il calcolo del livello normalizzato di calpestio, considerando il volume dell'ambiente e i relativi tempi di riverbero:

$$L'_n = L_i + 10 \log \left( \frac{A}{A_0} \right)$$

A è l'area equivalente di assorbimento acustico;

$$A = 0,16 \frac{V}{T}$$

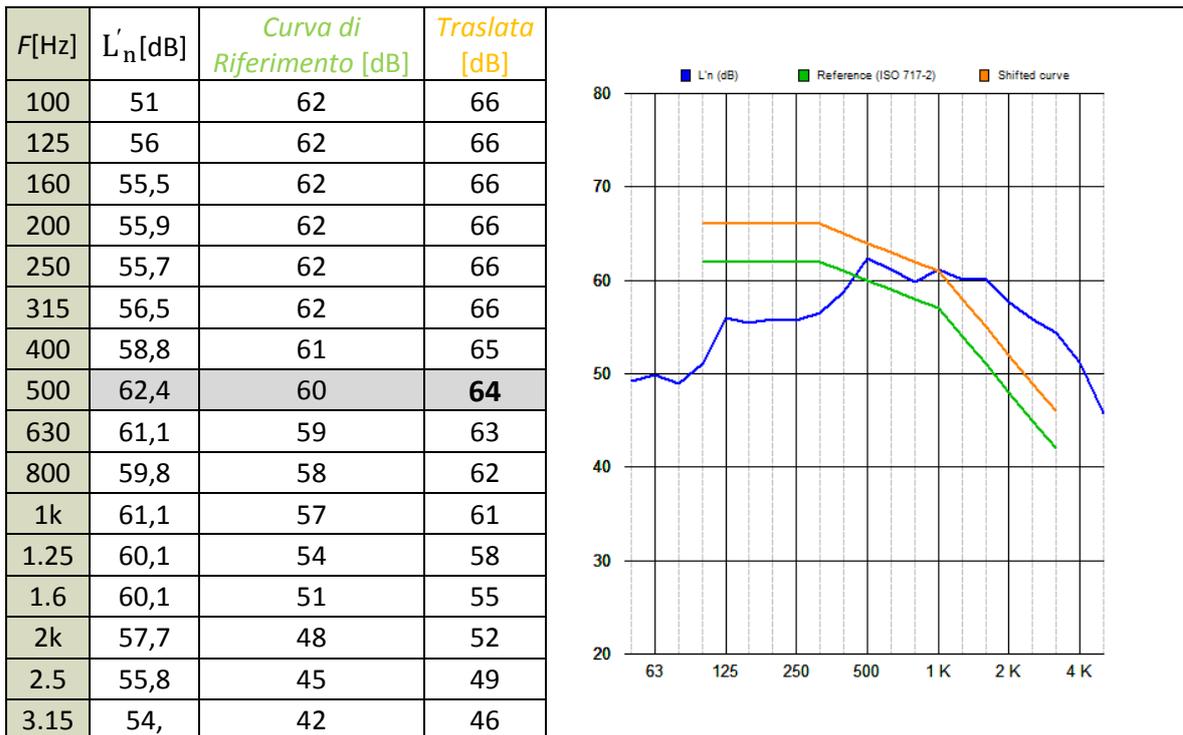
$A_0$  è posto convenzionalmente pari a  $10 \text{ m}^2$ .

Tabella 5.18 - Livello normalizzato di calpestio dell'aula 001

f [Hz]	100	125	160	200	250	315	400	500	630	800	1 k	1.25 k	1.6 k	2 k	2.5 k	3.15 k
$L'_n$ [dB]	51	56	55,5	55,9	55,7	56,5	58,8	62,4	61,1	59,8	61,1	60,1	60,1	57,7	55,8	54,4

A questo punto posso determinare l'indice di valutazione, secondo prescrizione della norma EN ISO 717-2, confrontando la curva dei valori ottenuti di  $L'_n$  con la curva di riferimento definita nella stessa norma, capitolo 3.2.4.2.

Tabella 5.19 - Esempio di traslazione della curva di riferimento, UNI EN ISO 717-2



Il software riporta inoltre il termine di adattamento definito con la relazione:

$$C_I = 10 \log \left( \sum_j 10^{L_j/10} \right) - L'_{n,W} - 15$$

che tiene conto degli scostamenti della curva di riferimento per solai grezzi:

$$L'_{n,w} (C_I) \text{ [dB]} : 64 (-8)$$

### 5.3.3\_Riepilogo dati e considerazioni

I solai degli ambienti sottoposti a suono impattivo sono rigidi, non hanno elementi resilienti che attutiscono il rumore. Da questa constatazione è possibile prevedere elevati valori di livello sonoro di calpestio, ovvero basse prestazioni acustiche.

Gli ambienti sottoposti al generatore di calpestio sono 6, costituiti dai medesimi elementi strutturali e di tamponamento. Dato che le dimensioni delle aule sono costanti, le differenze delle misurazioni ottenute derivano dalla diversa composizione delle pareti verticali o da eventuali ponti acustici. Confrontando i livelli di calpestio fra le diverse situazioni prese in considerazione, i L'<sub>n</sub> maggiori sono stati determinati dove il tamponamento in laterizio è prevalente nel perimetro e presente in modo continuo.

## Verifica dei requisiti acustici di una scuola media e proposte di miglioramento

Da questa osservazione si deduce che una buona parte del rumore viene trasmesso lateralmente per via strutturale e veicolato dai tramezzi in laterizio nell'ambiente ricevente.

Dalla *Tabella 5.20a e 5.20b* sottostante si può notare che i livelli di pressione sonora maggiori, quindi peggiori dal punto di vista prestazionale, sono stati misurati nelle aule 013 e 014.

*Tabella 5.20a - Livelli normalizzati di calpestio e relativi indici di valutazione, nella pianta sono indicati i punti microfonici e le posizioni delle sorgenti*

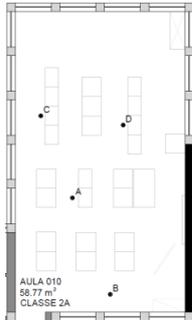
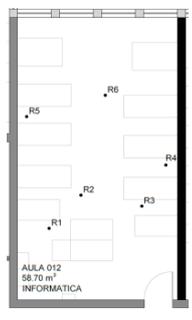
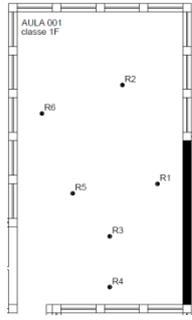
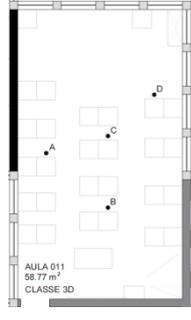
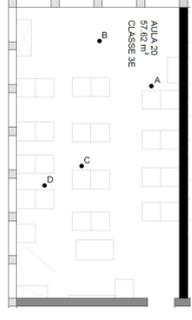
AULA RICEVENTE	001		002		013	
$L'_{n,w}$ [dB]	64		64		71	
100	51		52,5		56,5	
125	56		54,6		58,6	
160	55,5		56,7		58,5	
200	55,9		56,1		58,8	
250	55,7		57,7		62	
315	56,5		58,1		64,2	
400	58,8		59,5		65,1	
$L'_n$ 500	62,4		65,5		69,9	
630	61,1		64		69,4	
800	59,8		62,1		67	
1 k	61,1		62		67,6	
1.25 k	60,1		60,7		68,1	
1.6 k	60,1		58,8		66,2	
2 k	57,7		57,4		64,9	
2.5 k	55,8		54,6		62,7	
3.15 k	54,4		50,6		59,3	

Tabella 5.20b - Livelli normalizzati di calpestio e relativi indici di valutazione, nella pianta sono indicati i punti microfonic e le posizioni delle sorgenti.

RICEVENTE	014	015	016
$L'_{n,w}$ [dB]	71	68	69
100	51,8	50,2	46,6
125	56,5	54,5	53,9
160	58,1	56,3	55,9
200	60,1	58,4	57,4
250	63,1	60,9	59,3
315	65,1	61,9	61,5
400	65,9	63,2	63,3
$L'_n$ 500	69,6	68,6	67,3
630	71,3	67,5	67,2
800	69,1	64,2	65,5
1 k	68,1	63,9	65,9
1.25 k	69,4	64,7	66,2
1.6 k	66,6	63,3	63,8
2 k	65	61	63,1
2.5 k	62	59,2	62
3.15 k	58,2	56,3	58,8

Il grafico in *Figura 5.16* sottostante confronta i livelli normalizzati di calpestio calcolati. Le curve hanno un andamento simile, ma sono traslate tra loro, ciò deriva dal fatto che loro rispostaal rumore impattivo per bande di frequenza è la stessa, essendoi solai costituiti dalla medesima stratigrafia.

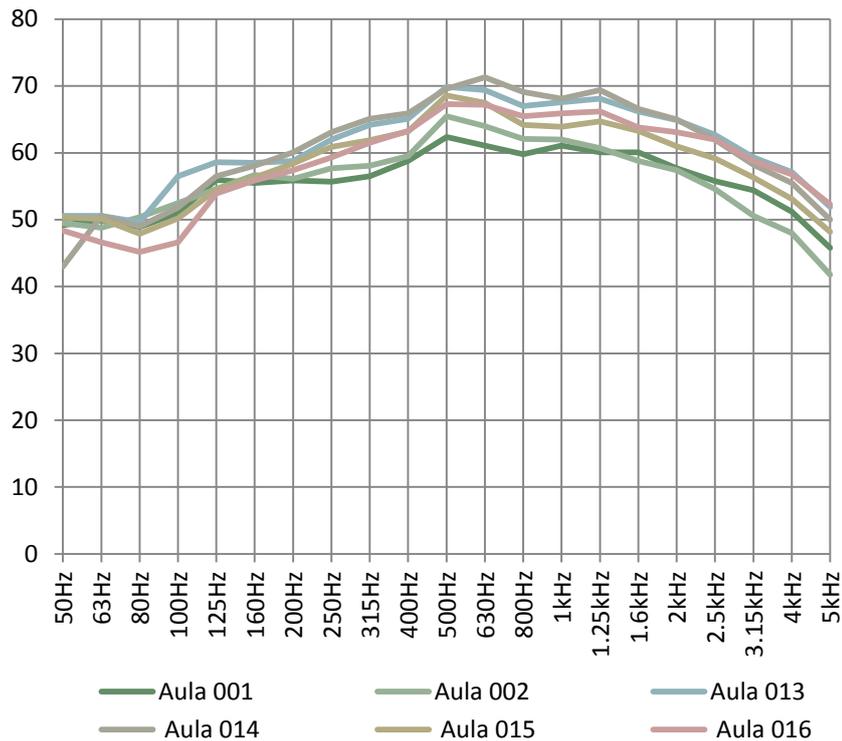


Figura 5.16 - Grafico riporta le curve di interpolazione dei livelli normalizzati di calpestio

Nel caso dell'indice di valutazione del livello di pressione sonora normalizzato al calpestio, il DPCM del '97 ha dei limiti più stringenti rispetto alla norma UNI 11367, icui valori di prestazioni base si avvicinano in due situazioni a quelli calcolati.

Tabella 5.21- Limiti normativi e legislativi di  $L'_{n,w}$

DPCM 5/12/1997	$L'_{n,w}$ [dB]
Categorie E	58

UNI 11367	Prestazione di base	Prestazione superiore
$L'_{n,w}$ [dB]	63	53

## 5.4\_Misure del dell'isolamento acustico di facciata

### 5.4.1\_Strumentazione utilizzata

Il requisito prestazionale che riguarda l'isolamento acustico delle facciate delle aule scolastiche è stato calcolato utilizzando una sorgente elettroacustica. Si tratta di una cassa acustica direzionale che emette rumore rosa, modello DIRECTone NGS1.



*Figura 5.17-Cassa acustica direzionale che emette rumore rosa, modello DIRECTone NGS1*

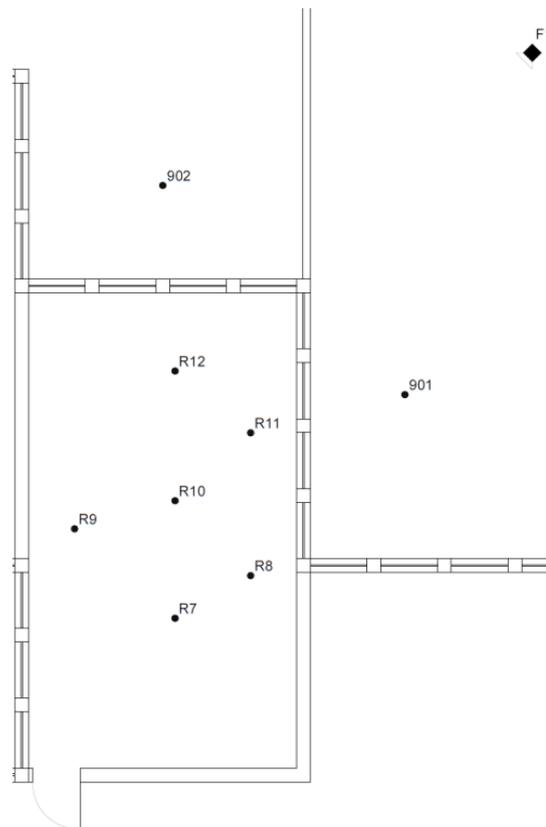
I due fonometri utilizzati per la misura del livello di pressione sonora sono gli stessi descritti per le misure dei tempi di riverbero e del potere fonoisolante.

### 5.4.2\_Procedura di misura

La normativa di riferimento che contiene le indicazioni per le misurazioni dell'isolamento acustico di facciata è la UNI EN ISO 140-5 , descritta nel capitolo 3.2.2.2. Seguendo le prescrizioni in essa contenute è stata posizionata la sorgente direzionale sul terreno, a una distanza di 7 metri, rivolta verso le facciate da testare, con un'inclinazione di circa 45° rispetto al piano normale delle stesse superfici di cui si effettua la valutazione. Sono state determinate 6 posizioni microfoniche del fonometro posto all'interno dell'aula con il

criterio che prevede le distanze minime di 0,7 metri tra punti di ricezione e 0,5 metri dalla parete; è stata posta una posizione microfonica esterna davanti a ogni facciata di cui è stato valutato il requisito di isolamento, il fonometro è stato messo a metà della lunghezza della superficie esterna della parete a 2 metri di distanza dalla stessa e a una altezza di 1,5 metri rispetto al piano della pavimentazione dell'ambiente ricevente.

A titolo di esempio si riportano i punti di misura e i valori ottenuti valutando le facciate dell'aula 002, considerata ambiente ricevente, *Figura 5.18 e Tabella 5.22*.



*Figura 5.18- Pianta dell'aula ricevente 002, sono indicate le posizioni microfoniche, interne ed esterne, e la posizione della sorgente elettroacustica*

L'acquisizione della misura dei livelli di pressione sonora è iniziata 5 secondi dopo l'accensione della sorgente sonora per una durata di 20 secondi. Abbiamo così misurato 6 livelli sonori interni per ogni facciata,  $L'_i$ , e tre livelli di pressione sonora del microfono posto all'esterno  $L_{j,2m}$ . È stato inoltre valutato il rumore di fondo all'interno dell'aula  $L_F$ .

Considerando il caso dell'aula 002 dove sono presenti due lati esposti verso l'esterno ed è stata utilizzata una sola posizione della sorgente direzionale: abbiamo ottenuto 12 livelli

sonori interni, 6 per le due posizioni microfoniche esterne relative alle facciate, indicate con i numeri 901 e 902 in questa situazione.

Tabella 5.22 - Livello di pressione sonora misurati da entrambi i fonometri.

