



**UNIVERSITA' DEGLI STUDI DI PADOVA**

**FACOLTA' DI INGEGNERIA**

**DIPARTIMENTO DI TECNICA E GESTIONE DEI SISTEMI INDUSTRIALI**

**CORSO DI LAUREA TRIENNALE IN INGEGNERIA GESTIONALE**

**TESI DI LAUREA**

**VALUTAZIONE TECNICA ED ECONOMICA PER IL  
CONTROLLO DELLA RIVERBERAZIONE DI UNA  
PALESTRA**

**RELATORE: PROF. RENATO LAZZARIN**

**CORRELATORE: ING. FILIPPO BUSATO**

**LAUREANDO: MICHELE BAZZONI**

**ANNO ACCADEMICO: 2011-2012**

# INDICE

INTRODUZIONE.....	3
CAPITOLO 1 - Il Tempo di riverberazione.....	4
1.Definizione.....	4
CAPITOLO 2 - Lo stato attuale.....	7
1.Descrizione della palestra.....	7
2.Calcolo del tempo di riverberazione.....	8
3.Misura del tempo di riverberazione.....	12
CAPITOLO 3 – Qualità acustica richiesta.....	16
1.Considerazioni generali.....	16
2.Legislazione in materia.....	17
CAPITOLO 4 – Proposta di correzione acustica.....	20
1.Scelta e analisi delle configurazioni.....	21
2.Analisi economica delle soluzioni.....	27
3.Distribuzione dei materiali nella palestra.....	28
CAPITOLO 5 – Conclusioni.....	35
APPENDICE 1 – Misura del tempo di riverberazione.....	37
1.Strumentazione.....	39
APPENDICE 2 – Fornitura dei materiali.....	40
1.Mappyfiber.....	40
2.TopAkustik.....	43

# INTRODUZIONE

Su richiesta del Comune di Vescovana (PD) è stata analizzata l'acustica nella palestra della scuola secondaria "Giovanni XXIII" al fine di trovare gli interventi correttivi per rendere l'ambiente adatto allo svolgimento di attività sportive al suo interno.

Attualmente la palestra non è fornita di nessun sistema di controllo della riverberazione interna degli ambienti che risulta essere abbondantemente sopra il limite consigliato dalla buona norma.

Per valutare l'intervento da effettuare sull'ambiente si è proceduto per diversi step:

- Valutazione dello stato attuale della palestra per mezzo di un'analisi numerica del tempo di riverberazione, misurando le dimensioni e le capacità teoriche di fonoassorbimento delle superfici.
- Valutazione sperimentale del tempo di riverberazione, effettuata interrompendo un' emissione sonora e calcolandone il suo tempo di decadimento; i risultati ottenuti sono stati confrontati con l'analisi numerica per valutare il reale potere fonoassorbente delle superfici. L'aggiustamento dei valori così effettuato è stato in seguito impiegato per prevedere gli effetti correttivi da realizzare. Gli strumenti di misura utilizzati e le caratteristiche sono riportati in Appendice 1.
- Analisi di intervento cercando di soddisfare i requisiti della buona norma; inoltre si sono studiate diverse configurazioni al fine di ottimizzare soluzione tecnica desiderata e budget economico del committente. Verranno anche spiegati i problemi riscontrati nella bonifica acustica e i provvedimenti utilizzati per rimediare agli stessi.

In Appendice 2 sono riportati i materiali utilizzati per la gli interventi correttivi applicati alla palestra, con le caratteristiche tecniche ed economiche degli stessi.

# CAPITOLO 1

## Il tempo di riverberazione

### 1. Definizione

La percezione sonora è dovuta alla componente diretta della sorgente e da quella riflessa. Gli elementi presenti all'interno di un ambiente chiuso (pareti, arredamenti, persone, ecc.) condizionano la propagazione acustica, poiché assorbono in diversa misura l'energia sonora che incide su di loro. In un periodo di tempo dipendente dalle dimensioni della stanza, le riflessioni multiple incrementano l'intensità sonora dell'ambiente rispetto a quelli ottenibili in campo libero. Inoltre questo incremento di energia crea una coda sonora che diminuisce in maniera proporzionale all'assorbimento delle pareti.

Questo è il fenomeno della riverberazione: oltre a causare il degrado della percezione musicale e del parlato, è di interesse industriale perché espone maggiormente il personale al rumore.

Il tempo di riverberazione è il parametro più importante per determinare la qualità di un ambiente sonoro: esso è definito come il tempo necessario ad una riduzione di 60 dB ( $T_{60}$ ) rispetto al livello a regime di una sorgente (un milionesimo più basso).

Operativamente si genera un rumore bianco (ampiezza costante sullo spettro di frequenze) e, una volta interrotto, si analizza la coda sonora fino al livello di rumore di fondo. Nella pratica si usa calcolare il decadimento sonoro per 30 dB ( $T_{30}$ ) o 20 dB ( $T_{20}$ ) e il tempo di riverberazione risulta essere:

$$T_{60} = T_{30} \times 2 \quad \text{oppure} \quad T_{60} = T_{20} \times 3$$

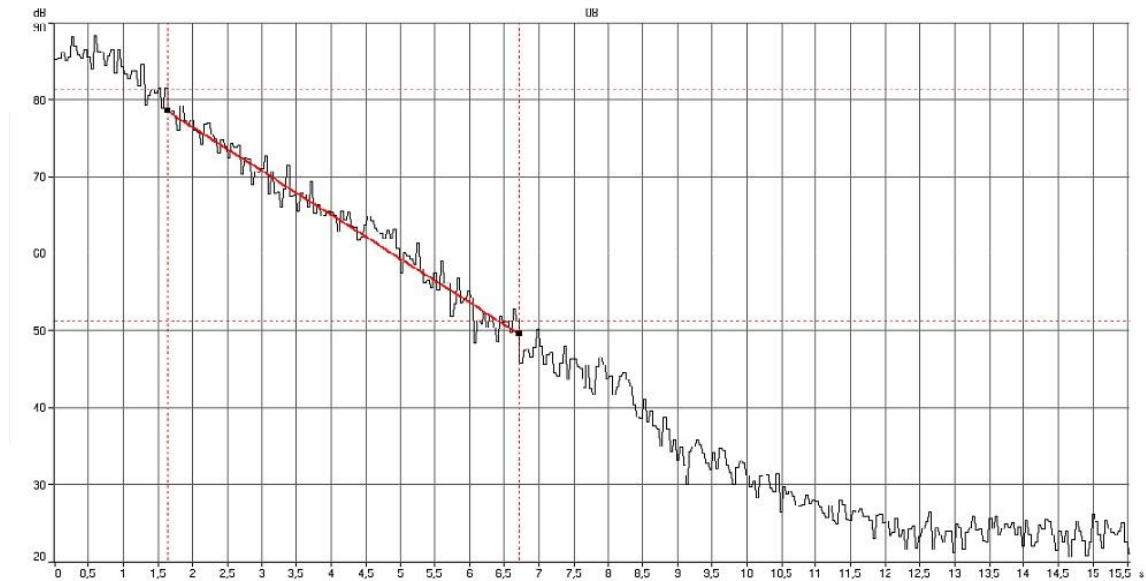


Figura 1. 1 – Decadimento  $T_{30}$  della palestra in esame per la frequenza di 500 Hz

Una relazione empirica che si usa per calcolare il valore del tempo di riverberazione è la relazione di Sabine:

$$T_{60} = 0,16 \frac{V}{A} \quad [\text{s}] \quad (1)$$

Dove  $V$  è il volume [ $\text{m}^3$ ] e  $A$  è il potere fonoassorbente [ $\text{m}^2$ ] dell'ambiente, calcolato come:

$$A = \sum_{i=1}^n \alpha_i S_i \quad (2)$$

Dove  $\alpha_i$  è il coefficiente di assorbimento acustico della  $i$ -esima superficie.

L'assorbimento acustico medio dell'ambiente è definito come:

$$\alpha_m = \frac{\sum_{i=1}^n \alpha_i S_i}{\sum_{i=1}^n S_i} \quad (3)$$

compreso sempre tra 0 e 1.

Nel caso studio in esame si tiene conto che l'assorbimento è un fenomeno discontinuo e non continuo; inoltre per ambienti di grandi dimensioni ( volume > 1000 m<sup>3</sup> ) va considerato il contributo dell'assorbimento atmosferico, pertanto la formula utilizzata per il calcolo del tempo di riverberazione sarà quella di Eyring:

$$T = \frac{0,07 * V}{-S * \log(1 - \alpha m) + 4mV} \quad (4) \text{ oppure:}$$

$$T = \frac{0,16 * V}{-S * \ln(1 - \alpha m) + 4mV}$$

# CAPITOLO 2

## Lo stato attuale

### 1.Descrizione della palestra

La palestra del Comune di Vescovana (PD) è un ambiente a forma di parallelepipedo regolare con misure 24x12,4 m e un'altezza di 7,5 m. Il soffitto e le pareti in calcestruzzo non presentano rivestimenti mentre il pavimento è realizzato in linoleum. Nell'edificio sono presenti due canestri appesi ai lati corti, e alcune strutture per l'attività sportiva. Le finestre, che forniscono illuminazione naturale, sono poste su un lato in prossimità del soffitto; sono presenti tre porte di legno che collegano la palestra agli spogliatoi e alla scuola, e inoltre due uscite di sicurezza che si affacciano sul cortile della struttura.