Hz	$L'_{i,002}$ [dB]												$L_{j,901,2m}$ [dB]			$L_{j,902,2m}$ [dB]		
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	1	2	3	1	2	3
50	42,2	38,1	47,7	42,9	43,6	38	41,6	40,7	40,4	42,9	42,7	41,3	60	60,4	60,9	58,9	60,1	59,3
63	46,7	44,3	47,3	50,6	49,5	50,9	45,4	44	44,2	44,1	43,7	44,2	63,8	63,6	63,7	61,8	62,2	62,6
80	52	53	49,7	55	48,2	53,4	51,1	53,2	52,8	53,2	52,9	53,4	63,9	64,7	64	58,8	58,9	59,6
100	53	55	56,5	55,6	50,1	53,8	54	55,3	54,8	55,2	55,5	55,2	73,2	73	73,1	67,4	67,7	67,4
125	52	50,5	57,9	58,6	48,7	55,7	54,7	50,6	50,6	50,6	50,7	50,5	72,7	72,4	72,5	74,8	74,3	74,3
160	55,7	56	62,9	64,1	61,9	63,8	60,9	55,7	55,8	55,6	55,5	56,1	78,1	78,1	78,1	77,8	77,2	77,6
200	57,7	56,9	59,7	60,5	58,2	58,4	58,8	56,5	56,9	56,8	56,6	57,1	83,1	83,3	83,2	78,2	78	78,4
250	56,9	55,8	59,3	59	56	61,3	58,9	55,8	55,6	55,6	55,7	55,7	79,6	79,5	79,6	74,7	75	74,8
315	55,6	56,6	60,6	58,1	54,8	59,6	58,4	56,6	56,8	56,6	56	56,7	84,1	84,3	84,2	75,4	75,1	75,2
400	56,7	56,4	62,4	58,5	55,5	61,8	58,1	56,6	56,6	56,4	56,2	56,4	83,6	83,6	83,5	76,6	76,5	76,6
500	54,5	55,8	58,9	60,8	54,5	59,2	59,8	55,7	55,9	55,8	55,6	55,6	83,7	83,8	83,8	76	76	75,9
630	56	57,2	59,3	59,6	57,1	59,3	59,3	57,1	57,3	57,3	57	57,1	81,5	81,8	81,7	78,4	78,2	78,2
800	57,9	58,9	61,2	61,6	59,7	61,3	59,9	58,8	58,8	58,8	58,7	58,9	82,5	82,6	82,8	78,8	78,6	78,7
1 k	57,6	57,5	60,9	60,5	57,7	60,7	59,5	57,5	57,6	57,7	57,5	57,6	82	82,2	82,3	76,2	76,1	76,2
1.25 k	55,9	55,2	58,6	58,2	55,6	58,1	56,8	54,9	54,9	55	55,1	55	83,1	83,1	83,3	76,9	76,8	76,9
1.6 k	53	53,6	55,9	55,5	53,3	56,5	54,5	53,4	53,6	53,5	53,4	53,6	82	82	82	74,3	74,1	74,4
2 k	51,8	52,3	55,4	55,3	52,3	55	53,2	52,1	52,3	52,3	52,3	52,2	82,2	82,2	82,3	75,4	75,3	75,4
2.5 k	52,9	52,8	55,2	55,3	52,8	55,8	52,9	52,8	52,9	52,9	52,8	52,9	84,8	85,2	85	78,5	78,5	78,6
3.15 k	49,2	48,9	51	51,1	48,4	51,4	49,1	49,1	49,2	49,1	49	48,9	81,5	81,6	81,6	78,1	78	78,1
4 k	43,3	43,1	46,3	46,4	43,4	46,9	44,5	42,9	43,1	43,1	42,9	43,1	76,8	77	77,2	73,6	73,6	73,6
5 k	40,3	40,2	44	43,8	40,7	44	42,3	40	40,2	40,3	39,8	40	77,4	77,5	77,5	74,7	74,4	74,6

A partire dai 12 valori in frequenza, per bande di terzo di ottava,  $L'_i$  si calcola quindi il livello medio di pressione sonora all'interno dell'aula  $L_M$  quando la sorgente emette, attraverso la formula:

$$L_M = L'_{002} = 10 \log \frac{1}{N} \sum_i 10^{\frac{L_i}{10}}$$

Tabella 5.23 - Livello medio di pressione sonora misurato all'interno dell'ambiente ricevente.

Hz	100	125	160	200	250	315	400	500	630	800	1 k	1.25 k	1.6 k	2 k	2.5 k	3.15 k
$L'_{002}$	54,7	53,9	60,1	58	57,6	57,5	58,3	57,4	58	59,7	58,8	56,3	54,3	53,3	53,7	49,6

a cui sottraggo il livello del rumore di fondo  $L_F$  misurato nell'ambiente ricevente, tabellato nel capitolo 5.2.1:

$$L_{002} = 10 \log \left( 10^{\frac{L_M}{10}} - 10^{\frac{L_F}{10}} \right)$$

Tabella 5.24 - Livello medio di pressione sonora senzail rumore di fondo

Hz	100	125	160	200	250	315	400	500	630	800	1 k	1.25 k	1.6 k	2 k	2.5 k	3.15 k
$L_{002}$	54,6	53,9	60,1	58	57,6	57,5	58,3	57,4	58	59,7	58,8	56,3	54,3	53,3	53,7	49,6

Successivamente definisco la media i valori delle posizione microfoniche esterne:

$L_{902,2m}$ ,  $L_{901,2m}$ , Tabella 5.25.

Tabella 5.25 - Livello medio di pressione sonora esterno

Hz	100	125	160	200	250	315	400	500	630	800	1 k	1.25 k	1.6 k	2 k	2.5 k	3.15 k
$L_{901,2m}$	73,1	72,5	78,1	83,2	79,6	84,2	83,6	83,8	81,7	82,6	82,2	83,2	82	82,2	85	81,6
$L_{902,2m}$	67,5	74,5	77,5	78,2	74,8	75,2	76,6	76	78,3	78,7	76,2	76,9	74,3	75,4	78,5	78,1

A questo punto ho tutti gli elementi per calcolare l'isolamento acustico delle due facciate normalizzato rispetto al tempo di riverberazione dell'aula ricevente T, con  $T_0 = 0,5$  secondi:

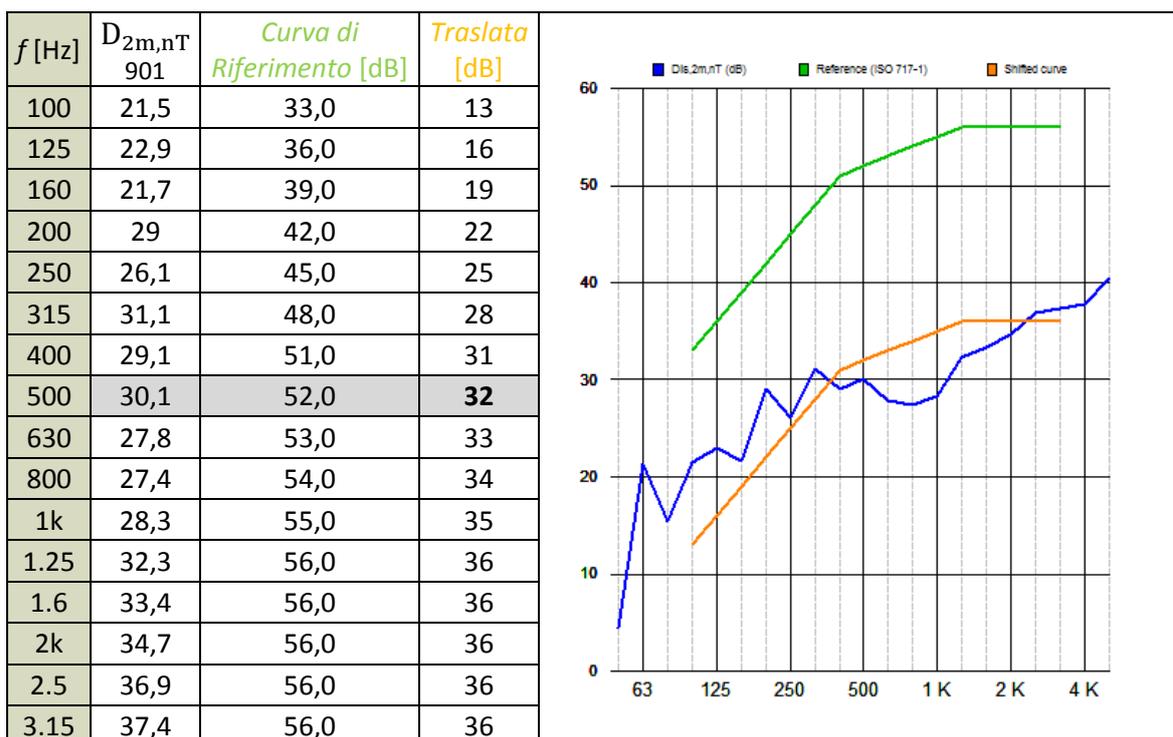
$$D_{2m,nT} = L_{j,2m} - L_i + 10 \log \left( \frac{T}{T_0} \right)$$

Tabella 5.26- Isolamenti acusticnormalizzati di facciata relativi alle due pareti esterne dell'aula 002

		100	125	160	200	250	315	400	500	630	800	1 k	1.25 k	1.6 k	2 k	2.5 k	3.15 k
Facciata 901	$D_{2m,nT}$	21,5	22,9	21,7	29	26,1	31,1	29,1	30,1	27,8	27,4	28,3	32,3	33,4	34,7	36,9	37,4
Facciata 902	$D_{2m,nT}$	15,9	24,8	21,1	24	21,3	22,1	22,1	22,3	24,4	23,5	22,3	26	25,7	27,8	30,5	33,9

I valorifrequenza mi permettono di ottenere, in un grafico con la frequenza alle ascisse e il livello di pressione sonora nelle ordinate, la curva dei valori di  $D_{2m,nT}$  che confronto con la curva di riferimento definita nella norma UNI EN 717-1, capitolo 3.2.4.1, per determinare l'indice di valutazione dell'isolamento acustico di facciata.

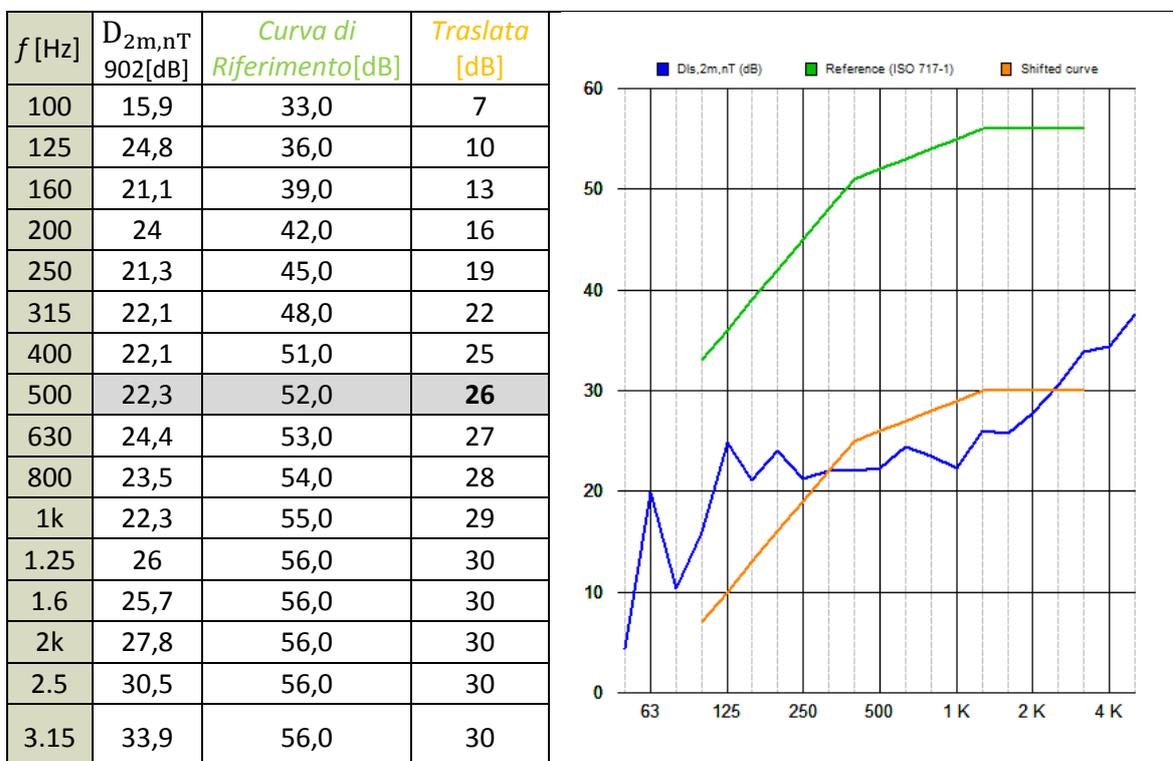
Tabella 5.27- Esempio di traslazione della curva di riferimento, posizione 901, UNI EN ISO 717-1.



Il software riporta inoltre i termini di adattamento  $R'_w$  (C ; Ctr) [dB] relativi all'indice di valutazione:

$$D_{2m,nT,w}(C ; Ctr) = 32(-1 ; -3)$$

Tabella 5.28 - Esempio di traslazione della curva di riferimento, posizione 902, UNI EN ISO 717-1.



$$D_{2m,nT,w}(C ; Ctr) = 26(-1 ; -2)$$

L'indice da confrontare con i limiti dei requisiti acustici lo ottengo mediando i risultati con la formula definita nel capitolo 3.2.1:

$$D'_{2m,nT.w} = 30 \text{ dB}$$

#### 5.4.3\_Riepilogo dati e considerazioni

I risultati ottenuti dalle misura dell'isolamento acustico di facciata sono stati fortemente condizionati dalle criticità riscontrate negli elementi costruttivi che dividono l'ambiente dall'esterno. Osservando infattile immagini riportate nella *Figura 5.18* si può notare che lo strato di isolamento di 5 cm dei pannelli di polistirene espanso è interrotto in corrispondenza dei pilastri portanti in cemento e dei tubi degli impianti. Inoltre gli elementi scolorari in lamiera, presenti tra due pilastri a dividere due serramenti, non sono completamente saturi di materiale isolante perché nel tempo sono state perse le perline di polistirolo con funzione coibente. Questesituazioni costituiscono dei ponti acustici che veicolano il rumore all'interno dell'ambiente, peggiorando i valori di isolamento.



*Figura 5.18 - Immagini che documentano le criticità costruttive rilevate*

Nella *Tabella 5.29a* e *5.29b* sono riportati i risultati delle misure effettuate per ogni aula ricevente, le relative posizioni microfoniche e della sorgente in pianta. I valori rilevati, compresi tra i 20 dB e i 30 dB, risultano essere non sufficienti per garantire un isolamento acustico dai rumori esterni. Questi esiti si riscontrano sebbene nel periodo tra il 2004 e il 2007 sia stata effettuata la completa sostituzione degli infissi.

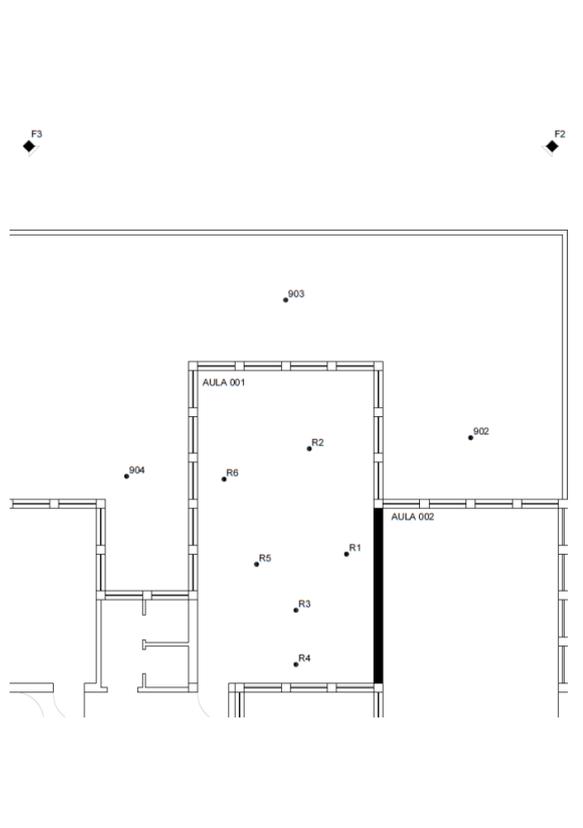
<b>2 k</b>	19,1	25,3	19,5	22,1		
<b>2.5 k</b>	22,8	29	22,4	23,6		
<b>3.15 k</b>	23,2	31,9	23,2	24		

Nei grafici di *Figura 5.19* sono messi a confronto i valori di isolamento di ogni superficie esternapresente nella stessa aula.

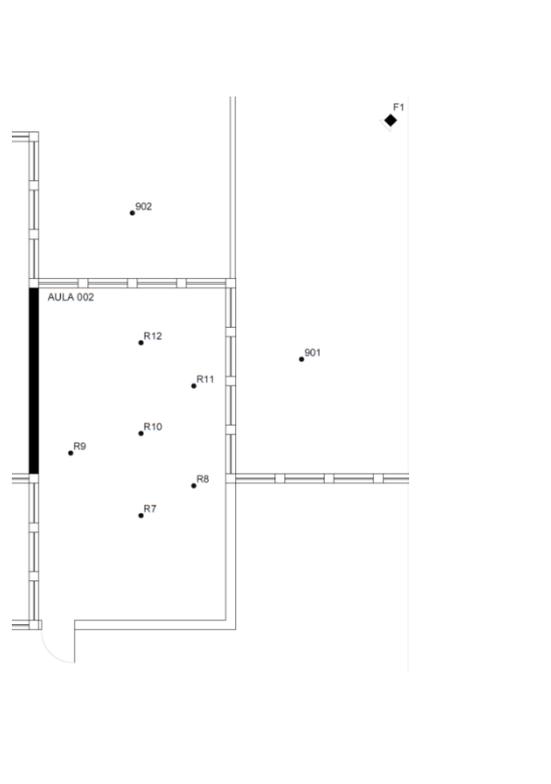
Le curve in corrispondenza delle basse frequenze presentano dei cali repentini di  $D_{2m,nT}$  dovuti a fenomeni di risonanza dell'ambiente interno. In corrispondenza delle alte frequenze invece sono individuabili effetti di coincidenza, intorno ai 1000 Hz, in maniera più o meno evidente, per cui le tracce delle onde sonore in direzione parallela alle superfici hannouna lunghezza d'onda sonora pari a quella delle onde flessionali dell'infisso. Questo determinaun incremento di energia sonora trasmessa e un calo di  $D_{2m,nT}$  nell'intorno della frequenzacritica. L'effetto di coincidenza, chedipende dallo spessore e dalle caratteristiche del materiale, potrebbe essere attenuato utilizzando dei serramenti aventi due vetri con masse distribuite in maniera asimmetrica invece che, come in questo caso, 3+3 mm. In tal modo otterremmosuperficiecon lunghezze d'onda flessionale differenti e potremmo individuare sulla curva due cali di  $D_{2m,nT}$  accostati aventi minore entità.

Tabella 5.29a- Valori di isolamento normalizzato di facciata e relativi indici di valutazione

AULARICEVENTE	001 PT				
SORGENTE	F2		F3		D'_{2m,nT.w}
FACCIATA	902	903	903	904	
D_{2m,nT.w} [dB]	27	31	29	26	28,7 dB
D_{2m,nT} [dB]	100	19,2	25	25,1	25,4
	125	24,6	24,5	24,6	21,4
	160	19,7	15,9	18,5	20,8
	200	28,1	25	26,4	28,4
	250	25,9	27,2	24,7	22,2
	315	27,5	30,4	31,1	25,6
	400	25,9	30,4	28,2	26,3
	500	25,9	29	27,3	25,5
	630	25,1	27,4	23,8	22,6
	800	23,9	28,3	27,7	22,6
	1 k	24,4	29,8	27,5	24,3
	1.25 k	25,7	29,6	26,4	22
	1.6 k	30,6	33,8	30,1	26,8
	2 k	31,2	32,8	31	33,1
	2.5 k	28,9	32,5	33,2	31,8
3.15 k	28	35,3	37,3	33,9	

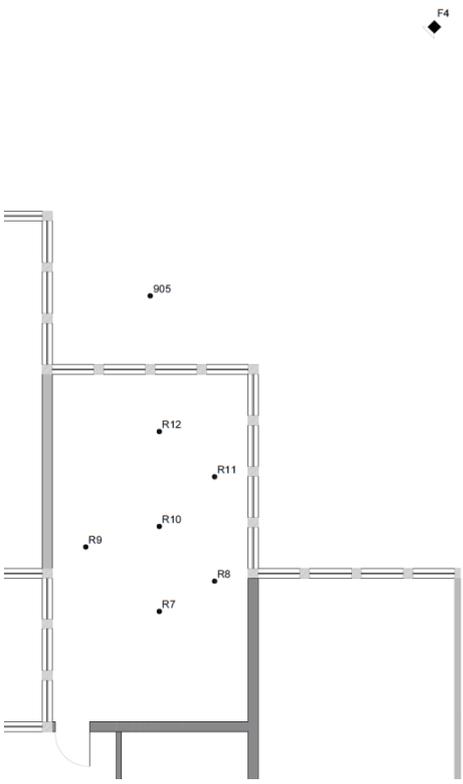


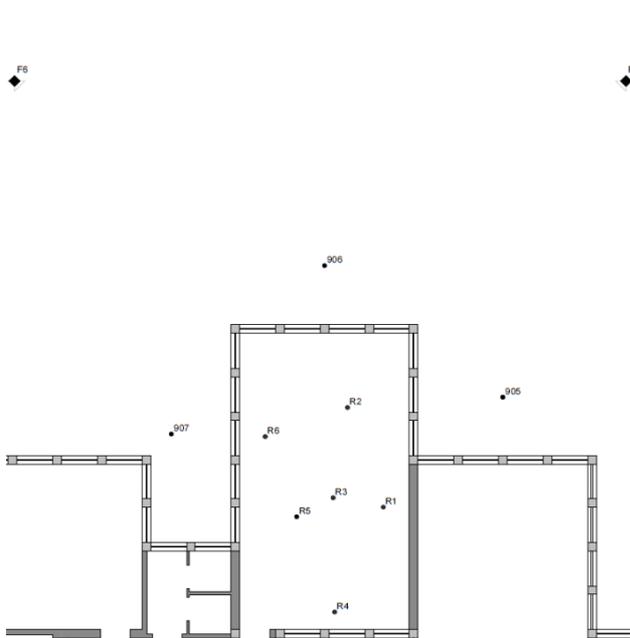
AularICEVENTE	002 PT		
SORGENTE	F1		D'_{2m,nT.w}
FACCIATA	901	902	
D_{2m,nT.w} [dB]	32	26	30dB
D_{2m,nT} [dB]	100	21,5	15,9
	125	22,9	24,8
	160	21,7	21,1
	200	29	24
	250	26,1	21,3
	315	31,1	22,1
	400	29,1	22,1
	500	30,1	22,3
	630	27,8	24,4
	800	27,4	23,5
	1 k	28,3	22,3
	1.25 k	32,3	26
	1.6 k	33,4	25,7
	2 k	34,7	27,8
	2.5 k	36,9	30,5
3.15 k	37,4	33,9	



# Verifica dei requisiti acustici di una scuola media e proposte di miglioramento

Tabella 5.29b - Valori di isolamento normalizzato di facciata e relativi indici di valutazione

AulaRICEVENTE	020 P1		
SORGENTE	905		
FACCIATA	901		
$D_{2m,nT,w}$ [dB]	27 dB		
$D_{2m,nT}$ [dB]			
100	18,7		
125	17		
160	18,4		
200	21,1		
250	22,3		
315	23,4		
400	21,9		
500	25,1		
630	25,8		
800	25,5		
1 k	25,2		
1.25 k	26,4		
1.6 k	29,2		
2 k	29,4		
2.5 k	30,8		
3.15 k	33		

AulaRICEVENTE	011 P1				
SORGENTE	F5		F6		
FACCIATA	905	906	906	907	
$D_{2m,nT,w}$ [dB]	22	25	21	23	
$D_{2m,nT}$ [dB]					
100	13,7	19,9	21,3	18,7	
125	22,1	19	16,5	15,9	
160	22,4	13,1	12,5	20,1	
200	21,9	13,9	13,5	18,4	
250	16,7	22,5	20,7	17,8	
315	22,8	22,8	22,2	17,7	
400	22,3	22,4	23,7	20,9	
500	26	23	19,1	23,2	
630	25,5	23,3	21,9	24	
800	24,3	24,7	22,4	24,8	
1 k	23	22,8	22,2	25,5	
1.25 k	20,8	23	21,3	21,4	
1.6 k	18	22,5	19,9	22,1	
2 k	19,1	25,3	19,5	22,1	
2.5 k	22,8	29	22,4	23,6	
3.15 k	23,2	31,9	23,2	24	

Nei grafici di *Figura 5.19* sono messi a confronto i valori di isolamento di ogni superficie esterna presente nella stessa aula.

Le curve in corrispondenza delle basse frequenze presentano dei cali repentini di  $D_{2m,nT}$  dovuti a fenomeni di risonanza dell'ambiente interno. In corrispondenza delle alte frequenze invece sono individuabili effetti di coincidenza, intorno ai 1000 Hz, in maniera più o meno evidente, per cui le tracce delle onde sonore in direzione parallela alle superfici hanno una lunghezza d'onda sonora pari a quella delle onde flessionali dell'infisso. Questo determina un incremento di energia sonora trasmessa e un calo di  $D_{2m,nT}$  nell'intorno della frequenza critica. L'effetto di coincidenza, che dipende dallo spessore e dalle caratteristiche del materiale, potrebbe essere attenuato utilizzando dei serramenti aventi due vetri con masse distribuite in maniera asimmetrica invece che, come in questo caso, 3+3 mm. In tal modo otterremmo superfici con lunghezze d'onda flessionale differenti e potremmo individuare sulla curva due cali di  $D_{2m,nT}$  accostati aventi minore entità.

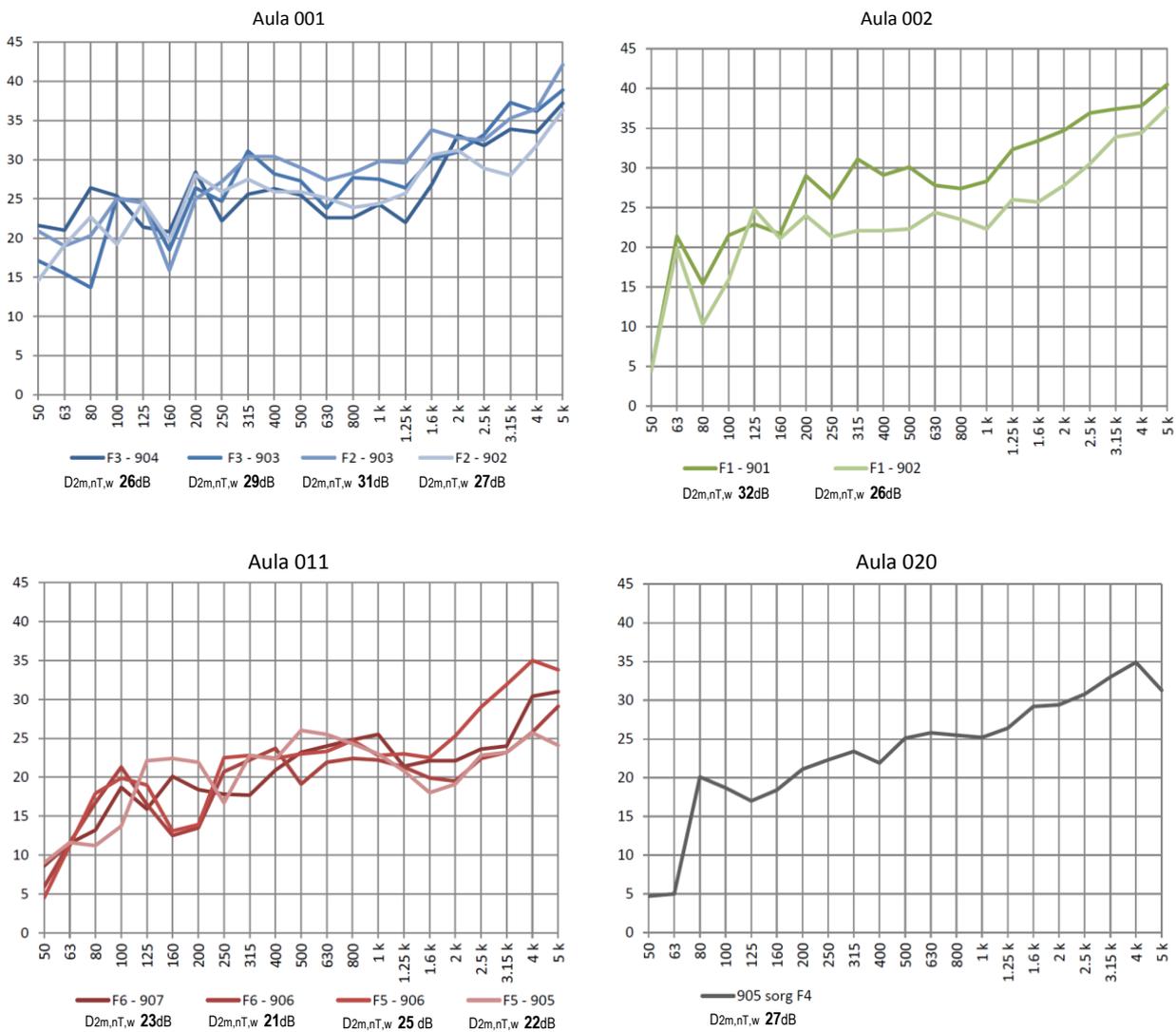


Figura 5.19 - Confronto delle curve dei valori del livello normalizzato di isolamento di facciata.

Una ulteriore conferma del fatto che i valori di isolamento di facciata non sono accettabili, l'abbiamo facendo un confronto con i limiti prescritti dalla legge, DPCM del 5/12/1997, e dalla norma UNI 11367.

Tabella 5.30 - Valori limite dell'isolamento normalizzato di facciata

DPCM 5/12/1997	$D_{2m,nT,w}$ [dB]	
Categorie E	48	

UNI 11367	Prestazione di base	Prestazione superiore
$D_{2m,nT,w}$ [dB]	38	43

## 5.5\_Misure dell'indice di trasmissione del parlato

### 5.5.1\_Strumentazione utilizzata

L'intelligibilità della parola all'interno delle aule è stata valutata utilizzando l'indice STI, Speech Transmission Index. Quest'ultimo ha lo scopo di quantificare, in modo oggettivo, la capacità di un ascoltatore di comprendere frasi o parole pronunciate da un parlatore collocato in una specifica posizione. Per effettuare tali misurazioni sono state utilizzate strumentazioni in accordo con lo standard europeo IEC 60268-16:2011, che descrive in dettaglio vari metodi di misura dell'indice STI.

Il microfono utilizzato per acquisire ed elaborare le informazioni è il modello Analyser XL2, che permette di associare le caratteristiche dell'ambiente, tempo di riverberazione e rumore di fondo, con la funzione di trasferimento della modulazione  $m(f)$ .

Il dispositivo impiegato per emettere il segnale acustico è la TalkBox NTi Audio, che simula il parlato umano e consente varie tipologie di calibrazioni sonore.



Figura 5.20 - l'Analyser XL2 e TalkBox NTi Audio

### 5.5.2\_Procedura di di misura

La misura dell'indice STI è stata realizzata cercando di riprodurre condizioni aderenti alla situazione di utilizzo dell'aula, in termini di rapporto tra parlatore e ascoltatori. La

sorgente Talkbox è stata posizionata in corrispondenza della cattedra, ovvero la posizione da dove parla più frequentemente l'insegnante, ad un'altezza di 1,5 metri dal pavimento. Le posizioni microfoniche invece sono state distribuite nell'aula in modo tale da esaminare la ricezione del suono in differenti punti. L'analizzatore è stato posto in almeno 6 posizioni, dietro i banchi.

Per ogni posizione, durante l'emissione del rumore campione, l'acquisizione dei dati è durata 15 secondi e sono state ripetute 2 prove per ogni posizione microfonica.

Ai fini del calcolo dell'indice STI con diverse condizioni, sono stati misurati 3 livelli di pressione sonora del rumore di fondo:

- il livello sonoro del traffico stradale,
- il livello sonoro del rumore della pioggia e del traffico,
- il livello sonoro del rumore di fondo di un proiettore.

Il rumore di fondo antropico, costituito dal brusio della scolaresca durante la lezione, può essere pertinente ma tale valore è di difficile utilizzo a causa della variabilità che lo caratterizza.

Ad ogni misurazione dello STI l'Analyser XL2 riporta livello equivalente di pressione sonora, l'indice STI e la valutazione dello stesso in una scala soggettiva. Permette inoltre di calcolare i valori dell'indice STIPA, descritto nel capitolo 2.6.2.2, per valutare l'intelligibilità del parlato.