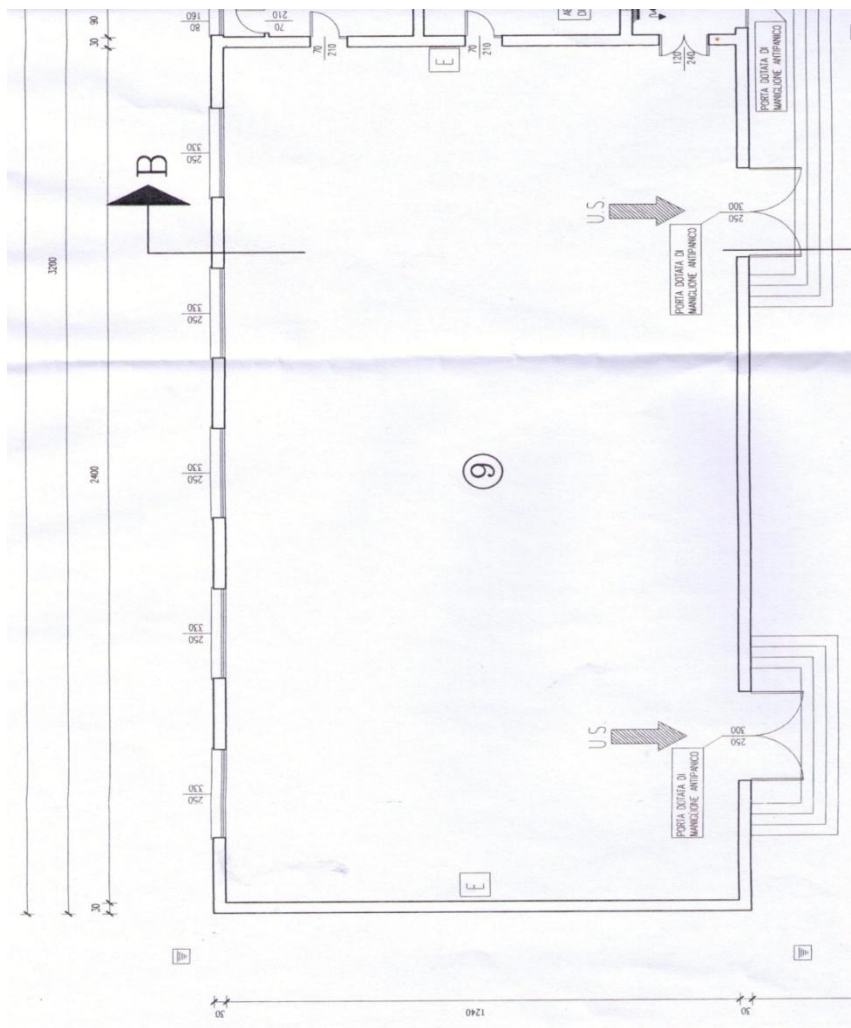


Figura 2. 1 – pianta della palestra

Tenendo presente che l'ambiente è adibito ad attività sportive e ludiche per gli studenti della scuola, la disposizione dei materiali per la correzione sonora dell'edificio dovranno essere posati sul soffitto e sulla fascia alta delle pareti laterali in maniera tale da prevenire il più possibile il danneggiamento degli stessi a causa di urti con palloni e oggetti simili.

Bisogna infine tenere conto che, essendo un edificio di vecchia costruzione, la palestra non presenta nessun accorgimento acustico dettato dalla buona norma, pertanto è lecito aspettarsi che i dati sperimentali saranno peggiori di quelli previsti dal calcolo numerico.

## 2.CALCOLO DEL TEMPO DI RIVERBERAZIONE

Per il calcolo del tempo di riverberazione è necessario conoscere le diverse tipologie di materiale presente nell'ambiente. Per ognuna di esse è necessario sapere l'estensione in m<sup>2</sup> all'interno della palestra e il coefficiente di assorbimento in banda d'ottava o terzo d'ottava. La Tabella 2.1 mostra i dati per il caso in esame.

	Estensione, m <sup>2</sup>	coefficiente di assorbimento acustico					
		frequenza, Hz					
		125	250	500	1000	2000	4000
cemento	764,25	0,01	0,01	0,02	0,05	0,05	0,07
linoleum	297,6	0,02	0,02	0,03	0,03	0,04	0,04
vetrate	58,53	0,38	0,35	0,18	0,12	0,07	0,04
porte antipanico	15	0,38	0,35	0,18	0,12	0,07	0,04
porte	5,82	0,28	0,22	0,17	0,09	0,1	0,11

Tabella 2. 1 – Coefficienti di assorbimento acustico ed estensione dei materiali



Per poter approfondire l'analisi si calcola la distribuzione dei materiali sulle superfici dell'edificio; la Tabella 2.2 riporta i dati della palestra.

	Superficie m <sup>2</sup>	Rivestimento	Superficie m <sup>2</sup>	coefficiente di assorbimento acustico					
				frequenza, Hz					
				125	250	500	1000	2000	4000
Parete nord	180	cemento	138,75	0,01	0,01	0,02	0,05	0,05	0,07
		vetrate	41,25	0,38	0,35	0,18	0,12	0,07	0,04
Parete sud	180	cemento	147,72	0,01	0,01	0,02	0,05	0,05	0,07
		vetrate	17,28	0,38	0,35	0,18	0,12	0,07	0,04
		porte antipanico	15	0,38	0,35	0,18	0,12	0,07	0,04
Parete est	93	cemento	87,18	0,01	0,01	0,02	0,05	0,05	0,07
		porte	5,82	0,28	0,22	0,17	0,09	0,1	0,11
Parete ovest	93	cemento	93	0,01	0,01	0,02	0,05	0,05	0,07
Soffitto	297,6	cemento	297,6	0,01	0,01	0,02	0,05	0,05	0,07
Pavimento	297,6	linoleum	297,6	0,02	0,02	0,03	0,03	0,04	0,04

Tabella 2. 2 – Ripartizione dei coefficienti di assorbimento acustico ed estensioni dei materiali distribuiti nella palestra.

Il potere fonoassorbente  $A [m^2]$  è di seguito calcolato moltiplicando il coefficiente di assorbimento, al variare della frequenza, per la rispettiva superficie. Di seguito in Tabella 2.3 si mostra il foglio di calcolo così trovato.

	Superficie m <sup>2</sup>	Rivestimento	Superficie m <sup>2</sup>	potere fonoassorbente, m <sup>2</sup>					
				frequenza, Hz					
				125	250	500	1000	2000	4000
Parete nord	180	Cemento	138,75	1,4	1,4	2,8	6,9	6,9	9,7
		Vetrate	41,25	15,7	14,4	7,4	5,0	2,9	1,7
Parete sud	180	Cemento	147,72	1,5	1,5	3,0	7,4	7,4	10,3
		Vetrate	17,28	6,6	6,0	3,1	2,1	1,2	0,7
		porte antipanico	15	5,7	5,3	2,7	1,8	1,1	0,6
Parete est	93	Cemento	87,18	0,9	0,9	1,7	4,4	4,4	6,1
		Porte	5,82	1,6	1,3	1,0	0,5	0,6	0,6
Parete ovest	93	Cemento	93	0,9	0,9	1,9	4,7	4,7	6,5
Soffitto	297,6	Cemento	297,6	3,0	3,0	6,0	14,9	14,9	20,8
Pavimento	297,6	Linoleum	297,6	6,0	6,0	8,9	8,9	11,9	11,9

Tabella 2. 3 – Foglio di calcolo del potere fonoassorbente delle superfici

Con un'interpolazione lineare, conoscendo i valori numerici del fattore  $4m$  per le frequenze di 63, 2000, 4000 e 8000 Hz, si è trovata la grandezza per le rispettive frequenze in banda di terzo d'ottava (Tabella 2.4).

Hz	4m	Hz	4m
63	0,00009	1000	0,0048
100	0,00048	1250	0,006
125	0,00060	1600	0,00767
160	0,00077	2000	0,0096
200	0,00096	2500	0,0146
250	0,00120	3150	0,0184
315	0,00151	4000	0,0244
400	0,00192	5000	0,0491
500	0,00240	6300	0,06187
630	0,00302	8000	0,086
800	0,00384	10000	0,0982

Tabella 2. 4 – Interpolazione lineare del valore  $4m$

In Tabella 2.5 sono riportati i valori d'interesse per le frequenze analizzate nel caso in oggetto.

4m	4m	4m	4m	4m	4m
125	250	500	1000	2000	4000
0,00060	0,00120	0,00240	0,00480	0,00960	0,02440

Tabella 2. 5 – valore d'interesse per il caso in oggetto

Sommando il contributo dei materiali si ricava il potere fonoassorbente totale per frequenza. Il coefficiente di assorbimento medio è calcolato con la formula (3) descritta nel Capitolo 1.

Il tempo di riverberazione si ricava con la formula di Eyring (4):

- S è la superficie interna della palestra = 1141,2 m<sup>2</sup>
- V è il volume → 24\*12,4\*7,5 = 2232 m<sup>3</sup>

I risultati ottenuti sono riportati in Tabella 2.6.

	frequenza, Hz					
	125	250	500	1000	2000	4000
potere fonoassorbente A, m <sup>2</sup>	43	41	38	56	56	69
coefficiente di fonoassorbimento medio, $\alpha_m$	0,04	0,04	0,03	0,05	0,05	0,06
tempo di riverberazione T , Eyring	7,6	7,6	7,0	4,4	3,4	1,8

Tabella 2. 6 – parametri acustici calcolati per la palestra nello stato attuale

### 3.MISURA DEL TEMPO DI RIVERBERAZIONE

Il calcolo sperimentale del tempo di riverberazione viene approfondito in Appendice 1. Sono state effettuate misure su 6 punti ordinati all'interno della palestra, posizionando una sorgente sonora di rumore bianco in 2 aree opposte dell'edificio. Con questa metodologia sono state raccolte 12 combinazioni che permettono di analizzare la distribuzione dell'assorbimento sonoro dell'ambiente in esame. Nel caso in studio non si sono verificati valori discontinui a dovuti alla forma regolare dell'edificio. I dati raccolti sono riportati in Tabella 2.7 in banda di terzo d'ottava.