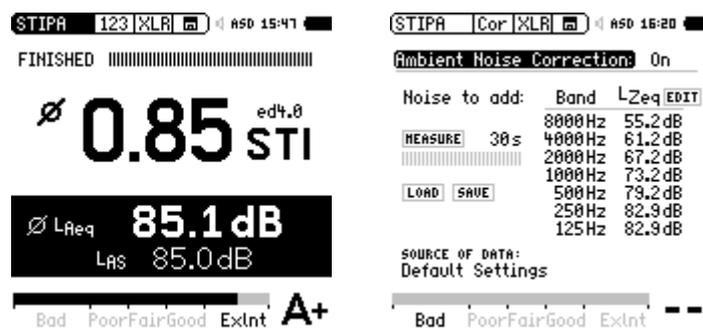


Figura 5.21 - Display dell'Analyser XL2 durante una misurazione

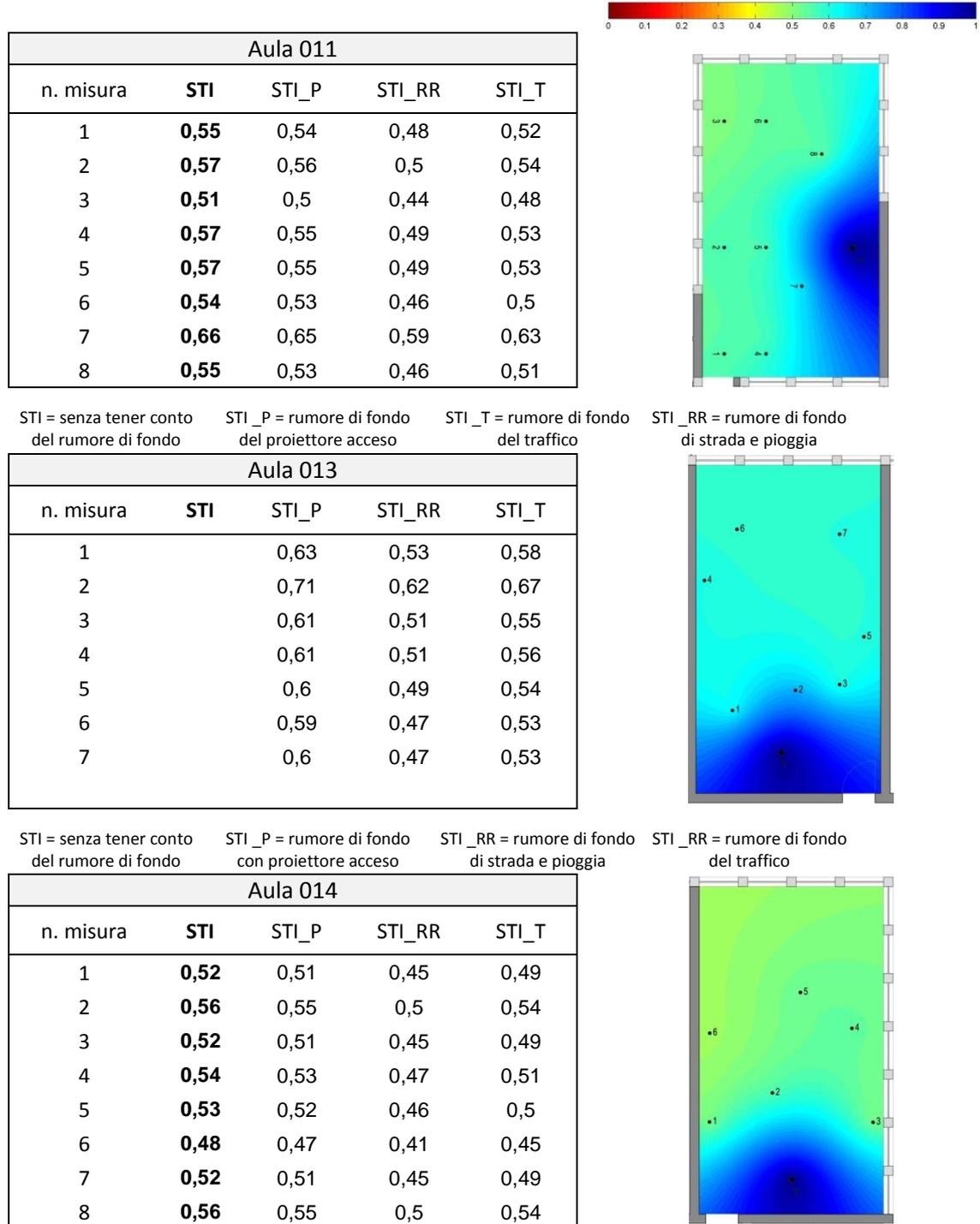
### 5.5.3\_Riepilogo dati di misura e considerazioni

L'indice STI è stato misurato in 4 aule differenti. Secondo lo standard europeo IEC 60268-16:2011, Appendice G, un buon valore di intelligibilità del parlato si attesta per un'aula scolastica a 0,62. Gli indici misurati sono compresi tra 0,5 e 0,6. Un'eccezione è

rappresenta dall'aula 013 che, come nel caso del tempo di riverbero, presenta risultati più vicini ai valori ottimali rispetto agli altri ambienti,.

Osservando le mappature di colore della *Tabella 5.31* è possibile notare una distanza di circa 2,5 metri oltre la quale l'indice si appiattisce intorno a valori di 0,6 per l'aula 013 e di 0,5 per le altre aule.

Tabella 5.31 - Valori dell'indice STI misurati e calcolati con i rumori di fondo



## Verifica dei requisiti acustici di una scuola media e proposte di miglioramento

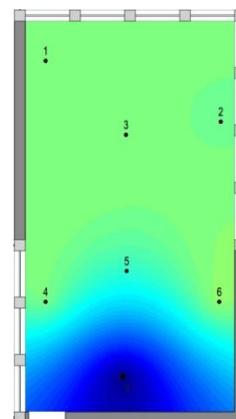
STI = senza tener conto  
del rumore di fondo

STI\_P = rumore di fondo  
con proiettore acceso

STI\_RR = rumore di fondo  
di strada e pioggia

STI\_T = rumore di fondo  
del traffico

Aula 020				
n. misura	STI	STI_P	STI_RR	STI_T
1	<b>0,5</b>	0,49	0,42	0,47
2	<b>0,51</b>	0,5	0,44	0,48
3	<b>0,53</b>	0,52	0,46	0,5
4	<b>0,52</b>	0,51	0,44	0,48
5	<b>0,59</b>	0,58	0,52	0,56
6	<b>0,49</b>	0,48	0,42	0,45
7	<b>0,5</b>	0,49	0,42	0,47
8	<b>0,51</b>	0,5	0,44	0,48



STI = senza tener conto  
del rumore di fondo

STI\_P = rumore di fondo  
con proiettore acceso

STI\_RR = rumore di fondo  
di strada e pioggia

STI\_T = rumore di fondo  
del traffico

Nella IEC 60268-16, oltre ai valori ottimali dell'indice STI con riferimento alla destinazione d'uso dell'ambiente, è riportata una scala generale di qualità della comunicazione. I valori ottenuti dalle misurazioni si collocano nella fascia che definisce una discreta intelligibilità.

Tabella 5.32 - Classi di qualità soggettiva

Classe di qualità della comunicazione	Valore dell'indice STI
Pessima	<0,30
Scadente	0,30 - 0,45
Discreta	0,45 - 0,60
Buona	0,60 - 0,75
Eccellente	> 0,75

La normativa UNI 11367 indica che per ambienti adibiti al parlato, il valore dello STI deve essere superiore a 0,6. La quasi totalità delle misurazioni sono inferiori a tale soglia, solo i valori riferiti all'aula 013 possono essere considerati con certezza nell'ordine di quelli consigliati dalla normativa e dallo standard IEC 60268-16.

## 5.6\_Riepilogo misure e dati

Tabella 5.33 - Riepilogo valori ottenuti dalle misurazioni

Aula	RAP	100	125	160	200	250	315	400	500	630	800	1 k	1.25 k	1.6 k	2 k	2.5 k	3.15 k
001	R'w Oriz	R'															
	53	39	39,7	41,5	45,7	48,1	49,4	48,8	45,6	48,6	51,4	52,3	54,5	56,5	59,5	61,6	64,3
	L'n,w	L'n															
	64	51	56	55,5	55,9	55,7	56,5	58,8	62,4	61,1	59,8	61,1	60,1	60,1	57,7	55,8	54,4
	Dls,2m,nT,w	Dls,2m,nT															
	27	18,5	23,7	19,4	28,3	26	28,4	26,7	25,7	24,8	23,6	24,2	25,5	30,4	31	28,8	27,9
31	24,3	23,6	15,6	25,2	27,3	31,3	31,2	28,8	27,1	28	29,6	29,4	33,6	32,6	32,4	35,2	
29	24,4	23,7	18,2	26,6	24,8	32	29	27,1	23,5	27,4	27,3	26,2	29,9	30,8	33,1	37,2	
26	24,7	20,5	20,5	28,6	22,3	26,5	27,1	25,3	22,3	22,3	24,1	21,8	26,6	32,9	31,7	33,8	
Aula	RAP	100	125	160	200	250	315	400	500	630	800	1 k	1.25 k	1.6 k	2 k	2.5 k	3.15 k
002	R'w	R'															
	45	29,5	37,9	34,1	35,9	38,6	36,7	39,5	39,1	40,8	43	45,1	48,4	51,8	54,6	56,2	57,4
	L'n,w	L'n															
	64	52,5	54,6	56,7	56,1	57,7	58,1	59,5	65,5	64	62,1	62	60,7	58,8	57,4	54,6	50,6
	Dls,2m,nT,w	Dls,2m,nT															
	32	20,7	22,7	21,5	29,2	26,3	31,4	29,7	29,9	27,7	27,5	28,4	32,2	33,3	34,7	36,9	37,4
26	15,1	24,6	20,9	24,2	21,5	22,4	22,7	22,1	24,3	23,6	22,4	25,9	25,6	27,8	30,5	33,9	
Aula	RAP	100	125	160	200	250	315	400	500	630	800	1 k	1.25 k	1.6 k	2 k	2.5 k	3.15 k
020	R'w	R'															
	45	34,1	35	37,6	37	38,8	38,6	38,8	39	40,9	43,5	45,5	47,7	49,7	51	51,2	52,1
	Dls,2m,nT,w	Dls,2m,nT															
	27	18,7	17	18,4	21,1	22,3	23,4	21,9	25,1	25,8	25,5	25,2	26,4	29,2	29,4	30,8	33
	STI	0,5	0,51	0,53	0,52	0,59	0,49	0,5	0,51								
Aula	RAP	100	125	160	200	250	315	400	500	630	800	1 k	1.25 k	1.6 k	2 k	2.5 k	3.15 k
013	R'w Oriz	R'															
	52	33,8	38,3	45,4	45,9	48,5	46,8	48,4	45,8	47	49,5	50,8	52,6	55,1	57,2	59,1	61,6
	L'n,w	L'n															
	71	56,5	58,6	58,5	58,8	62	64,2	65,1	69,9	69,4	67	67,6	68,1	66,2	64,9	62,7	59,3
Aula	RAP	100	125	160	200	250	315	400	500	630	800	1 k	1.25 k	1.6 k	2 k	2.5 k	3.15 k
011	Dls,2m,nT,w	Dls,2m,nT															
	22	13,7	22,1	22,4	21,9	16,7	22,8	22,3	26	25,5	24,3	23	20,8	18	19,1	22,8	23,2
	25	19,9	19	13,1	13,9	22,5	22,8	22,4	23	23,3	24,7	22,8	23	22,5	25,3	29	31,9
	21	21,3	16,5	12,5	13,5	20,7	22,2	23,7	19,1	21,9	22,4	22,2	21,3	19,9	19,5	22,4	23,2
	23	18,7	15,9	20,1	18,4	17,8	17,7	20,9	23,2	24	24,8	25,5	21,4	22,1	22,1	23,6	24

## Verifica dei requisiti acustici di una scuola media e proposte di miglioramento

	STI	0,55	0,57	0,51	0,57	0,57	0,54	0,66	0,66	0,55							
Aula	RAP	<b>100</b>	<b>125</b>	<b>160</b>	<b>200</b>	<b>250</b>	<b>315</b>	<b>400</b>	<b>500</b>	<b>630</b>	<b>800</b>	<b>1 k</b>	<b>1.25 k</b>	<b>1.6 k</b>	<b>2 k</b>	<b>2.5 k</b>	<b>3.15 k</b>
014	R'w	R'															
	43	36,8	36,7	36	36,1	36,2	35,3	36,4	37,3	39,8	41,7	43,1	44,2	45,7	46,5	46,9	47,8
	R'w Oriz.	R'															
	50	37,4	38,4	41,5	43,3	45	45,2	46,4	43,6	45,5	48,9	49,4	50,4	53,6	55,6	57,7	60,5
	L'n,w	L'n															
	71	51,8	56,5	58,1	60,1	63,1	65,1	65,9	69,6	71,3	69,1	68,1	69,4	66,6	65	62	58,2
	STI	0,52	0,56	0,52	0,54	0,53	0,48	0,52	0,56								
Aula	RAP	<b>100</b>	<b>125</b>	<b>160</b>	<b>200</b>	<b>250</b>	<b>315</b>	<b>400</b>	<b>500</b>	<b>630</b>	<b>800</b>	<b>1 k</b>	<b>1.25 k</b>	<b>1.6 k</b>	<b>2 k</b>	<b>2.5 k</b>	<b>3.15 k</b>
015	L'n,w	L'n															
	68	50,2	54,5	56,3	58,4	60,9	61,9	63,2	68,6	67,5	64,2	63,9	64,7	63,3	61	59,2	56,3
Aula	RAP	<b>100</b>	<b>125</b>	<b>160</b>	<b>200</b>	<b>250</b>	<b>315</b>	<b>400</b>	<b>500</b>	<b>630</b>	<b>800</b>	<b>1 k</b>	<b>1.25 k</b>	<b>1.6 k</b>	<b>2 k</b>	<b>2.5 k</b>	<b>3.15 k</b>
016	L'n,w	L'n															
	69	46,6	53,9	55,9	57,4	59,3	61,5	63,3	67,3	67,2	65,5	65,9	66,2	63,8	63,1	62	58,8
Aula	RAP	<b>100</b>	<b>125</b>	<b>160</b>	<b>200</b>	<b>250</b>	<b>315</b>	<b>400</b>	<b>500</b>	<b>630</b>	<b>800</b>	<b>1 k</b>	<b>1.25 k</b>	<b>1.6 k</b>	<b>2 k</b>	<b>2.5 k</b>	<b>3.15 k</b>
025	R'w Oriz.	R'															
	52	38,2	38,8	41,4	42,8	45,4	47,1	48,8	46,6	48	49,3	51,7	53,1	56,5	58,3	60,9	63,8
Aula	RAP	<b>100</b>	<b>125</b>	<b>160</b>	<b>200</b>	<b>250</b>	<b>315</b>	<b>400</b>	<b>500</b>	<b>630</b>	<b>800</b>	<b>1 k</b>	<b>1.25 k</b>	<b>1.6 k</b>	<b>2 k</b>	<b>2.5 k</b>	<b>3.15 k</b>
026	R'w	R'															
	44	33,6	29,2	38,1	38,7	39,3	38,4	36,7	40,1	41,6	43,4	44,5	45,7	46,8	46,9	46,8	48,3

## **6\_Modellazione del caso di studio**

### **6.1\_Premessa**

Con lo scopo di proporre e verificare eventuali interventi di miglioramento acustico, è stato ricreato il modello virtuale della scuola media Galileo Galilei in un software di simulazione. Il programma in questione è Acustica, sviluppato dalla Namirial Spa. Acustica permette di calcolare i requisiti acustici passivi degli edifici secondo le indicazioni del DPCM del 5/12/1997, a partire da un modello geometrico cui sono stati associati materiali e classi di appartenenza dei locali.

Ad oggi non è stato ancora emanato il decreto inerente le modalità per la progettazione acustica degli edifici, come invece prevede la Legge 447 del 1995. Questa lacuna

normativa potrebbe formalmente ostacolare la corretta progettazione acustica degli edifici. E' tuttavia possibile progettare correttamente un edificio e valutare in via previsionale i relativi requisiti acustici passivi applicando una serie di norme tecniche contenenti degli specifici metodi di calcolo.

Il programma Acustica calcola le grandezze con i metodi descritti dalle norme UNI EN 12354 parte 1, 2 e 3, riportate nel paragrafo 3.2.4, definendo i rispettivi descrittori e indici di valutazione.

Tali metodi di calcolo contengono modelli previsionali la cui accuratezza dei risultati dipende dai dati immessi; questi sono generalmente ottenuti da misure eseguite in laboratorio, in opera o da estrapolazioni matematiche su modelli sperimentali.

### **6.2\_Dati in ingresso**

I parametri generali richiesti dal software sono:

- l'area acustica di appartenenza all'interno della zonizzazione comunale;
- la categoria dell'edificio;
- il metodo di calcolo.