Hz	01[s]	02[s]	03[s]	04[s]	05[s]	06[s]	07[s]	08[s]	09[s]	10[s]	11[s]	12[s]	Med.[s]
50	N/D	N/D	N/D	N/D	N/D	N/D	N/D	N/D	N/D	N/D	N/D	N/D	N/D
63	N/D	6,53	N/D	N/D	9,15	N/D	N/D	N/D	N/D	N/D	N/D	N/D	7,84
80	8,47	7,57	9,62	9,56	9,45	10,61	10,81	9,11	9,05	8,39	8,48	7,15	9,02
100	9,21	7,6	10,82	10,05	8,85	8,24	9,21	9,41	10,4	7,2	8,71	9,53	9,1
125	8,58	7,61	8,15	7,01	7,11	9,19	7,46	9,28	9,99	11,3	8,43	8,64	8,56
160	8,92	9,42	8,1	9,08	7,52	8,7	8,73	9,65	8,59	9,59	7,75	9,25	8,78
200	7,77	9,4	9,2	8,51	7,44	8,76	8,47	9,51	11,19	9,11	8,61	7,48	8,79
250	9,12	9,1	9,58	8,51	9,2	8,49	8,4	9,75	9,83	8,03	9,14	9,79	9,08
315	10,14	10,59	9,78	9,8	9,91	9,21	10,44	10,45	9,24	10,15	10,16	10,3	10,01
400	10,84	10,01	10,25	10,44	9,71	11,09	9,75	10,64	10,02	12,01	9,38	9,6	10,31
500	9,24	11,2	10,1	10,22	9,82	10,47	10,26	10,52	10,48	9,35	10,15	10,07	10,16
630	9,61	10,39	10,28	10,51	10,05	10,57	10,33	10,3	10,12	10,55	9,88	10,47	10,26
800	10,38	10,51	9,95	9,6	9,92	10,21	10,13	10,1	10,14	10,3	10,47	10,21	10,16
1000	9,5	10,06	9,7	9,67	9,13	9,45	9,05	10,16	9,44	9,72	9,71	9,25	9,57
1250	8,96	9,28	8,71	8,92	8,63	8,66	8,93	8,79	8,62	8,98	8,9	9,08	8,87
1600	8,28	7,88	7,97	7,73	8,18	8,05	8,08	7,7	7,75	7,89	8,15	8	7,97
2000	6,64	6,78	6,81	6,86	7,08	6,8	7,23	6,77	7,02	6,66	6,91	7,2	6,9
2500	6,01	5,7	6,1	5,82	5,98	5,88	6,27	5,9	6,32	6,02	6,08	6,37	6,04
3150	4,82	4,73	4,73	5,17	4,59	4,99	4,83	5,01	4,91	4,88	4,84	4,86	4,86
4000	3,5	3,74	3,93	3,74	3,71	3,66	3,83	3,75	3,68	3,87	3,56	3,79	3,73
5000	2,68	2,62	2,68	2,57	2,74	2,76	2,55	2,66	2,71	2,56	2,75	2,78	2,67
6300	1,89	1,89	1,98	1,93	1,98	1,98	1,94	1,93	2,05	1,83	1,95	1,86	1,93
8000	1,3	1,35	1,31	1,3	1,35	1,33	1,36	1,44	1,33	1,32	1,41	1,41	1,35
10000	0,86	0,92	0,89	0,94	0,91	0,87	0,89	0,96	0,89	0,92	0,93	0,9	0,91

Tabella 2.7 – Tempo di riverberazione per le 12 misure sperimentali

La Figura 2.2 mostra l'andamento regolare del tempo di riverberazione per le misure effettuate.

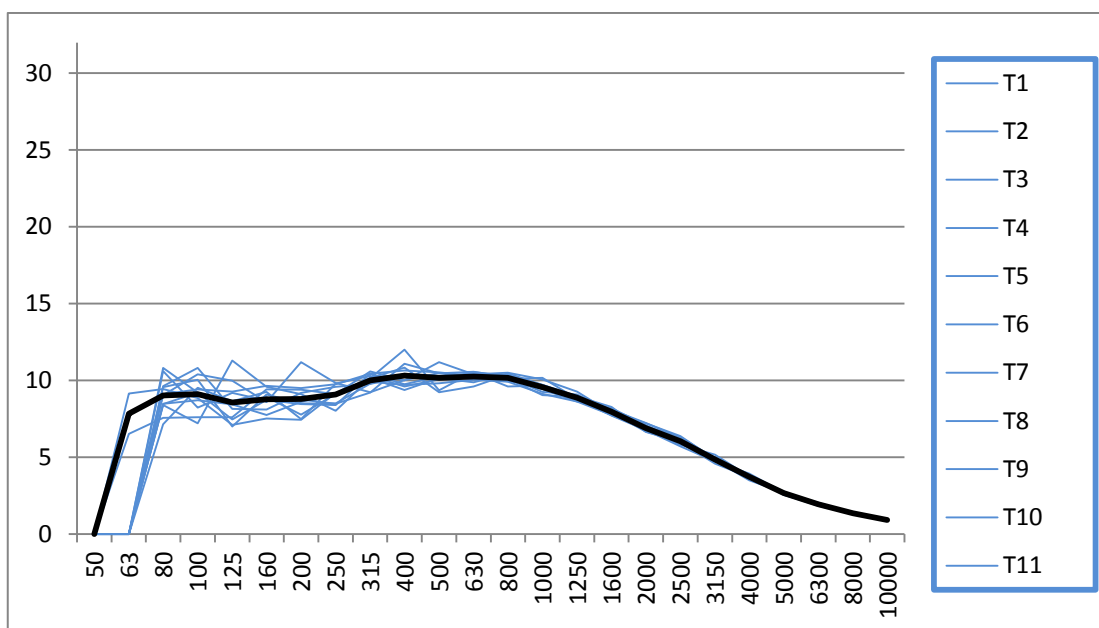


Figura 2.2 - Andamento grafico delle misurazioni sperimentali e del Tmedio

La Tabella 2.8 mette a confronto il tempo di riverberazione ricavato precedentemente con quello medio misurato sperimentalmente, alle frequenze in esame. Si nota subito una differenza rilevante nei valori dovuta all'edificio obsoleto, nel quale i materiali al suo interno non assorbono come ci si aspettava in una prima analisi.

	frequenza, Hz					
	125	250	500	1000	2000	4000
tempo di riverberazione T, Eyring	7,6	7,6	7	4,4	3,4	1,8
tempo di riverberazione T, sperimentale	8,56	9,08	10,16	9,57	6,9	3,73

Tabella 2.8 – Confronto tempo di riverberazione calcolato e sperimentale

Pertanto i coefficienti di assorbimento espressi in Tabella 2.1 vanno rivisti e modificati con l'ausilio dei dati raccolti per procedere in seguito alla procedura di trattamento fonoassorbente dell'ambiente.

Per valutare l'entità dell'assorbimento reale si procede per gradi:

- Si calcola il  $\Delta T$  mancante rispetto al T misurato:  $T$ , sperimentale –  $T$ , Eyring
- Si ricava il valore del coefficiente di assorbimento medio facendo l'inverso della formula (4):

$$\Delta\alpha_m = 1 - \exp\left[\left(\frac{4mV}{S}\right) - \left(\frac{0,16V}{\Delta TS}\right)\right] \quad (5)$$

- Il valore del potere fonoassorbente risulta dall'equazione:

$$\Delta A = \Delta\alpha_m \cdot S_{tot}$$

In Tabella 2.9 riporta il foglio di calcolo appena illustrato:

	frequenza, Hz					
	125	250	500	1000	2000	4000
$\Delta T$ (s)	0,9	1,5	3,2	5,2	3,5	1,9
$\Delta\alpha_m$ , mancante	0,29	0,19	0,09	0,05	0,07	0,11
$\Delta A$ , mancante ( $m^2$ )	328,29	211,64	102,59	56,35	77,15	126,01

Tabella 2. 9 – Calcolo del potere fonoassorbente mancante

L'obbiettivo è correggere i coefficienti di assorbimento teorici; per fare ciò è necessario trovare un fattore moltiplicativo X che verrà usato per modificare i valori rispetto a quanto ottenuto con la valutazione sperimentale.

Definendo l'eguaglianza  $X \cdot A_{teorico} = A_{reale}$  si ricava la relazione :

$$X = \frac{A_{reale}}{A_{teorico}} \quad (6)$$

$\alpha_m$ , reale si trova con l'equazione (5) utilizzando T, sperimentale.

In Tabella 2.10 si riporta il foglio di calcolo.

	frequenza, Hz					
	125	250	500	1000	2000	4000
A, teorico	43	41	38	56	56	69
T, sperimentale	8,56	9,08	10,16	9,57	6,9	3,73
$\alpha_m$ , reale	0,03	0,03	0,03	0,02	0,03	0,04
A, reale	39,68	36,07	29,41	26,30	29,93	40,54
X	0,92	0,88	0,77	0,47	0,53	0,59

Tabella 2. 10 – Calcolo del fattore correttivo X

Le superfici della palestra sono una costante nell'uguaglianza precedente, per questo motivo possiamo scrivere:

$$X * A_{\text{teorico}} = A_{\text{reale}}$$

$$X * \left( \sum_{i=1}^n \alpha_{i,\text{teorico}} S_i \right) = \left( \sum_{i=1}^n \alpha_{i,\text{reale}} S_i \right)$$

$$\text{Infine} \rightarrow \left( \sum_{i=1}^n X * \alpha_{i,\text{teorico}} S_i \right) = \left( \sum_{i=1}^n \alpha_{i,\text{reale}} S_i \right)$$

Concludendo:  $X * \alpha_{i,\text{teorico}} = \alpha_{i,\text{reale}}$

In questo modo si trova i coefficienti reali per ogni materiale all'interno dell'edificio.