La scuola media Galileo Galilei è localizzata in zona acustica III, area di tipo misto e rientra nella categoria D "edifici adibiti ad ospedali, cliniche, case di cura". La norma UNI EN 12354 prevede due metodi di calcolo dei requisiti acustici, un metodo semplificato

che determina solo l'indice di valutazione, e un metodo dettagliato che riporta anche i risultati del descrittore per frequenza. Viene utilizzato quest'ultimo al fine di ottenere maggiori informazioni.

Il programma consente di inserire i dati geometrici dell'edificio, fornendo le dimensioni e la posizioni dei locali e degli elementi costruttivi. Permette di assegnare le soluzioni costruttive e le caratteristiche dei materiali necessarie a determinare le prestazioni acustiche degli ambienti. Nel modello non possono essere riprodotte mancanze o criticità degli elementi costruttivi, che abbiamo visto essere presenti nell'edificio.

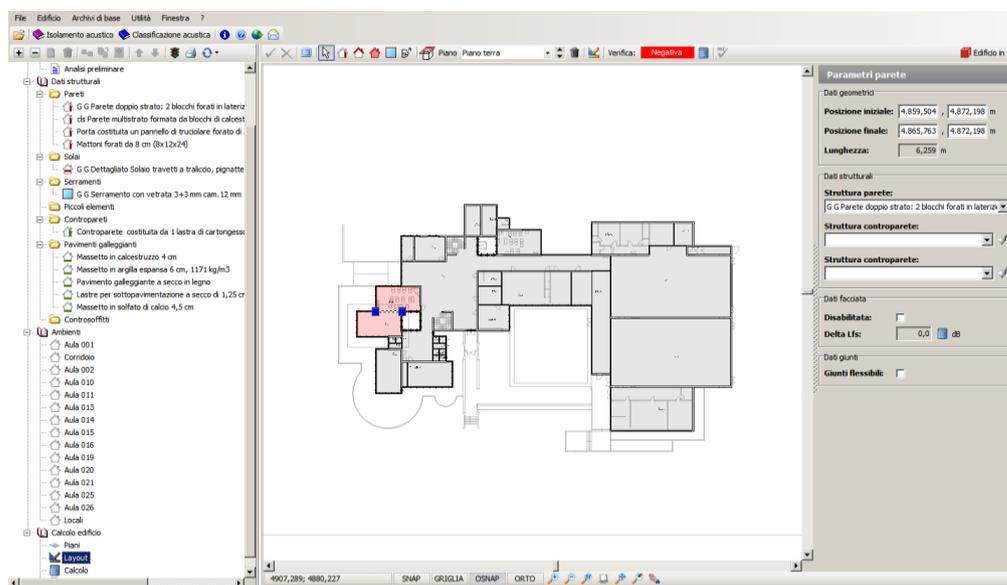


Figura 6.1 - Interfaccia del software

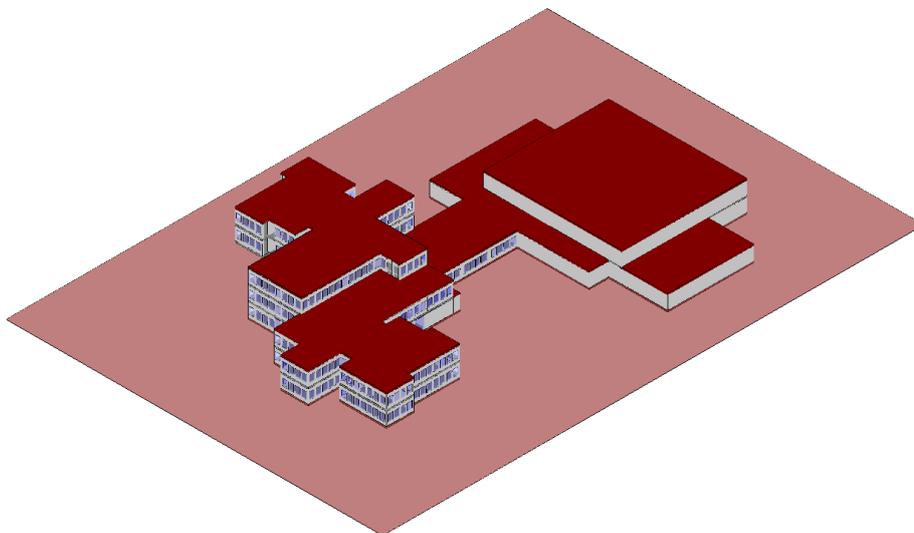
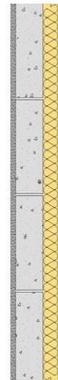


Figura 6.2 - Modello 3d della scuola utilizzato per le simulazioni

Di seguito sono elencati gli elementi costruttivi utilizzati nel modello di simulazione e presenti nello stato di fatto, le relative caratteristiche acustiche e prestazionali.

- Parete multistrato formata da blocchi di calcestruzzo da 9 cm, pannello isolante 5 cm:



Parete multistrato formata da blocchi di calcestruzzo cellulare da 9 cm, intonacati esternamente con 1,5 cm di spessore, e controparete costituita da un pannello in lana di vetro spesso 5 cm incollato ad una lastra di gesso rivestito di 1,3 cm con un foglio di alluminio interposto	
Spessore: 16,8 cm	Massa superficiale: 213,5 kg/m <sup>2</sup>

Potere fonoisolante R [dB]

100	125	160	200	250	315	400	500	630	800	1000	1250	1600	2000	2500	3150
63,8	40,0	41,0	48,0	48,0	51,0	59,0	60,0	64,0	67,0	69,0	66,0	66,0	69,0	73,0	76,0

Indice di valutazione ( $R_w$ ): 63,8 dB

- Parete doppio strato formata da 2 blocchi forati in laterizio 12 cm, intercapedine 2 cm:



Parete doppio strato realizzata con due elementi forati di laterizio normale e fori orizzontali, intonaco con malta M3, spessore 1,5 cm sul lato esterno, camera d'aria spessa 2 cm
---

## Verifica dei requisiti acustici di una scuola media e proposte di miglioramento

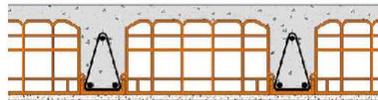
Spessore: 29 cm	Massa superficiale: 268 kg/m <sup>2</sup>
-----------------	---

Potere fonoisolante R [dB]

100	125	160	200	250	315	400	500	630	800	1000	1250	1600	2000	2500	3150
39,1	38,1	40,3	38,1	35,4	37,5	39,1	41,3	45,0	45,6	47,6	47,6	49,2	53,6	55,6	57,1

Indice di valutazione ( $R_w$ ): 46,4 dB

- Solaio laterocemento con travetti a traliccio, pignatte 24 cm, massetto in calcestruzzo alleggerito e pavimentazione in ceramica:



Spessore: 36 cm	Massa superficiale: 400 kg/m <sup>2</sup>
-----------------	---

Potere fonoisolante R [dB]

100	125	160	200	250	315	400	500	630	800	1000	1250	1600	2000	2500	3150
44,0	39,9	42,6	44,5	46,9	47,9	49,7	51,0	51,0	52,1	54,0	55,4	58,1	58,0	57,9	62,4

Indice di valutazione ( $R_w$ ): 54,8 dB

Livello di pressione sonora di calpestio normalizzato  $L_n$  [dB]

100	125	160	200	250	315	400	500	630	800	1000	1250	1600	2000	2500	3150
39,0	46,0	46,5	47,5	48,0	50,0	51,4	53,0	56,0	58,0	59,0	60,5	61,0	64,0	67,0	65,5

Indice di valutazione livello di pressione sonora di calpestio normalizzato ( $L_{n,w}$ ): 69,7 dB

- Vetrocamera stratificato 3+3 mm, PVB 0,38, camera 12 mm, telaio tubolare in alluminio:

Potere fonoisolante R [dB]

100	125	160	200	250	315	400	500	630	800	1000	1250	1600	2000	2500	3150
21,0	20,0	19,0	17,0	17,0	15,0	18,0	21,0	26,0	29,0	32,0	34,0	36,0	37,0	31,0	27,0

Indice di valutazione ( $R_w$ ): 27,1 dB

- Porta costituita da pannello di truciolare forato di 36 mm di spessore:

Porta costituita un pannello di truciolare forato di 36 mm di spessore a cui è applicato uno strato di medium density da 4 mm di spessore su ambo i lati e un pannello di laminato di 0,9 mm di spessore (senza guarnizione tra telaio e controtelaio)	
Spessore: 4,6cm	Massa superficiale: 18,7kg/m <sup>2</sup>

Potere fonoisolante R [dB]

100	125	160	200	250	315	400	500	630	800	1000	1250	1600	2000	2500	3150
21,0	17,5	18,0	17,0	20,5	18,5	18,0	18,5	18,5	20,0	22,0	22,5	22,5	23,0	23,5	25,0

Indice di valutazione ( $R_w$ ): 22,0 dB

Le soluzioni costruttive scelte hanno una risposta alle sollecitazioni acustiche in linea con i valori ottenuti attraverso le misurazioni.

I risultati in termini di potere fonoisolante apparente, isolamento normalizzato al calpestio e isolamento normalizzato di facciata, ottenuti nel modello di simulazione possono essere considerati attinenti e un punto di partenza al fine di verificare lo stato di fatto e i cambiamenti a seguito di interventi migliorativi.

### 6.3 Interventi migliorativi

Le soluzioni migliorative proposte prevedono la posa in opera di un massetto per isolare il pavimento dai rumori impattivi e l'aggiunta di una controparete interna per aumentare il potere fonoisolante delle pareti. Le soluzioni sono state valutate con il modello di simulazione e comparate con le misurazioni fatte in opera.

- Massetto in solfato di calcio (CaSO<sub>4</sub>) di 4 cm di spessore su strato in materiale plastico di 0,2 mm di spessore:

Spessore: 4,5 cm	Massa superficiale: 77 kg/m <sup>2</sup>
------------------	--

Attenuazione del livello di pressione sonora di calpestio normalizzato  $L_n$  [dB]

100	125	160	200	250	315	400	500	630	800	1000	1250	1600	2000	2500	3150
1,5	-0,1	-1,2	1,2	6,9	11,6	14,3	18	21,2	24,3	26,2	27,4	30,1	32,9	35,3	37,5

Indice di valutazione ( $R_w$ ): 20,0 dB

- Controparete costituita da 1 lastra di cartongesso di 0,95 cm di spessore e un pannello di lana minerale di 3 cm di spessore:

Controparete costituita da 1 lastra di cartongesso di 0,95 cm di spessore, intercapedine di 4 cm parzialmente riempita con un pannello di lana minerale di 3 cm di spessore	
Spessore: 4 cm	Massa superficiale: 10 kg/m <sup>2</sup>

Incremento del potere fonoisolante delta R [dB]

100	125	160	200	250	315	400	500	630	800	1000	1250	1600	2000	2500	3150
5,7	1,7	5,2	6,9	12,4	13,0	13,8	15,7	15,2	17,6	20,0	23,6	26,2	30,0	29,0	26,7

Indice di valutazione ( $R_w$ ): 13,0 dB

Nei paragrafi 6.3.1-2-3 vengono confrontati i valori dei requisiti acustici delle aule ottenuti dalle misurazioni in opera con quelli previsionali calcolati dal modello di simulazione in 4 situazioni:

- lo stato di fatto;
- la posa in opera di una controparete;
- l'inserimento di un massetto nel solaio;
- la presenza di entrambi gli interventi.

Questo confronto viene effettuato sia per accertare l'attendibilità dei calcoli e dei risultati prodotti dal software sia per prevedere i nuovi valori dei requisiti acustici a seguito degli interventi.

### 6.3.1\_Potere fonisolante apparente

Il potere fonoisolante apparente è stato calcolato per quattro pareti verticali e quattro elementi orizzontali, gli stessi elementi costruttivi di cui sono state fatte le misurazioni in opera. *Latabella 6.1* e *latabella 6.2* riportano gli indici di valutazione calcolati per ogni procedura di calcolo effettuata nelle diverse aule.

Il primo paragone che si può realizzare è tra i valori misurati in opera e lo stato di fatto riproposto nel modello di simulazione, con lo scopo di valutare il metodo di calcolo previsionale del potere fonoisolante del programma e determinarne le possibilità di utilizzo.

Gli indici di valutazione misurati in operasono influenzati, oltre che da diversi agenti ambientali, da percorsi di trasmissione dovuti a criticità strutturali che determinano un livello sonoro variabile nell'aula ricevente, anche in situazioni geometriche affini e con la presenza dei medesimi materiali.

Si nota invece che i valori ottenuti dal modello di simulazione rimangono simili anche cambiando la posizione relativa tra ambiente sorgente e ambiente ricevente. Questo deriva anche dai limitati dati in ingresso forniti al modello.

Nella *figura 6.4* sono illustrati i grafici dove vengono sovrapposte le curve dei poteri fonoisolanti nei cinque casi esaminati. I valori che si riferiscono allo stato di fatto, misurati e calcolati, in modo particolare fra 200 Hz e 1,6 kHz, hanno un andamento analogo, sia nel caso della trasmissione sonora per via aerea delle pareti che dei solai.

Questo permette di affermare che il modello previsionale adottato per il calcolo del potere fonisolante apparente fornisce dei risultati coerenti con i dati misurati e può essere utilizzato per valutare gli interventi ipotizzati.

Le pareti che dividono le aule adiacenti hanno un potere fonoisolante apparente di 45 dB; il limite fissato dal DPCM e quello per prestazioni base della UNI 11367 è di 50 dB, si ipotizza, quindi, la posa in opera della controparete, descritta nel paragrafo 6.3, per incrementare il potere fonoisolante. L'indice ottenuto valutando la risposta sonora del nuovo pacchetto con il software, supera il valore che nella normativa viene definito per prestazioni superiori, pari a 56 dB.

Il secondo caso, utile ad aumentare l'isolamento al calpestio, prevede la posa del massetto fonoassorbente descritto nel paragrafo 6.3. Gli indici di valutazione non cambiano;  $R'$  aumenta alle alte frequenze rispetto allo stato di fatto, questo è dovuto all'aggiunta di uno strato addizionale nel giunto orizzontale della parete che, nel modello dettagliato di calcolo, implica una diminuzione della componente di trasmissione strutturale.

Rispetto al solo posizionamento della controparete, la combinazione di entrambi gli interventi produce un aumento degli indici di valutazione del potere fonoisolante della parete. Nei grafici di *Figura 6.4* si osserva che in questa situazione, iniziando dai 250 Hz verso le alte frequenze, aumenta  $R'$  rispetto alla sola presenza della controparete.

Tabella 6.1 - Valori degli indici di valutazione del potere fonoisolante apparente

Procedura dicalcolo	Aula											
	002			014			020			026		
	$R'_w$	C	$C_{tr}$									
MISURA IN OPERA	45	-1	-4	43	-1	-3	45	-1	-3	44	-1	-3
STATO DI FATTO	45	-1	-3	45	0	-3	45	-1	-3	45	0	-3
CONTROPARETE	58	-1	-5	59	-1	-5	58	-2	-5	58	-1	-5
PAV. GALLEGGIANTE	45	0	-3	45	0	-2	45	0	-3	45	0	-3
PAVIMENTO GALLEGGIANTE E CONTROPARETE	60	-2	-6	61	-2	-7	59	-2	-6	59	-1	-6



Figura 6.3 - Piante delle aule adiacenti di cui è stato calcolato l'indice di valutazione

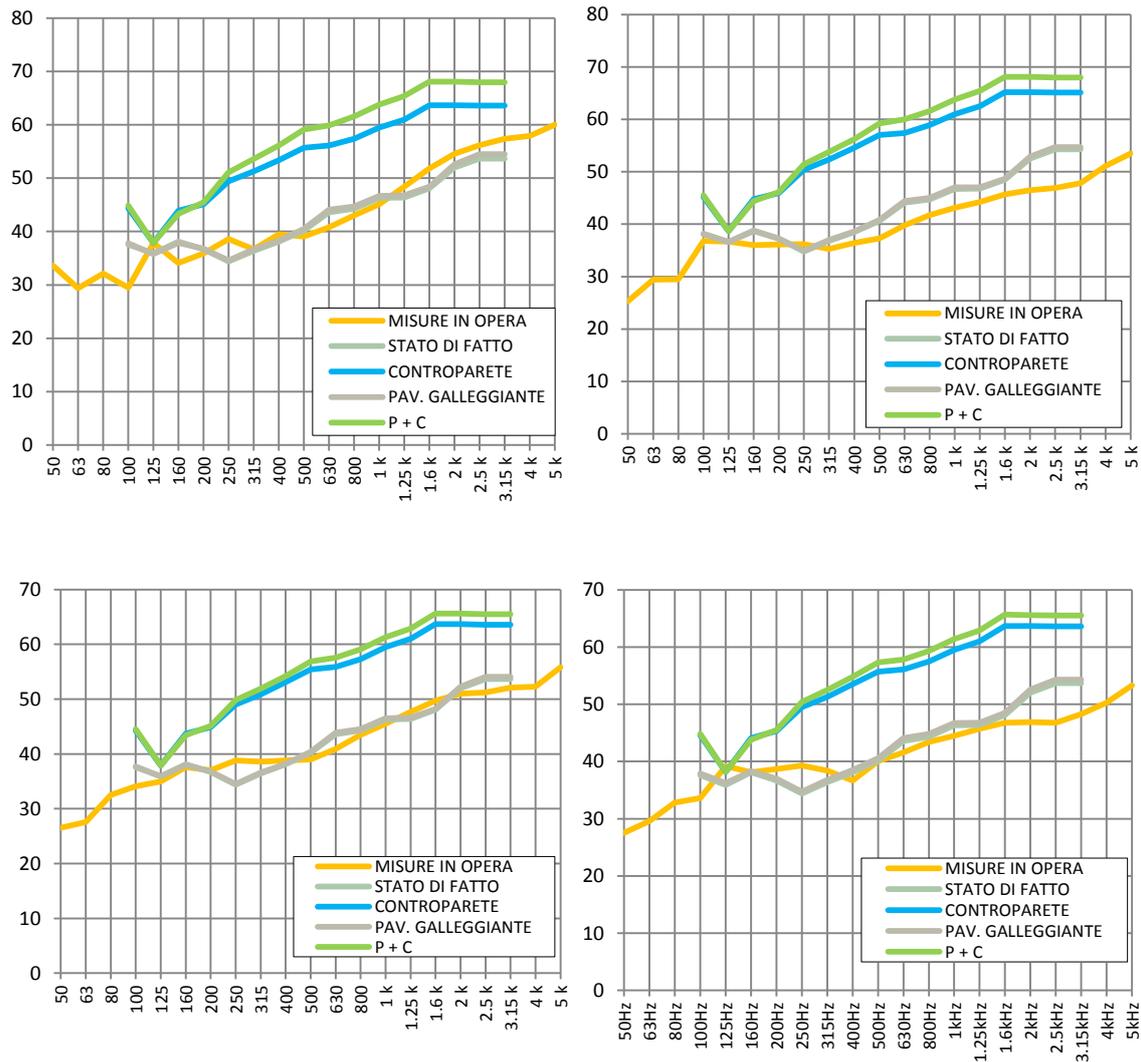


Figura 6.4- Grafici dei poteri fonoisolanti apparenti delle pareti calcolati dal modello e misurati in opera

Il potere fonoisolante apparente dei solai non necessita di interventi che aumentino l'isolamento ai rumori aerei. Si riportano comunque i nuovi valori ottenuti a seguito degli interventi migliorativi suggeriti.

Tabella 6.2- Valori degli indici di valutazione del potere fonoisolante apparente

Tipo di misura	Aula											
	001			013			014			025		
	$R'_w$	C	$C_{tr}$									
MISURE IN OPERA	53	-1	-4	52	-1	-4	50	-1	-3	52	-1	-3
STATO DI FATTO	53	-1	-4	52	-1	-3	53	-1	-3	52	-1	-3
CONTROPARETE	54	-1	-3	54	-1	-4	54	-1	-3	54	-1	-4
PAV. GALLEGGIANTE	58	-2	-6	59	-2	-7	59	-2	-6	59	-2	-7
PAVIMENTO GALLEGGIANTE E CONTROPARETE	63	-3	-9	63	-4	-9	63	-3	-9	63	-4	-9

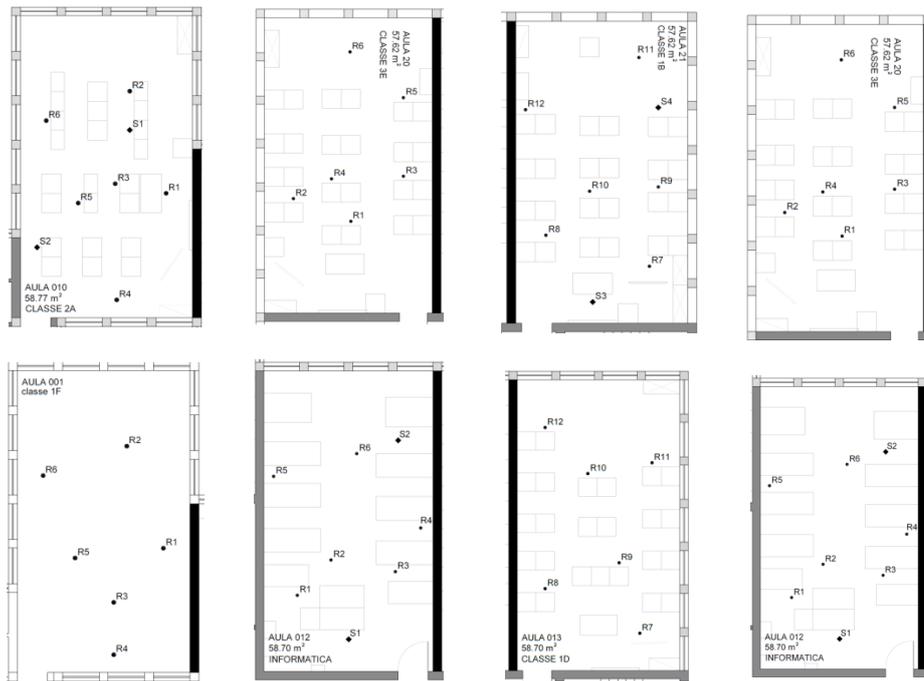


Figura 6.5 - Pianta delle aule di cui è stato calcolato il potere fonoisolante apparente dei solai

Dal grafico delle curve del potere fonoisolante apparente, *Figura 6.4*, è interessante rilevare, nel caso della presenza simultanea del massetto e della controparete, l'aumento delle prestazioni acustiche di isolamento del solaio alle alte frequenze, rispetto alla presenza del solo pavimento galleggiante. Il motivo di tale incremento è da imputare alla notevole lunghezza del perimetro del solaio e, quindi, dei giunti nel modello di calcolo; nel momento dell'apposizione della controparete, vengono inseriti nella stima del potere fonoisolante quattro strati addizionali alle strutture laterali.

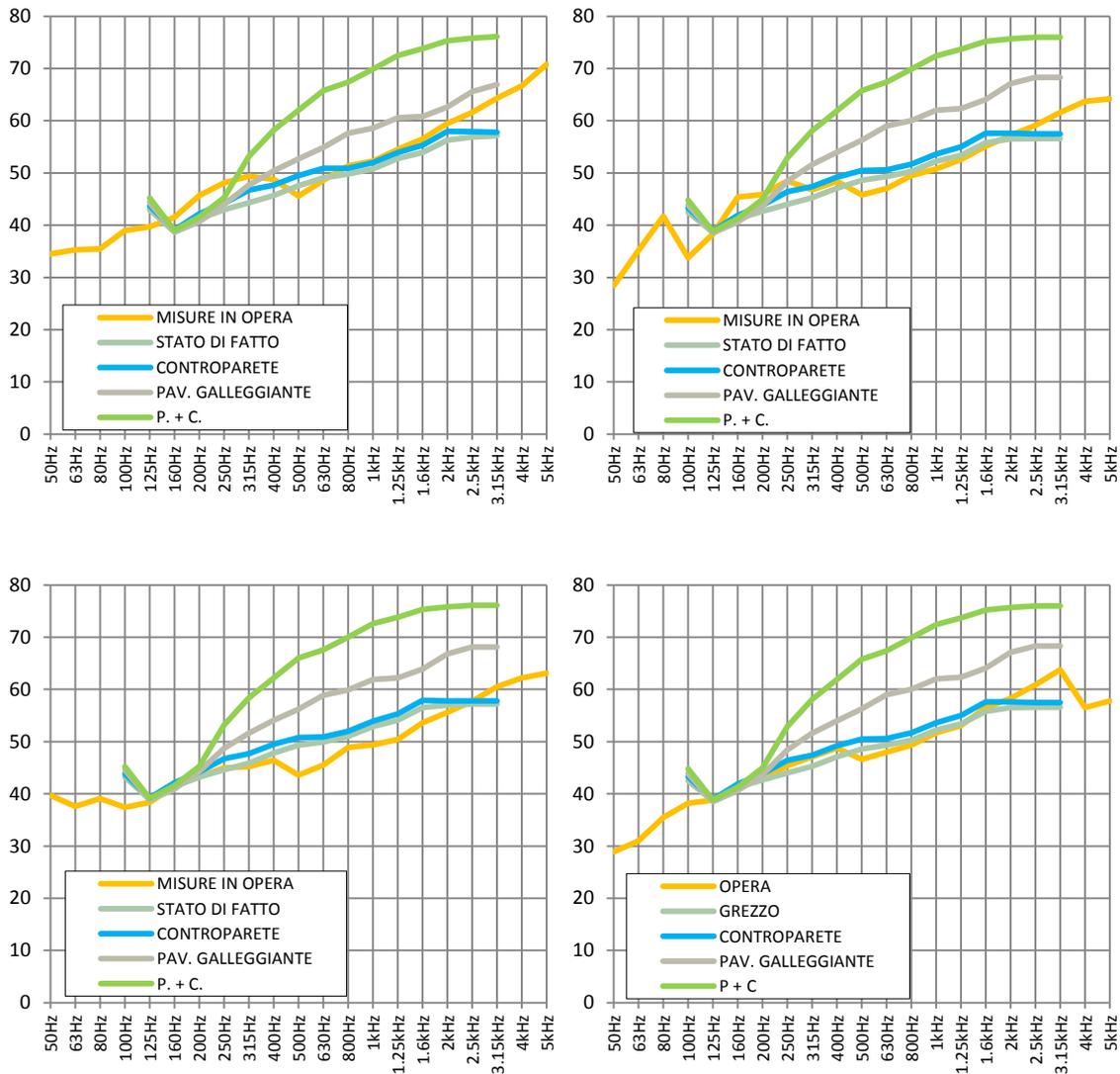


Figura 6.6 - Grafici dei poteri fonoisolanti apparenti dei solai calcolati dal modello e misurati in opera

### 6.3.2 Isolamento al calpestio

La misura in opera dell'isolamento normalizzato al calpestio è condizionato dalla presenza di ponti acustici che trasmettono il suono per via strutturale, ad esempio la presenza di pilastri e il passaggio di tubazioni verticali. Nel modello di simulazione il solaio è collegato in modo omogeneo e continuo con le pareti verticali. Ne derivano valori di  $L'_{n,w}$  costanti in tutte le aule e che, nello stato di fatto, sono elevati per la mancanza di uno strato resiliente, che ne migliorerebbe le prestazioni.

Allo stesso modo che per il potere fonoisolante degli elementi orizzontali, l'aggiunta di uno strato addizionale nel locale ricevente, diminuisce leggermente la capacità di

trasmissione laterale attraverso i giunti e, di conseguenza, il livello sonoro di calpestio. L'intervento che incide maggiormente sulle prestazioni acustiche del solaio sottoposto a rumori impattivi è la posa del massetto. I valori di  $L'_{n,w}$  si portano ben al di sotto dei limiti per prestazioni superiori definiti nelle normativa UNI 11367, stabiliti per livelli inferiori ai 53 dB.

Tabella 6.3- Valori degli indici di valutazione del livello sonoro normalizzato al calpestio

Tipo di misura	Aula											
	001		002		013		014		001		002	
	$L'_{n,w}$	C										
MISURE IN OPERA	64	-8	64	-7	71	-9	71	-8	68	-8	68	-9
STATO DI FATTO	71	-	71	-	71	-	71	-	71	-	71	-
CONTROPARETE	70	-	71	-	70	-	70	-	71	-	71	-
PAV. GALLEGGIANTE	41	-	41	-	41	-	41	-	41	-	41	-
PAVIMENTO GALLEGGIANTE E CONTROPARETE	40	-	40	-	40	-	40	-	41	-	41	-

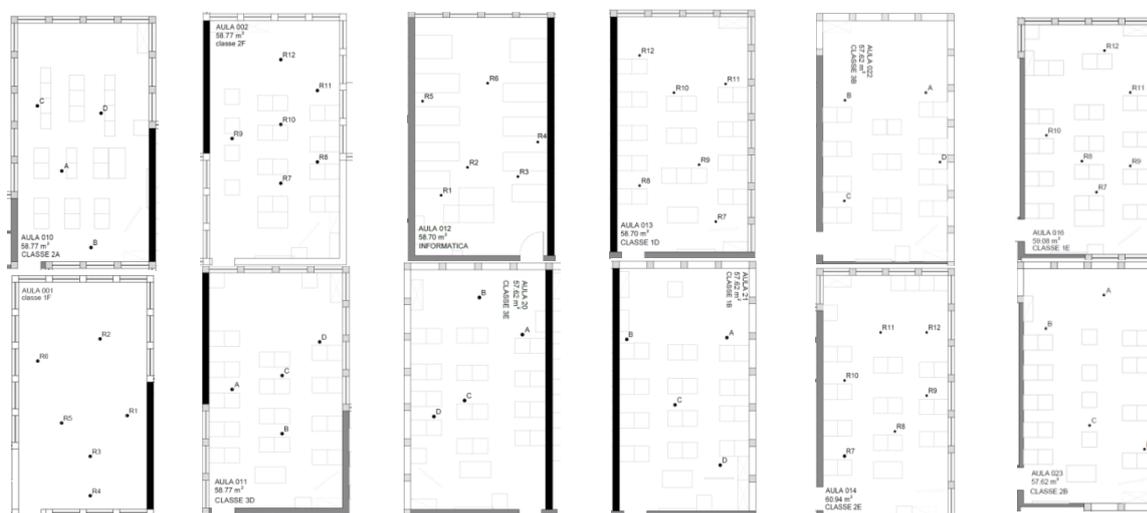
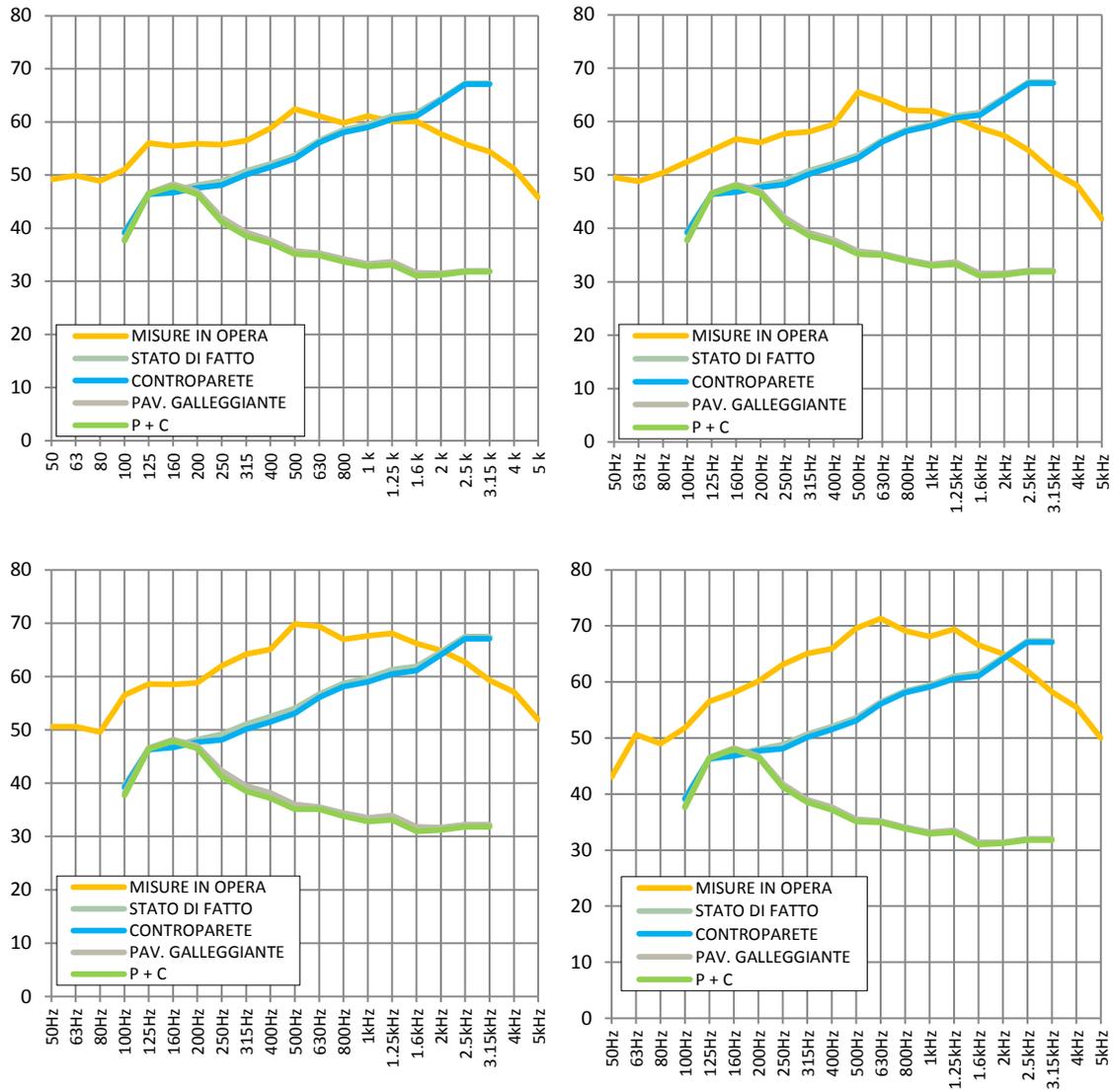


Figura 6.7 -Piante delle aule dove è stato calcolato l'isolamento al calpestio

Nei grafici di figura 6.8 sono rappresentate le curve dei livelli di isolamento normalizzati al calpestio per bande di frequenza. L'andamento dei valori misurati in opera si discosta da quello ottenuto dal modello nello stato di fatto. Si può osservare che il modello di

simulazione ha definito una risposta lineare al calpestio, peggiore alle alte frequenze ; le misure in opera hanno invece indicato che spostandosi dalle medie verso le alte frequenze vi è una diminuzione relativa dei livelli sonori. Nel modello di calcolo, inserendo un massetto nel solaio si nota che il comportamento alle basse frequenze rimane invariato fino a 200Hz e migliora linearmente verso le medio-alte frequenze.