In Tabella 2.11 vengono riportati i calcoli nel foglio di lavoro.

	Estensione, m <sup>2</sup>	coefficiente di assorbimento reale					
		frequenza, Hz					
		125	250	500	1000	2000	4000
cemento	764,25	0,01	0,01	0,02	0,02	0,03	0,04
linoleum	297,6	0,02	0,02	0,02	0,01	0,02	0,02
vetrate	58,53	0,35	0,31	0,14	0,06	0,04	0,02
porte antipanico	15	0,35	0,31	0,14	0,06	0,04	0,02
porte	5,82	0,26	0,19	0,13	0,04	0,05	0,06

Tabella 2. 11 – coefficienti di assorbimento reali per ogni materiale

I risultati così ottenuti sono l'incipit per l'analisi dei trattamenti di correzione acustica che verranno utilizzati in seguito per il miglioramento del riverbero del caso in esame.

## **CAPITOLO 3**

### **Qualità acustica richiesta**

#### **1.Considerazioni generali**

La combinazione ottimale delle onde sonore dirette e di quelle riflesse in un ambiente confinato dipende dalla destinazione d'uso dello stesso.

Nel caso di teatri o sale per concerti, la riverberazione è utile per l'effetto di rinforzo che viene impresso ad ogni singolo impulso sonoro; in generale, per ambienti destinati all'ascolto della parola i valori ideali del tempo di riverberazione sono più brevi rispetto a quelli per le sale destinate all'ascolto della musica, in quanto la diffusione musicale richiede una maggiore enfattizzazione dell'effetto spaziale. Per il parlato, infatti, la comprensione del linguaggio consiste nel corretto riconoscimento della sequenza fonetica; l'effetto di coda sonora prodotto da un'eccessiva riverberazione può portare alla sovrapposizione degli impulsi sonori causando la conseguente distorsione della percezione linguistica.

Ottenere valori ottimali del tempo di riverberazione rappresenta il giusto compromesso tra il raggiungimento di un livello sonoro sufficiente per un'audizione senza sforzo, in tutti i punti dell'ambiente, e la riduzione del disturbo provocato da un eccesso di riverberazione.

Va considerato anche il volume dell'ambiente influisce in maniera significativa sul livello ottimo del tempo di riverberazione per le varie frequenze. Per questa serie di motivi in letteratura si trovano diversi studi che mettono in correlazione il tempo ottimo richiesto per le diverse applicazioni di interesse in funzione del volume del locale acustico.



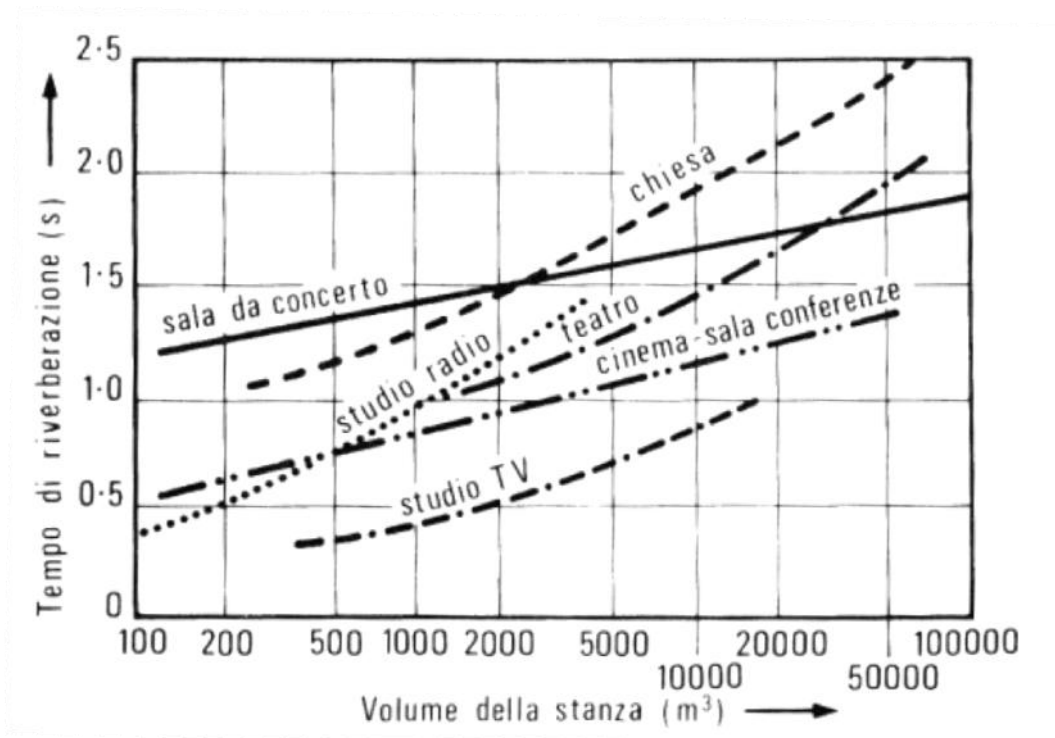


Figura 3.1 – tempo di riverberazione ottimo a 500 Hz in funzione dell'ambiente, per le diverse applicazioni.

## 2. Legislazione in materia

In materia di tempo di riverberazione per gli ambienti confinati la legislazione di riferimento è la seguente:

- D.P.C.M. 05/12/1997, Determinazione dei requisiti acustici passivi degli edifici;
- Circolare n. 3150 del Ministero dei Lavori Pubblici del 22/05/1967;
- Decreto Ministeriale 18/12/1975, Norme e tecniche relative all'edilizia scolastica.

Secondo il D.P.C.M. 05/12/1997 i limiti del tempo di riverberazione sono quelli riportati nella Circolare n. 3150 del 22/05/1967:

- La media dei tempi di riverberazione misurati alle frequenze 250 - 500 - 1000 - 2000 Hz, non deve superare 1,2 sec. ad aula arredata, con la presenza di due persone al massimo.
- Nelle palestre la media dei tempi di riverberazione (qualora non debbano essere utilizzate come auditorio) non deve superare 2,2 sec.

Il D.M. 18/12/1975 prevede una procedura di calcolo del tempo ottimo di riverberazione in funzione del volume dell'ambiente confinato e della frequenza centrale in banda di ottava.

In Figura 3.2 viene riportato il tempo di riverberazione ottimo a 2000 Hz in funzione della volumetria.

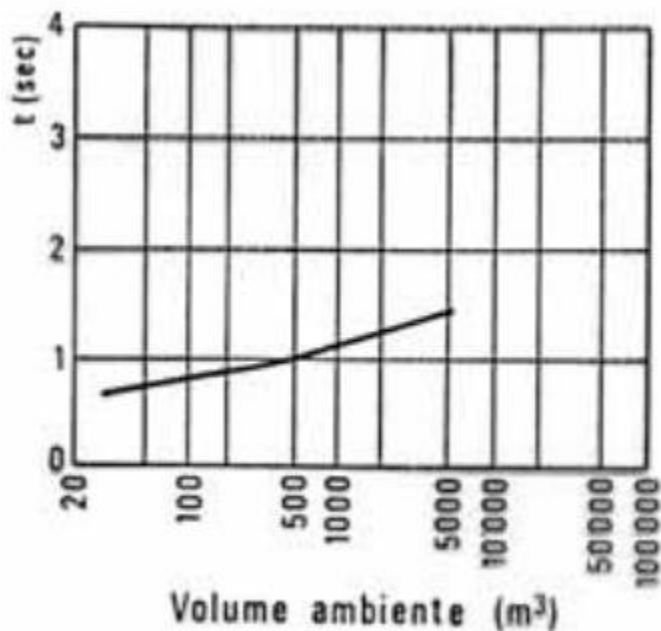


Figura 3.2 – Tempo di riverberazione ottimo alla frequenza di 2000 Hz in funzione del volume dell'ambiente, secondo il D.M. 18/12/1975

Tale valore va assunto unitario nel grafico di Figura 3.3, dove si calcolano i valori del tempo di riverberazione alle varie frequenze.

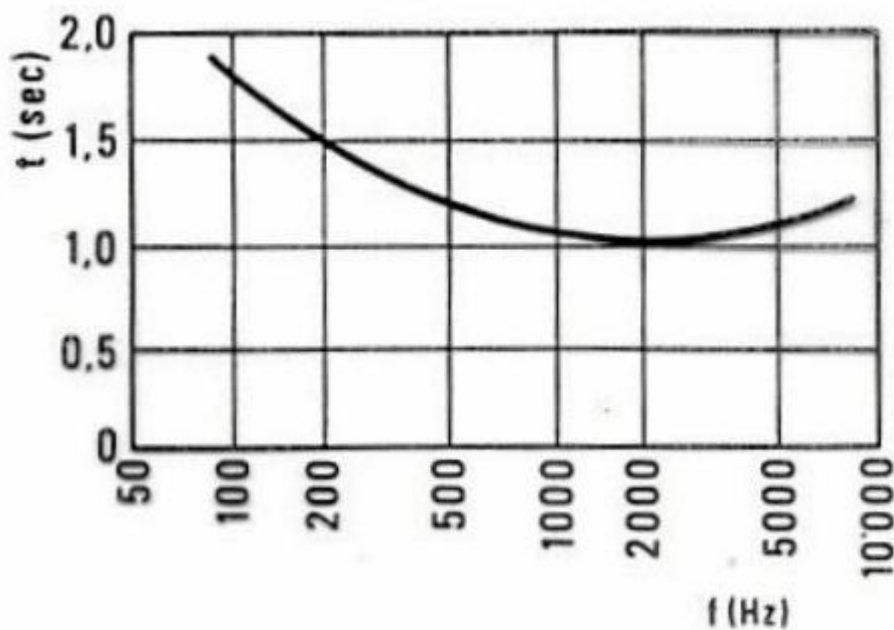


Figura 3.3 – Curva di rinforzo nel tempo di riverberazione ottimo a 2000 Hz, per ambienti scolastici secondo il D.M. 18/12/75.

Nel caso in esame, con un volume di 2232 m<sup>3</sup> si ricava un valore di tempo di riverberazione ottimo a 2000 Hz di circa 1,25 s; utilizzando questo valore si ricavano i corrispettivi alle varie frequenze con la tabella in Figura 3.3.

Di seguito viene riportato il grafico dei tempi richiesti dalla norma per il caso in esame (Figura 3.4 e 3.5).

	frequenza, Hz					
	125	250	500	1000	2000	4000
T ottimo (s)	2,19	1,88	1,56	1,38	1,25	1,50

Figura 3. 4 – Tempo ottimo di riverberazione con V = 2232 m<sup>3</sup>

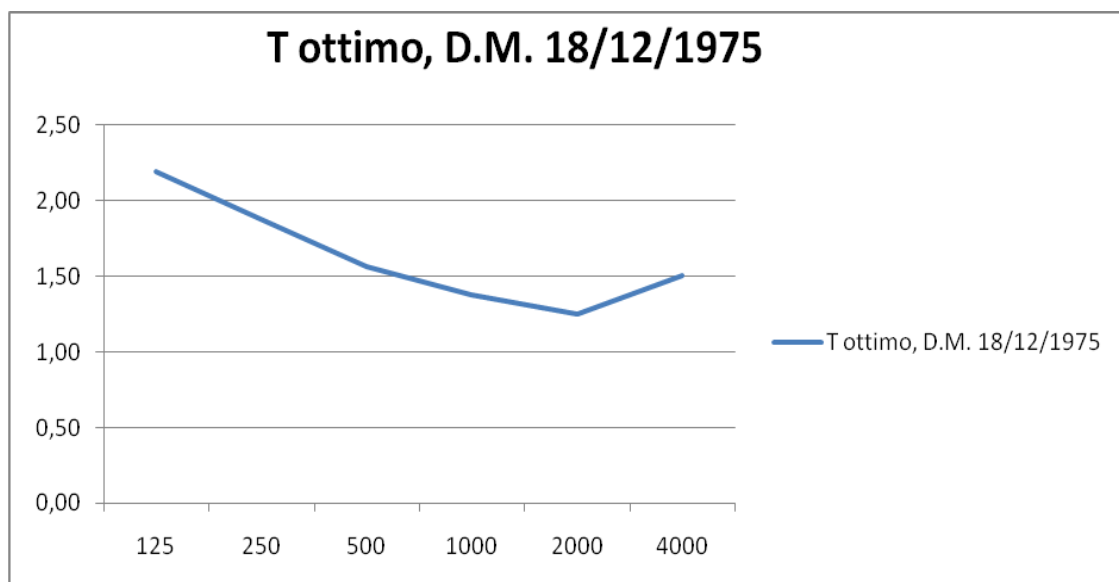


Figura 3. 5 – Grafico del tempo ottimo di riverberazione con V = 2232 m<sup>3</sup>, secondo D.M. 18/12/1975.

## CAPITOLO 4

### Proposta di correzione acustica

Come già esposto nei capitoli precedenti, il tempo di riverberazione attuale nella palestra in esame è molto lontano da quello ottimo richiesto dalle norme in vigore. La media centrata sulle bande di 250, 500, 1000 e 2000 Hz risulta essere 8,9 s contro i 2,2 richiesti dalla Circolare n. 3150; il confronto dei valori è espresso nella Figura 4.1.

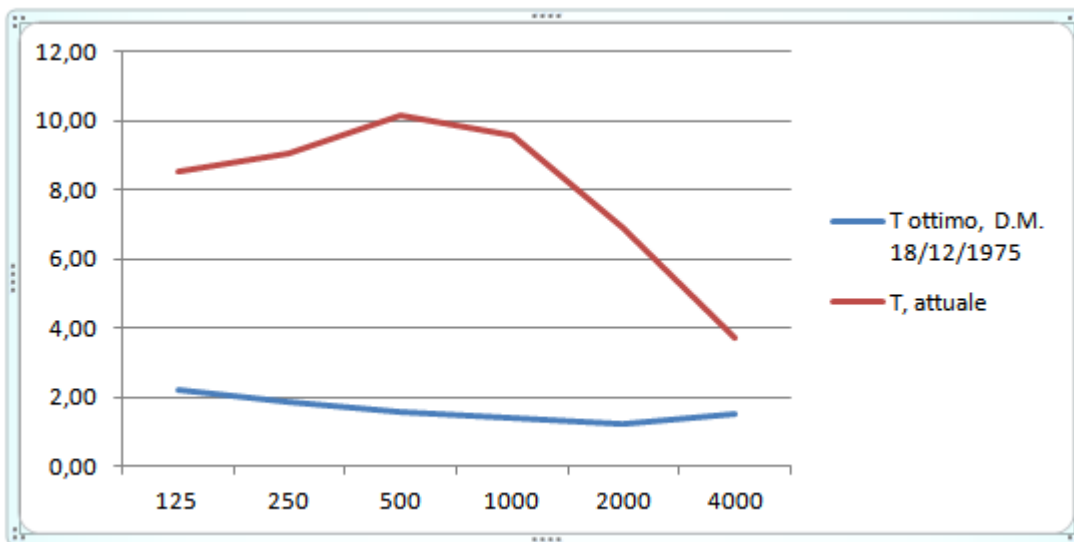


Figura 4. 1 – Confronto tra il tempo di riverberazione allo stato attuale e i valori obiettivo per la bonifica della palestra

Il grafico mostra chiaramente come l'opera di risanamento acustico riguardi tutto il range di frequenze dell'udibile, pertanto è si rende necessaria una soluzione che operi in maniera efficace sia alle alte che alle basse frequenze.

Alla soluzione numerica del caso studio vanno accostati i vincoli pratici che limitano la forbice di alternative utilizzabili al fine di raggiungere l'obiettivo prefissato, che di seguito vengono elencati:

- La fascia inferiore della palestra ( circa 3 metri di altezza ) deve essere esclusa dall'intervento, in primis per non pregiudicare la finalità ludico-sportiva alle quali è dedicato l'ambiente, in secundis per evitare il danneggiamento dei materiali durante le attività;
- Deve essere mantenuto l'attuale livello di illuminazione naturale all'interno dell'edificio: per questa ragione solo la parte centrale del soffitto può essere soggetta ad interventi, lasciando libere le fasce laterali;
- Le attrezzature sportive (canestro, spalliere, pertiche, quadro svedese etc.) non possono essere rimosse per non perdere l'originaria destinazione d'uso.
- Il Comune di Vescovana mette a disposizione un budget limitato tra i 10.000 e i 14.000 € ; tale limitazione vincola la scelta dei materiali, per i quali bisognerà trovare un buon compromesso qualità/prezzo.

## 1.Scelta ed analisi delle configurazioni

Per l'ambiente in oggetto si è scelto come materiale fonoassorbente il "Mappyfiber piano" in adesione. Si rimanda all'Appendice 2 la descrizione dei materiali utilizzati. In Figura 4.2 sono riportati i coefficienti di assorbimento alle varie frequenze per il suddetto materiale.

	frequenza, Hz					
	125	250	500	1000	2000	4000
$\alpha$ ,Mappyfiber	0,15	0,45	0,7	0,9	0,9	0,85

Figura 4. 2 – coefficienti di assorbimento materiale "Mappyfiber piano".

Per determinare la quantità di materiale scelto da applicare all'ambiente in esame, si procede calcolando una stima della superficie in m<sup>2</sup> per le bande centrali di 250, 500, 1000, 2000 Hz e si fa una media dei valori trovati; a partire dal dato così ricavato si prosegue a varare le varie opzioni per trovare la migliore configurazione.

Chiameremo:

- $S_l$  = superficie linoleum ( $m^2$ ),  $\alpha_l$  = coefficiente assorbimento linoleum;
- $S_v$  = superficie vetrate ( $m^2$ ),  $\alpha_v$  = coefficiente assorbimento vetrate;
- $S_p$  = superficie porte ( $m^2$ ),  $\alpha_p$  = coefficiente assorbimento porte;
- $S_{pp}$  = superficie porte anti panico ( $m^2$ ),  $\alpha_{pp}$  = coefficiente assorbimento porte anti panico;
- $S_c$  = superficie cemento ( $m^2$ ),  $\alpha_c$  = coefficiente assorbimento cemento;
- $S_{c1}$  = superficie cemento libera ( $m^2$ );
- $S_{c2}$  = superficie cemento con Mappyfiber ( $m^2$ ),  $\alpha_{mf}$  = coefficiente assorbimento Mappyfiber;
- 

Il potere fonoassorbente si può scrivere come:

$$\alpha_m \cdot Stot = S_l \cdot \alpha_l + S_v \cdot \alpha_v + S_p \cdot \alpha_p + S_{pp} \cdot \alpha_{pp} + S_{c1} \cdot \alpha_c + S_{c2} \cdot \alpha_{mf} \quad (7)$$

$$\text{ricordando che } S_{c1} + S_{c2} = S_c \quad (8)$$

$$\rightarrow S_{c1} = S_c - S_{c2}$$

Da (7) e (8) si trova:

$$\alpha_m \cdot Stot = S_l \cdot \alpha_l + S_v \cdot \alpha_v + S_p \cdot \alpha_p + S_{pp} \cdot \alpha_{pp} + S_c \cdot \alpha_c + S_{c2} \cdot (\alpha_{mf} - \alpha_c)$$

da cui:

$$S_{c2} = \frac{\alpha_m \cdot Stot - (S_l \cdot \alpha_l + S_v \cdot \alpha_v + S_p \cdot \alpha_p + S_{pp} \cdot \alpha_{pp} + S_c \cdot \alpha_c)}{(\alpha_{mf} - \alpha_c)} \quad (9)$$

Di seguito in Tabella 4.1 viene riportato il foglio di calcolo per il seguente procedimento.