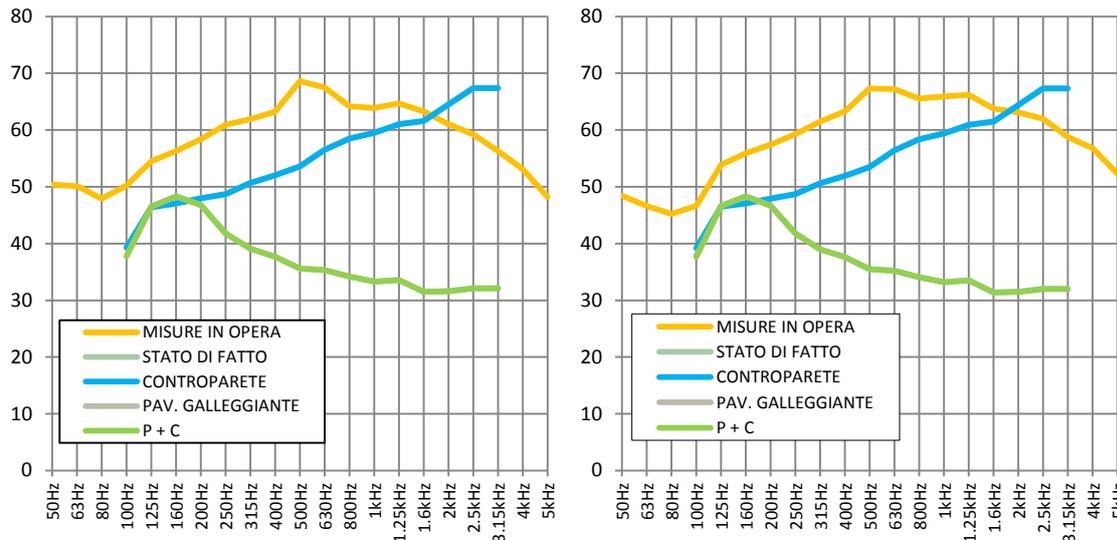


Figura 6.8-Curve dei livelli normalizzati di calpestio

### 6.3.3 Isolamento acustico di facciata

L'isolamento acustico di facciata viene calcolato dal modello di simulazione con il metodo previsionale definito nella norma UNI EN 12354-3, illustrata nel paragrafo 3.2.4.3.

La misura in opera di tale requisito acustico, come riportato nel paragrafo 5.4.3, è stata fortemente condizionata dalle criticità strutturali presenti. Nella *Figura 6.8* si osserva che le curve che rappresentano i valori misurati e calcolati dal modello di calcolo hanno andamenti diversi nonostante gli indici di valutazione calcolati si attestino intorno ai valori più elevati misurati in opera. Le curve che si riferiscono ai 4 casi contemplati nell'ambito degli interventi migliorativi sono perfettamente sovrapposte in quanto il calcolo di  $D_{2m,nT}$  nella norma dipende esclusivamente da caratteristiche che nel modello sono costanti: il potere fonoisolante della facciata stessa, la forma esterna della pareti e le dimensioni degli ambienti. Gli unici elementi all'interno del modello la cui variazione provoca un significativo incremento dell'isolamento di facciata sono gli infissi.

I tipi di interventi migliorativi verificati attraverso il modello di simulazione non riguardano i serramenti, ma si può affermare con certezza che un ripristino manutentivo del complesso delle finestre a nastro migliorerebbe le prestazioni acustiche delle aule.

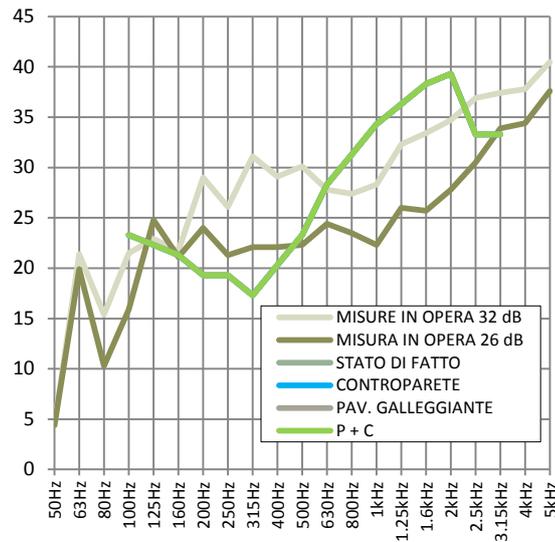


Figura 6.8 -Curve dai livelli acustici di facciata

#### 6.4\_Miglioramento dei tempi di riverberazione

I tempi di riverberazione misurati nelle aule sono risultati elevati sia con riferimento ai limiti indicati nella normativa che in quelli definiti nella legge, vedi paragrafo 5.1.3. Questi tempi sono ritenuti troppo elevati in funzione del confort acustico necessario in un ambiente destinato alla didattica. In questo capitolo vengono proposti degli interventi che aumentano la superficie di assorbimento delle aule al fine di ottenere risultati più vicini ai valori ottimali.

Per prevedere i possibili risultati è stata utilizzata un'aula campione, la 002, che presenta tempi di riverberazione alle medio-alte frequenze comparabili con gli altri ambienti.



Figura6.9-Aula 002

Per avere un'idea dell'entità degli interventi da attuare è stata fatta una stima delle aree di assorbimento necessarie a far sì che i tempi di riverberazione della stanza raggiungessero i valori ottimali definiti nel DPCM del '97, vedi capitolo 5.1.3.

Tabella 6.4- Confronto con tempi di riverberazione in bande di ottava con i valori ottimali del DM '77

n° AULA	125	250	500	1 k	2 k	4 k [Hz]
DPCM 5/12/1997						
<b>T<sub>ott</sub></b>	<b>1,36</b>	<b>1,12</b>	<b>0,96</b>	<b>0,88</b>	<b>0,80</b>	<b>0,80</b>
002	<u>1,08</u>	1,36	1,25	1,58	1,84	1,68

Inizialmente è stata fatta un'analisi delle superfici e dei relativi coefficienti di assorbimento presenti nell'ambiente. La previsione delle superfici di assorbimento necessarie è stata fatta utilizzando la formula di Sabine a partire dai valori forniti da un modello di simulazione. Nello specifico si è intervenuti aumentando le aree equivalenti di assorbimento, diminuendo quindi i tempi di riverberazione, come indica la relazione:

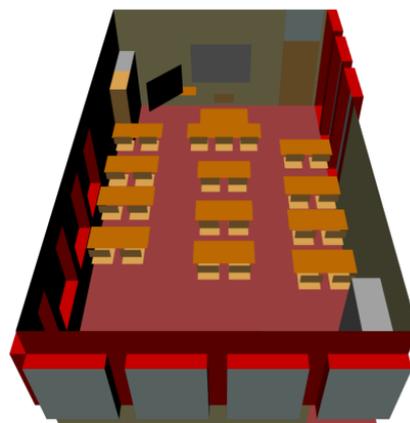
$$T = 0,161 \frac{V}{\sum \alpha_i S_i}$$

in cui  $S_i$  è la superficie degli elementi e  $\alpha_i$  è il coefficienti di assorbimento della stessa.

Le aree equivalenti riferite allo stato di fatto sono state calcolate ricostruendo un modello virtuale dell'aulae assegnando alle superfici le caratteristiche dei materiali, *Tabella 6.5*. Gli algoritmi usati dal modello di calcolo permettono di gestire anche variabili ambientali e ottenere le aree equivalenti precise riferite allo stato di fatto.

Tabella 6.5- Area equivalenti e coefficienti di assorbimento delle superfici, rappresentazione geometrica

Codice	Materiale		125	250	500	1k	2k	4k [Hz]
10002	Vetro Porta	Aeq [m <sup>2</sup> ]	0,1	0	0	0	0	0
		$\alpha$	0,08	0,04	0,03	0,03	0,02	0,02
10003	Vetri	Aeq	2,6	1,8	1,3	0,8	0,5	0,5
		$\alpha$	0,1	0,07	0,05	0,03	0,02	0,02
160144	Pavimento	Aeq	0,60	0,6	1,2	1,2	1,7	1,7
		$\alpha$	0,01	0,01	0,02	0,02	0,03	0,03
160145	SedieLegno	Aeq	5,5	5,5	4,7	3,9	3,2	2,4
		$\alpha$	0,3	0,3	0,3	0,28	0,18	0,13
160146	Legno	Aeq	0,4	0,3	0,20	0,2	0,1	0,2
		$\alpha$	0,15	0,15	0,1	0,07	0,06	0,07
160147	ArredoMetallo	Aeq	1,7	2,2	3,4	3,4	3,4	2,2
		$\alpha$	0,15	0,15	0,25	0,3	0,3	0,2
160148	Lavagna	Aeq	0,9	0,7	0,4	0,2	0,2	0,2
		$\alpha$	0,2	0,15	0,1	0,05	0,05	0,05
160149	Intonaco	Aeq	0,3	0,5	0,7	0,5	0,5	0,8
		$\alpha$	0,01	0,02	0,02	0,02	0,02	0,03
160150	Infissi	Aeq	1,8	1,5	1,2	0,3	0,3	1,5
		$\alpha$	0,06	0,05	0,05	0,04	0,01	0,05
<b>160151</b>	<b>Intonaco Grezzo</b>	<b>Aeq</b>	<b>1,4</b>	<b>2,5</b>	<b>2,5</b>	<b>2,2</b>	<b>2,2</b>	<b>2,2</b>
		<b><math>\alpha</math></b>	<b>0,02</b>	<b>0,023</b>	<b>0,035</b>	<b>0,035</b>	<b>0,03</b>	<b>0,03</b>
160153	BanchiLegno	Aeq	5,9	5,9	5,9	4,7	3,5	2,4
		$\alpha$	0,25	0,23	0,25	0,22	0,18	0,15
160154	ArredoLogno	Aeq	0,8	0,8	0,6	0,5	0,4	0,4
		$\alpha$	0,25	0,23	0,2	0,2	0,18	0,15
Assorbimento aria			0,1	0,2	0,5	0,9	1,7	4,4
Aeqstanza [m <sup>2</sup> ]			23,7	23,9	24,0	20,1	18,8	19,8
T calcolato con Sabine			1,2	1,2	1,2	1,4	1,5	1,4

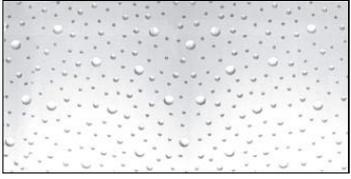
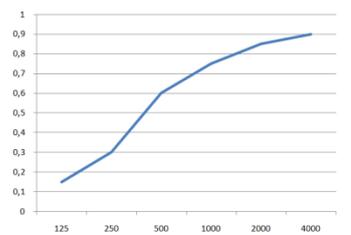
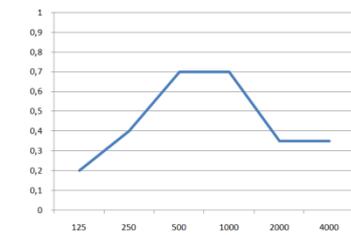
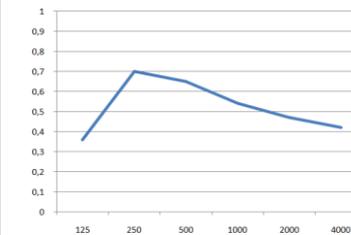


Nella *Tabella 6.5* sono riportati inoltre i tempi di riverberazione calcolati con la formula di Sabine, confrontati in *Figura 6.10* con i tempi misurati.

I tre sistemi proposti per correggere i tempi di riverberazione sono:

1. Controsoffitto Knauf, tipo Circolare Sparsa Plus;
2. Controsoffitto in pannelli di fibra di poliestere, spessore 50 mm;
3. Buffles Topakustic, tipo Cloudakustik .

Tabella 6.6 -Pannelli fonoassorbenti proposti per correggere i tempi di riverberazione

	1.	2.	3.
			
	Controsoffitto in fibra i polistirene spessore 50mm	Controsoffitto Knauf	Buffles in materiale fonoassorbente Topakustic
Tipo		Foratura Circolare Sparsa Plus - R Pannello in gesso rivestito senza lana di vetro Ribassato 60 mm	Cloudakustik Pnnelli con all'interno materiale fibroso fonoassorbente
[Hz]	125 250 500 1 k 2 k 4 k	125 250 500 1 k 2 k 4 k 125	125 250 500 1 k 2 k 4 k 125
$\alpha$	0,15 0,3 0,6 0,75 0,85 0,9	0,2 0,4 0,7 0,7 0,35 0,35 0,2	0,36 0,7 0,65 0,54 0,47 0,42 0,36
			
Vant.	Alta capacità di fonoassorbimento alle medio-alte frequenze; costi contenuti.	Resistente meccanicamente, richiede poca manutenzione.	Doppia superficie di assorbimento; esteticamente gradevole.
Svan.	Facilmente danneggiabile; si sporca facilmente.	Costi elevati	Costi elevati

I primi due interventi in termini di aree equivalenti sostituiscono il soffitto, di questo sono noti l'area e i coefficienti di assorbimento:

$$T = 0,161 \frac{V}{A_{eq,STANZA} + S_{CONTROSOFFITTO} \alpha_{CONTROSOFFITTO} - S_{INTONACO} \alpha_{INTONACO}}$$

dove l'  $A_{eq,STANZA}$  è riportata nella *Tabella 6.5* e  $S_{INTONACO}$  è la superficie di soffitto sostituita.

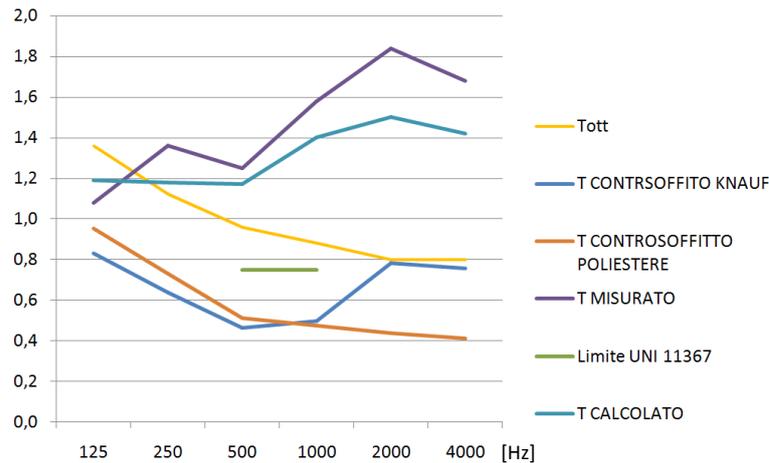


Figura 6.10 -Confronto dei tempi ottimali di riverberazione del DPCM,  $T_{ott}$ , i limiti della UNI11367 e i tempi calcolati con la relazione di Sabine

L'utilizzo dell'equazione fornisce una stima solo indicativa dei tempi di riverberazione all'interno dell'aula 002. Dal grafico in Figura 6.10 si notano le differenze tra i tempi misurati e i risultati calcolati forniti dalla formula di Sabine nello stato di fatto. Tale difformità aumenta alle alte frequenze.