	Estensione $m^2$	frequenza, Hz			
		250	500	1000	2000
$S_{c2}, m^2$		311	252	224	235
$S_c, m^2$	764				
$S_{c2}, m^2, \text{ medio}$	255				
$S_{c1} = S_c - S_{c2}, \text{ medio}$	509				

Tabella 4. 1 – calcolo delle superficie di cemento libera e ricoperta di materiale fonoassorbente, per le frequenze centrali

Con la combinazione di valori così trovati, è possibile calcolare il nuovo  $\alpha_m$  per il range di frequenze in esame e conseguentemente il tempo di riverberazione così ottenuto con questa soluzione:

- $\alpha_m = (S_l \cdot \alpha_l + S_v \cdot \alpha_v + S_p \cdot \alpha_p + S_{pp} \cdot \alpha_{pp} + S_{c1} \cdot \alpha_c + S_{c2} \cdot \alpha_{mf}) / S_{tot}$  ;
- per  $T_{ottenuto}$  si utilizza l'equazione (4) ;

I valori ricavati sono indicati in Tabella 4.2.

	frequenza, Hz					
	125	250	500	1000	2000	4000
$\alpha_m$	0,066	0,130	0,180	0,221	0,223	0,218
$T_{ottenuto}$ (s)	4,41	2,17	1,51	1,16	1,07	0,89
$T_{richiesto}$ (s)	2,19	1,88	1,56	1,38	1,25	1,50
scostamento (%)	-101,7	-15,8	3,6	15,4	14,6	40,9

Tabella 4. 2 – Tempo di riverberazione ottenuto con la prima analisi

Lo scostamento in % indica quanto il risultato conseguito è lontano dai valori richiesti dalla norma in vigore. Per le medio-alte frequenze, il colore verde indica una correzione in positivo rispetto al  $T_{richiesto}$ , viceversa per le basse frequenze. Il tempo di riverberazione medio a 250, 500, 1000, 2000 Hz è 1,5 s, inferiore ai 2,2 imposti dalla Circolare n. 3150.

Tuttavia a 125 Hz un  $T_{ottenuto}$  di 4,41 s è un valore decisamente alto. Va sottolineato, comunque, che risulta difficile operare un miglioramento importante alle basse frequenze. Per cercare di ridurre quest'ultime si è scelto di utilizzare, oltre al Mappyfiber, un materiale che possiede coefficienti di assorbimento più alti alle medio-basse frequenze; per il caso in esame si è adottato il "TopAkustik", di cui si approfondiscono le caratteristiche nell'Appendice 2.

Di contro questo materiale è il suo costo elevato per  $m^2$ , che ne limita di molto il suo utilizzo nel caso in esame.

Di seguito in Tabella 4.3 si riportano valori dei coefficienti di assorbimento per il TopAkustik.

	frequenza, Hz					
	125	250	500	1000	2000	4000
$\alpha$	0,33	0,77	0,9	0,88	0,74	0,59

Tabella 4. 3 – coefficienti assorbimento TopAkustik

L'obiettivo dell'analisi ora, verte sulla ricerca della configurazione ottima con la combinazione Mappyfiber-TopAkustik. L'estensione in m<sup>2</sup> per i singoli materiali si distribuisce attribuendo una percentuale della superficie ricavata in Tabella 4.1 che già soddisfa le richieste della Circolare n. 3150, come mostrato in Tabella 4.2.

Prendendo come esempio la Configurazione n.1 con 90% Mappyfiber e 10% TopAkustik, e definendo:

$\alpha_{tpk}$  = coefficiente assorbimento TopAkustik

Si ricava:

- $\alpha_m = \frac{(S_l \cdot a_l + S_v \cdot a_v + S_p \cdot a_p + S_{pp} \cdot a_{pp} + S_{c1} \cdot a_c + 0,9 \cdot S_{c2} \cdot a_{mf} + 0,1 \cdot S_{c2} \cdot a_{tpk})}{S_{tot}}$
- per  $T_{ottenuto}$  si utilizza l'equazione (4) ;

In Tabella 4.4 si riporta il foglio di calcolo.

### Configurazione 1

		frequenza, Hz					
		125	250	500	1000	2000	4000
90%	$\alpha_{mf}$	0,15	0,45	0,7	0,9	0,9	0,85
10%	$\alpha_{tpk}$	0,33	0,77	0,9	0,88	0,74	0,59
	$\alpha_m$	0,07	0,14	0,18	0,22	0,22	0,21
	$T_{ottenuto}$	4,16	2,06	1,47	1,17	1,09	0,91
	$T_{richiesto}$	2,19	1,88	1,56	1,38	1,25	1,50
	Scostamento %	-90,18	-9,81	5,73	14,77	12,86	39,39

Tabella 4. 4 – soluzione del tempo di riverberazione con Configurazione 1.



Lo scostamento permette di valutare come, con questa proposta, si rimane sempre su ottimi tempi di riverberazione alle medio-alte frequenze e si è migliorato la situazione a 125 e 250 Hz rispetto alla soluzione precedente.

Di seguito in Tabella 4.5, 4.6, 4.7 si riportano le altre possibili alternative in funzione della percentuale di estensione in m<sup>2</sup> dei materiali utilizzati.

### Configurazione 2

		frequenza, Hz					
		125	250	500	1000	2000	4000
70%	$\alpha_{mf}$	0,15	0,45	0,7	0,9	0,9	0,85
30%	$\alpha_{tpk}$	0,33	0,77	0,9	0,88	0,74	0,59
	$\alpha_m$	0,08	0,15	0,19	0,22	0,21	0,20
	T, ottenuto	3,73	1,86	1,40	1,18	1,12	0,95
	T, richiesto	2,19	1,88	1,56	1,38	1,25	1,50
	Scostamento %	-70,57	1,02	10,35	14,40	10,02	36,72

Tabella 4. 5 - soluzione del tempo di riverberazione con Configurazione 2.

### Configurazione 3

		frequenza, Hz					
		125	250	500	1000	2000	4000
50%	$\alpha_{mf}$	0,15	0,45	0,7	0,9	0,9	0,85
50%	$\alpha_{tpk}$	0,33	0,77	0,9	0,88	0,74	0,59
	$\alpha_m$	0,09	0,17	0,20	0,22	0,20	0,19
	T, ottenuto	3,38	1,69	1,33	1,18	1,16	0,99
	T, richiesto	2,19	1,88	1,56	1,38	1,25	1,50
	Scostamento %	-54,49	10,05	14,59	14,03	7,02	33,84

Tabella 4. 6 - soluzione del tempo di riverberazione con Configurazione 3.

## Configurazione 4

		frequenza, Hz					
		125	250	500	1000	2000	4000
30%	$\alpha_{mf}$	0,15	0,45	0,7	0,9	0,9	0,85
70%	$\alpha_{tpk}$	0,33	0,77	0,9	0,88	0,74	0,59
	$\alpha_m$	0,09	0,18	0,21	0,22	0,20	0,18
	T, ottenuto	3,09	1,54	1,27	1,19	1,20	1,04
	T, richiesto	2,19	1,88	1,56	1,38	1,25	1,50
	Scostamento %	-41,08	17,69	18,49	13,66	3,84	30,73

Tabella 4. 7 - soluzione del tempo di riverberazione con Configurazione 4.

La Configurazione 4 risulta essere la soluzione ottima. Il tempo di riverberazione medio a 250, 500, 1000, 2000 Hz è 1,3 s e rispetta pienamente la Circolare n. 3150. Inoltre alle basse frequenze, i valori così ricavati sono accettabili.

## 2. Analisi economica delle soluzioni

L'analisi numerica deve essere naturalmente confrontata con i vincoli economici posti dal committente, per questo motivo la configurazione ottima non è necessariamente la migliore per il caso in esame.

Di seguito si riporta un raffronto tra i costi delle configurazioni appena descritte.

Per il "Mappyfiber piano" in adesione il costo è di 26,04 €/m<sup>2</sup>, mentre per il "TopAkustik" è di 130 €/m<sup>2</sup>. Già da questi dati si può supporre che il Mappyfiber sarà il materiale prevalente essendo il suo prezzo 5 volte inferiore rispetto al TopAkustik.

In Tabella 4.8 sono riportati i calcoli per i costi nelle diverse configurazioni in oggetto.

Configurazione		1	2	3	4
Superficie					
Mappyfiber	m <sup>2</sup>	230	179	128	77
Superficie					
TopAkustik	m <sup>2</sup>	26	77	128	179
prezzo Mappyfiber	26,04 €	5992 €	4660 €	3329 €	1997 €
prezzo TopAkustik	130,00 €	3324 €	9971 €	16618 €	23265 €
Totale		9316 €	14631 €	19947 €	25262 €

Tabella 4. 8 – analisi costi delle diverse configurazioni

I valori trovati mostrano come, nonostante la Configurazione 4 sia preferibile rispetto alle altre, i vincoli della nostra analisi ci portano a scegliere la prima combinazione. Si tenga conto che per semplicità e rapidità della valutazione, non è stato tenuto conto del costo di posa dei materiali, il totale così ottenuto è inoltre escluso da iva; a maggior ragione quindi la Configurazione 1 risulta la migliore per le nostre esigenze perché rientra nel Budget di 10000-14000€ a disposizione del committente.

### 3. Distribuzione dei materiali nella palestra

Quantificata l'estensione dei materiali fonoassorbenti da posare nell'ambiente, si passa ora ad analizzare dettagliatamente la disposizione degli stessi all'interno della palestra:

- parete nord: Mappyfiber nei tratti di superficie tra le vetrate di area 3x3 circa per un totale di 36 m<sup>2</sup> ;



Figura 4. 3 . simulazione della configurazione scelta per la parete nord.

- parete sud: Mappyfiber lungo la fascia immediatamente sotto alle vetrate e adiacente ad esse per un totale di 20 m<sup>2</sup> ;

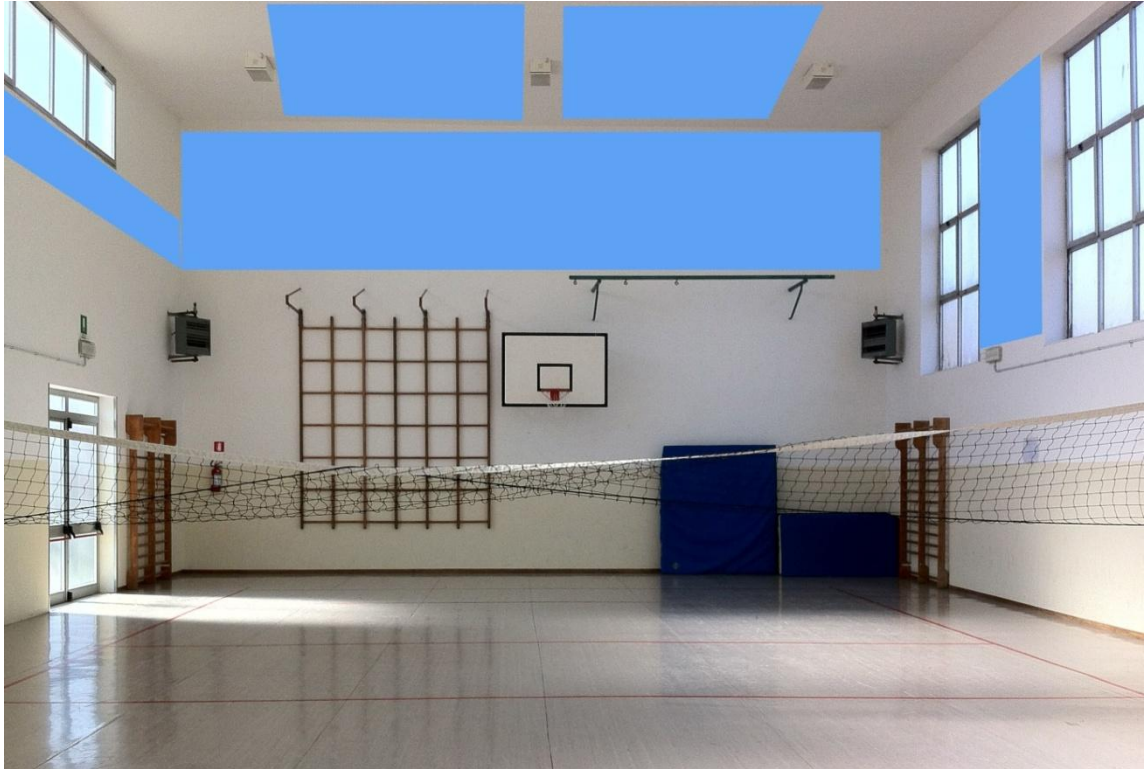


Figura 4. 4 – da sinistra: parete sud, ovest, nord della palestra con la disposizione scelta.

- Pareti ovest-est: Mappyfiber lungo le fasce in alto, aderenti al soffitto, e per tutta la lunghezza della parete per un totale di  $24 + 24 = 48 \text{ m}^2$  ;



Figura 4. 5 – simulazione delle pareti est e sud con il materiale fonoassorbente.

Soffitto: si lascia libera una fascia di 2 metri per parte per il lato corto e 2,5 metri per quello lungo al fine di garantire una l'illuminazione naturale propria dell'ambiente. Si pone il materiale lungo una fascia centrale quindi di  $19 \times 8 = 152 \text{ m}^2$ , dei quali  $26 \text{ m}^2$  per il materiale TopAkustik.

In Tabella si riporta i fogli di calcolo che riassumono la soluzione ottima trovata per il caso in esame con la suddivisione dei materiali lungo le pareti e il tempo di riverberazione così ottenuto.

	Superficie m <sup>2</sup>	Rivestimento	Superficie m <sup>2</sup>	coefficiente di assorbimento acustico					
				frequenza, Hz					
				125	250	500	1000	2000	4000
Parete nord	180	cemento	102,75	0,01	0,01	0,02	0,02	0,03	0,04
		mappyfiber	36,00	0,15	0,45	0,70	0,90	0,90	0,85
		vetrate	41,25	0,35	0,31	0,14	0,06	0,04	0,02
Parete sud	180	cemento	127,72	0,01	0,01	0,02	0,02	0,03	0,04
		mappyfiber	20,00	0,15	0,45	0,70	0,90	0,90	0,85
		vetrate	17,28	0,35	0,31	0,14	0,06	0,04	0,02
		porte antipanico	15,00	0,35	0,31	0,14	0,06	0,04	0,02
Parete est	93	cemento	63,18	0,01	0,01	0,02	0,02	0,03	0,04
		mappyfiber	24,00	0,15	0,45	0,70	0,90	0,90	0,85
		porte	5,82	0,26	0,19	0,13	0,04	0,05	0,06
Parete ovest	93	cemento	69,00	0,01	0,01	0,02	0,02	0,03	0,04
		mappyfiber	24,00	0,15	0,45	0,70	0,90	0,90	0,85
Soffitto	297,6	cemento	145,60	0,01	0,01	0,02	0,02	0,03	0,04
		mappyfiber	126,00	0,15	0,45	0,70	0,90	0,90	0,85
		TopAkustik	26,00	0,33	0,77	0,90	0,88	0,74	0,59
Pavimento	297,6	linoleum	297,60	0,02	0,02	0,02	0,01	0,02	0,02

	Superficie, m <sup>2</sup>	Rivestimento	Superficie, m <sup>2</sup>	potere fonoassorbente m <sup>2</sup>					
				frequenza, Hz					
				125	250	500	1000	2000	4000
Parete nord	180	cemento	102,75	0,95	0,90	1,59	2,41	2,75	4,23
		mappyfiber	36	5,40	16,20	25,20	32,40	32,40	30,60
		vetrate	41,25	14,46	12,70	5,75	2,32	1,54	0,97
Parete sud	180	cemento	127,72	1,18	1,12	1,98	3,00	3,41	5,25
		mappyfiber	20	3,00	9,00	14,00	18,00	18,00	17,00
		vetrate	17,28	6,06	5,32	2,41	0,97	0,65	0,41
		porte antipanico	15	5,26	4,62	2,09	0,85	0,56	0,35
Parete est	93	cemento	63,18	0,58	0,56	0,98	1,48	1,69	2,60
		mappyfiber	24	3,60	10,80	16,80	21,60	21,60	20,40
		porte	5,82	1,50	1,13	0,77	0,25	0,31	0,38
Parete ovest	93	cemento	69	0,64	0,61	1,07	1,62	1,84	2,84
		mappyfiber	24	3,60	10,80	16,80	21,60	21,60	20,40
Soffitto	297,6	cemento	145,6	1,34	1,28	2,25	3,42	3,89	5,99
		mappyfiber	126	18,90	56,70	88,20	113,40	113,40	107,10
		TopAkustik	26	8,58	20,02	23,40	22,88	19,24	15,34
Pavimento	297,6	linoleum	297,6	5,49	5,24	6,91	4,19	6,36	6,99

Tabella 4. 9 – Foglio di calcolo dettagliato dell'assorbimento acustico della palestra con la soluzione in studio

	frequenza, Hz					
	125	250	500	1000	2000	4000
potere fonoassorbente A, m <sup>2</sup>	81	157	210	250	249	241
coefficiente di fonoassorbimento medio, $\alpha_m$	0,07	0,14	0,18	0,22	0,22	0,21
tempo di riverberazione T , Eyring	4,16	2,06	1,47	1,17	1,09	0,91

Tabella 4. 10 – tempo di riverberazione ottenuto con la soluzione scelta.



I calcoli svolti non tengono conto della presenza degli alunni all'interno dell'ambiente. Le persone infatti hanno un coefficiente di assorbimento acustico che va tenuto in considerazione nell'analisi. In Tabella 4.11 sono riportati i valori di fonoassorbimento in metri quadri da attribuire ad una persona.

	frequenza, Hz					
	125	250	500	1000	2000	4000
Persone	0,15	0,30	0,50	0,55	0,60	0,50

Tabella 4. 11 – coefficienti assorbimento per persona in metri quadrati.

Supponendo la presenza di una classe di 25 studenti all'interno della palestra, si calcola il potere fonoassorbente dell'ambiente e il suo tempo di riverberazione, di cui si riporta il foglio di calcolo in Tabella 4.12.