Per quanto riguarda le curve che rappresentano gli interventi suggeriti (T controsoffitto Knauf e T controsoffitto poliestere), si apprezza una notevole diminuzione dei tempi di riverberazione. Il controsoffitto in poliestere è più performante alle frequenze comprese tra i 1000 e 4000 Hz, ma come riassunto nella Tabella 6.6 ha alcuni svantaggi che in una scuola media possono risultare determinanti nella decisione di utilizzare il controsoffitto della Knauf. Questo a fronte di una spesa che, come verrà valutato nel paragrafo 6.5, è di molto superiore.

Nell'intervento che prevede il montaggio dei baffles al soffitto, la formula di Sabine è utilizzata per prevedere l'area necessaria a diminuire i tempi di riverberazione non conformi a valori ottimali:

$$T = 0,161 \frac{V}{A_{eq,STANZA} + S_{BUFFLES} \alpha_{BUFFLES}}$$

dove  $S_{BUFFLES}$  è la superficie incognita.

Tale calcolo stima che l'area utile ad ottenere tempi ottimali in ogni frequenza, introducendo un materiale con la capacità fonoassorbente dei pannelli Claudakustik, è di 39 mq. Considerando che i baffles sono una soluzione che ha due superfici assorbenti, l'aula necessita di venti metri quadri di materiale. Quest'ultimo intervento risulta particolarmente indicato se si vuole privilegiare l'estetica.

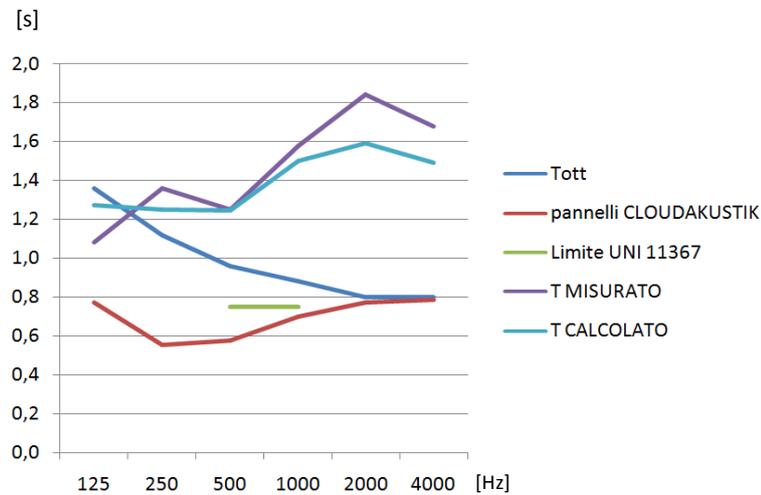


Figura 6.11-Curva dei tempi di riverberazione determinati dai baffles, calcolati con la relazione di Sabine

A questo punto si utilizza il software della Namirial, Acustica, per verificare la correttezza dei calcoli dei tempi di riverberazione eseguiti. Dai grafici di *Figura 6.12* si nota che i valori coincidono e quindi si può affermare con buona certezza che la relazione di Sabine è stata applicata correttamente.

## Verifica dei requisiti acustici di una scuola media e proposte di miglioramento

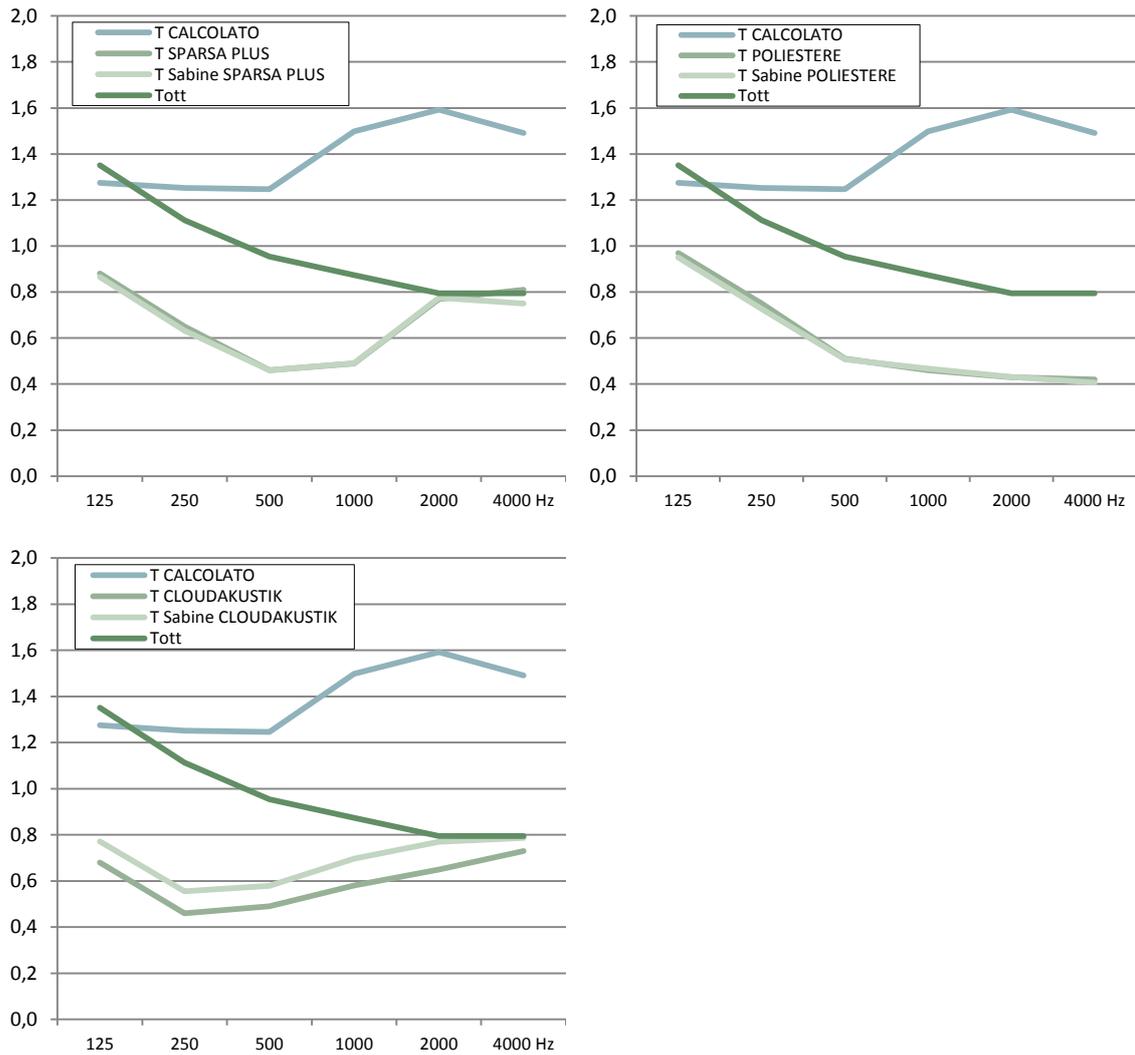


Figura 6.12 -Curva dei tempi di riverberazione, tempi calcolati dal Software, T CLOUDAKUSTIK

## 6.5\_Stima dei costi

Nella *Tabella 6.7* vengono riportati i costi dei materiali degli interventi migliorativi proposti nel capitolo 6.3.

*Tabella 6.7 - Stima dei costi dei materiali per migliorare i requisiti acustici delle aule*

Materiali	Quantità	Importi	Totale
Massetto in solfato di calcio (CaSO <sub>4</sub> ) di 4 cm di spessore su strato in materiale plastico di 0,2 mm di spessore	31,4 mc	371,71 €/mc	<b>11.670,03€</b>
Controparete costituita da 1 lastra di cartongesso di 0,95 cm di spessore e un pannello di lana minerale di 3 cm di spessore	100,3 mq	35,92 €/mq	<b>3.603,45 €</b>

Nella *Tabella 6.8* sono elencati i costi dei materiali e del montaggio degli interventi mirati a migliorare i tempi di riverberazione, capitolo 6.4.

*Tabella 6.8 - Stima dei costi degli interventi finalizzati a diminuire i tempi di riverberazione*

Materiali	Quantità	Importi	
Controsoffitto Knauf Circolare Sparsa Plus	697,8mq	25,80€/mq	15.002,70€
con montaggio		72,00€/mq	50.241,60€
Tot.			<b>68.244,84€</b>
Controsoffitto in pannelli di fibra di poliestere	697,2 mq	18,00€/mq	12.560,40€
con montaggio		50,00€/mq	34.890,00€
Tot.			<b>47.450,40€</b>
Baffles Cloudakustik	240,0 mq	98,00€/mq	23.520,00€
con montaggio		200,00€/mq	48000,00€
Tot.			<b>71.520,00€</b>

Nella *Tabella 6.9* viene fatta una previsione dei costi del materiale necessario per cambiare le finestrate delle aule, al fine di migliorare l'isolamento di facciata.

*Tabella 6.9 - Stima dei costi degli interventi finalizzati a migliorare l'isolamento acustico di facciata delle aule*

<b>Materiali</b>	<b>Quantità</b>	<b>Importi</b>	
Vetro doppio stratificato	268,4 mq	113,00€/mq	30.334,72€
Telaio in alluminio		123,00€/mq	33018,12€
			Tot. <b>63351,84€</b>

Valutando le stime degli interventi suggeriti, tra questi ve ne sono 3 di cui il rapporto costi/benefici è valutato in modo positivo, vedi *Tabella 6.10*.

*Tabella 6.10 - Stima dei costi degli interventi finalizzati a migliorare l'isolamento acustico di facciata delle aule*

<b>Materiali</b>	<b>Quantità</b>	<b>Importi</b>		<b>Importo per aula</b>
Infissi in alluminio con doppio vetro stratificato	268,4 mq	236,00€/mq	63351,84€	<b>5279,30€</b>
Controsoffitto Knauf Circolare Sparsa Plus	697,8 mq	97,80€/mq	68.244,84€	<b>5.687,07€</b>
Controparete	100,3 mq	35,92 €/mq	3.603,45 €	<b>300,29€</b>
			Tot.	<b>11.266,68€</b>

L'investimento necessario, in termini di costi vivi, per realizzare gli interventi è di circa 11.250 € per aula. Tale importo è giudicato esiguo e giustificabile rispetto ai benefici che ne derivano al benessere acustico e all'intelligibilità della parola.

## 7\_Conclusioni

In Italia l'attenzione nei confronti delle prestazioni acustiche degli edifici è ancora insufficiente. La causa principale della scarsa conoscenza della tematica, anche da parte del personale tecnico, è da imputare ad una legislazione che da molti anni non fa progressi. Quest'ultima presenta lacune che creano tra l'altro ambiguità nei rapporti tra i professionisti, le pubbliche amministrazioni e gli organi di controllo.

Le misurazioni dei requisiti acustici della scuola Galileo Galilei hanno dato risultati compatibili con le prestazioni acustiche tipiche delle soluzioni costruttive realizzate negli anni '50 '60. Gli esiti dell'indagine fonometriche inoltre hanno evidenziato che, anche nei recenti interventi di ristrutturazione, i lavori sono stati eseguiti senza una idonea verifica delle prestazioni acustiche degli infissi.

Il potere fonoisolante apparente misurato dei divisori tra aule adiacenti si attesta intorno ai 45 dB, a fronte del limite di 50 dB del DPCM.

Il livello sonoro normalizzato di calpestio misurato è intorno al valore di 70 dB, a fronte del limite di 58 dB del DPCM.

L'isolamento acustico di facciata normalizzato rispetto al tempo di riverberazione di 30 dB, nel migliore dei casi, mentre il limite del DPCM è di 48 dB.

I tempi di riverberazione delle aule, mediamente, sono superiori ai 1,2 secondi previsti dalla legge e l'indice STI è compreso tra 0,5 e 0,6, a fronte del valore ottimale dello standard europeo che è di 0,62.

Le prestazioni acustiche possono essere considerate non sufficienti per una corretta fruizione dell'edificio scolastico, ma apportando degli adeguamenti mirati agli elementi costruttivi è possibile rientrare ampiamente nei valori prescritti. Analoghe considerazioni possono essere fatte per il miglioramento dei tempi di riverbazione.

A supporto di tale tesi possono essere portati i risultati derivanti dai modelli previsionali indicati nella UNI EN 12354, che hanno permesso la stima e l'ottimizzazione dei possibili interventi migliorativi disponibili sul mercato. L'uso del modello di calcolo si è rivelato più affidabile nella valutazione in frequenza dell'incremento del potere fonoisolante apparente e dell'indice di valutazione degli isolamenti al rumore di calpestio, piuttosto che dell'isolamento a facciata essendo quest'ultimo viziato da gravi difetti di posa in opera. Ciò è dovuto al fatto che in quest'ultimo le criticità costruttive e di posa presenti nelle finestre a nastro hanno influito sui dati di misurazione.

In ultimo è stata fatta una stima dei costi vivi degli interventi e si sono valutate le soluzioni migliori intermini di costi e benefici: la sostituzione degli infissi, la posa in opera di un controsoffitto e di contropareti. I costi stimati sono di circa 11.250 € per aula che è valutata come una cifra giustificabile a fronte dei benefici ottenibili e se inserita all'interno di interventi di ristrutturazione globali dell'edificio scolastico.

Con gli interventi proposti si avrebbe infatti un miglioramento globale dei requisiti acustici dell'intelligibilità del parlato all'interno delle aule didattiche. Questo si tradurrebbe nell'aumento della percezione della parola degli alunni, della loro capacità di apprendimento e attenzione. Si avrebbe un miglioramento delle loro prestazioni scolastiche e di determinerebbero condizioni favorevoli all'insegnamento per i docenti. Questi ultimi infine sarebbero meno soggetti a patologie dovute a sforzo vocale migliorando la continuità didattica.

## Bibliografia

1. **Spagnolo, R.** *Manuale di acustica applicata*. s.l. : CittàStudi, 2008.
2. **Cirillo, E. e Martellotta, F.** *Requisiti acustici passivi degli edifici*. Gorizia : EdicomEdizioni, 2012.
3. **Moncada Lo Giudice, G. e De Santoli, L.** *Fisica tecnica ambientale*. Milano : Casa Editrice Ambrosiana, 1999.
4. **Fausti, P.** Acustica in edilizia. <http://www.rockwool.it/>. [Online]
5. **Astolfi, A. e Giovannini, M.** Acustica delle aule scolastiche. [www.rockwool.it](http://www.rockwool.it). [Online]
6. **Hopkins, C.** *Sound insulation*. Oxford : Elsevier Ltd., 2007.
7. **D.P.C.M. 5/12/97.** "Determinazione dei requisiti acustici passivi degli edifici".
8. **UNI EN ISO 140-4: 2000.** "Acustica. Misura dell'isolamento acustico in edifici e di elementi di edificio. Misurazioni in opera dell'isolamento acustico per via aerea tra ambienti".
9. **UNI EN ISO 140-5: 2010.** "Acustica. Misurazione in laboratorio dell'isolamento acustico di edifici e di elementi di edificio. Misurazioni in opera dell'isolamento acustico per via aerea degli elementi di facciata e delle facciate".
10. **UNI 11367.** "Classificazione acustica delle unità immobiliari. Procedura di valutazione e verifica in opera".
11. **UNI EN ISO 140-7: 2000.** "Acustica. Misura dell'isolamento acustico in edifici e di elementi di edificio. Misurazioni in opera dell'isolamento dal rumore di calpestio di solai".
12. **UNI EN ISO 717-2: 2007.** "Acustica. Valutazione dell'isolamento acustico in edifici e di elementi di edificio. Isolamento del rumore di calpestio".
13. **UNI EN ISO 717-1:2007.** "Acustica. Valutazione dell'isolamento acustico in edifici e di elementi di edificio. Isolamento acustico per via aerea".
14. **Maffei, L. e Iannace, G.** *Interventi di correzione acustica negli ambienti scolastici*. s.l. : Associazione Italiana di Acustica, Marzo 2013.
15. **BS EN 60268-16:2011.** "Objective rating of speech intelligibility by speech transmission index".
16. **UNI EN 12354:2002.** "Valutazione delle prestazioni acustiche di edifici a partire dalle prestazioni di prodotti".

*Ringrazio Luca e Lisa per la pazienza e la disponibilità*