	Superficie m <sup>2</sup>	Rivestimento	Superficie m <sup>2</sup>	potere fonoassorbente m <sup>2</sup>					
				frequenza, Hz					
				125	250	500	1000	2000	4000
Parete nord	180	cemento	102,75	0,95	0,90	1,59	2,41	2,75	4,23
		mappyfiber	36	5,40	16,20	25,20	32,40	32,40	30,60
		vetrate	41,25	14,46	12,70	5,75	2,32	1,54	0,97
Parete sud	180	cemento	127,72	1,18	1,12	1,98	3,00	3,41	5,25
		mappyfiber	20	3,00	9,00	14,00	18,00	18,00	17,00
		vetrate	17,28	6,06	5,32	2,41	0,97	0,65	0,41
		porte antipanico	15	5,26	4,62	2,09	0,85	0,56	0,35
Parete est	93	cemento	63,18	0,58	0,56	0,98	1,48	1,69	2,60
		mappyfiber	24	3,60	10,80	16,80	21,60	21,60	20,40
		porte	5,82	1,50	1,13	0,77	0,25	0,31	0,38
Parete ovest	93	cemento	69	0,64	0,61	1,07	1,62	1,84	2,84
		mappyfiber	24	3,60	10,80	16,80	21,60	21,60	20,40

Soffitto	297,6	cemento	145,6	1,34	1,28	2,25	3,42	3,89	5,99
		mappyfiber	126	18,90	56,70	88,20	113,4	113,4	107,1
		TopAkustik	26	8,58	20,02	23,40	22,88	19,24	15,34
Pavimento	297,6	linoleum	297,6	5,49	5,24	6,91	4,19	6,36	6,99
Persone			25	3,75	7,50	12,50	13,75	15,00	12,50

	frequenza, Hz					
	125	250	500	1000	2000	4000
potere fonoassorbente A, m <sup>2</sup>	84	164	223	264	264	253
coefficiente di fonoassorbimento medio, $\alpha_m$	0,07	0,14	0,20	0,23	0,23	0,22
tempo di riverberazione T , Eyring	3,97	1,96	1,38	1,11	1,03	0,87

Tabella 4. 12 – calcolo dettagliato del tempo di riverberazione con la presenza di alunni nella palestra.

## CAPITOLO 5

### Conclusioni

Il valore del tempo di riverberazione della palestra in esame rende problematico ogni attività che richieda l'uso del parlato. I valori del tempo di riverberazione eccedono i valori richiesti dalla normativa in vigore su tutte le frequenze dell'udibile.



Figura 5. 1 – da sinistra: parete sud, ovest, nord della palestra allo stato attuale.

Gli interventi indicati nell'analisi effettuata intervengono in maniera adeguata alla soluzione del caso in oggetto; sono stati previsti sia rivestimenti particolarmente efficaci

alle basse frequenze (TopAkustik installato a parete con intercapedine) sia elementi adeguati alle medio-alte frequenze (Mappyfiber piano in adesione). Si è cercato di distribuire in maniera adeguata i materiali all'interno della palestra (come riportato nel par. 3, Cap.4) cercando coprire tutte le pareti dell'edificio creando un assorbimento più omogeneo.

Si è tenuto in considerazione anche la presenza di alunni nell'ambiente (ipotizzando una classe di 25 studenti) che hanno un potere fonoassorbente da non trascurare.

La criticità del caso in esame è stata determinata principalmente dai vincoli tecnici ed economici posti dal committente: in primo luogo deve rimanere invariata la funzione ludico-sportiva dell'ambiente, per cui la soluzione ricercata ha l'obbligo di non interferire con le attività che si svolgono all'interno della palestra; inoltre il budget limitato del Comune di Vescovana obbliga a osservare un compromesso tra efficienza e costo dei materiali.

Nel complesso la soluzione trovata si può considerare soddisfacente, infatti i requisiti imposti dal committente sono stati rispettati e si è raggiunto il livello di tempo di riverberazione richiesto dalla Circolare n. 3150 per quanto concerne le palestre di edifici scolastici.

# APPENDICE 1

## La misura del tempo di riverberazione

Per la misura del tempo di riverberazione nella palestra sono state effettuate due serie di misure in punti diversi della struttura, indicati con le lettere  $S_1$  e  $S_2$ . Per entrambe le posizioni, il tempo di riverberazione è stato misurato in 6 punti diversi dell'ambiente, in corrispondenza degli angoli del campo di pallavolo e del suo centro ( Figura A1.1 , A1.2 ).

Il microfono è stato posto ad una altezza di 1,5 m ( Figura A1. 2 ); per ogni posizione sono stati rilevati due decadimenti della coda sonora ed è stata presa la loro media.



Figura A1. 1 – palestra allo stato attuale durante le misure.



Figura A1. 2 – posizionamento del microfono durante in montaggio della strumentazione.

Le misure raccolte sono state in seguito elaborate con il software Qualifier 7830, con il quale sono stati modificati alcuni valori di banda e analizzati in dettaglio i dati in oggetto ( Figura A1. 3 ).

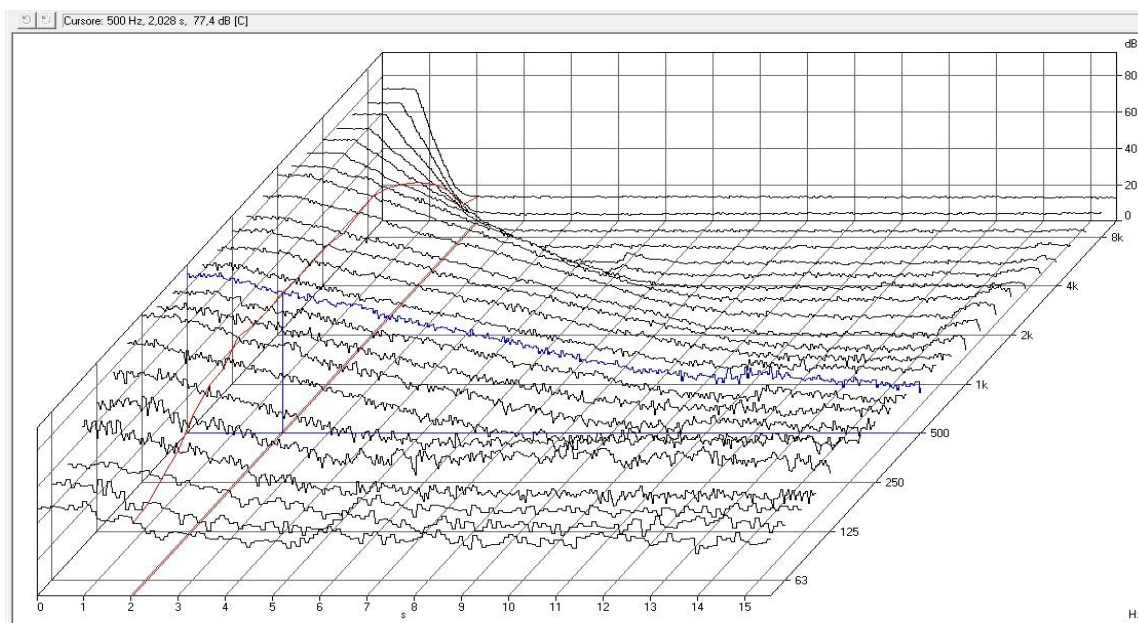


Figura A1. 3 – grafico di decadimento sonoro in 3 dimensioni: tempo – frequenze – dB.

La misura è avvenuta con risoluzione spettrale per cui i tempi raccolti sono espressi in banda di terzo d'ottava. Nell'analisi effettuata sono stati convertiti in banda d'ottava per renderli confrontabili con il modello numerico.

## 1.Strumentazione

- Fonometro : Brüel & Kjær Investigator 2260 – numero di serie 2168644
- Microfono: Brüel & Kjær 4189 – numero di serie 2143263
- Calibratore: Brüel & Kjær 4231
- Sorgente sonora: Brüel & Kjær 4196 dodecaedrica
- Amplificatore di potenza: Brüel & Kjær 2716

Fonometro e microfono conformi con:

- CEI 60651 (1979) Classe 1 più emendamento 1
- CEI 60804 (1985) Classe 1 più emendamento 2
- CEI 61260 (1995) Bande di ottava e 1/3 di ottava, Classe 0

Calibratore conforme con:

- CEI 942 (1988) Classe 1

Certificato di taratura 04.0501-C del 15/06/2004 del centro SIT 71/E

## APPENDICE 2

### Fornitura dei materiali

Si riportano di seguito i fornitori individuati per le soluzioni proposte.

#### 1. Mappyfiber

Fornitore: Mappy Italia SPA, Via Tevere, 3 - 20020 Cesate (Milano) – Italy Tel. +39 02 99431100 - Fax +39 02 99069773 info@mappyitalia.com - [www.mappyitalia.com](http://www.mappyitalia.com).

Proposte del Fornitore:

- Mappyfiber Piano in adesione:

Formati	Prezzo
600 x 600mm x 40mm	€26,20/mq
1200 x 600mm x 40mm	€26,04/mq

- Mappyfiber Bombato:

Formati	Prezzo
600 x 600mm x 30mm	€29,07/mq
1200 x 600mm x 30mm	€29,79/mq

- Mappyfiber Wool Piano

Formati	Prezzo
600 x 600mm x 40mm	€51,34/mq
1200 x 600mm x 40mm	€52,09/mq

- Mappycubic

Formati	Prezzo
50 x 50 x 50cm	€90,42/cad
25 x 25 x 25cm	€70,10/cad



La scelta è ricaduta su Mappyfiber Piano in adesione, per la sua semplicità, efficienza e minor costo. Mappyfiber è un pannello modulare fonoassorbente e termoisolante realizzato in fibra di poliestere 100%, marcato CE e in Classe 1, F1.

Questo materiale è eccellente per spazi pubblici nei quali l'attenzione alle norme di sicurezza impongono l'utilizzo di prodotti di alta qualità, compresi ambienti con alta presenza di umidità, senza però limitare le esigenze di tipo estetico come: asili, scuole, aule ricreative in genere, sale musica, studi di registrazione, teatri, sale cinematografiche, discoteche, sale da ballo, pub, uffici, sale conferenze, mense, palestre, negozi, piscine.

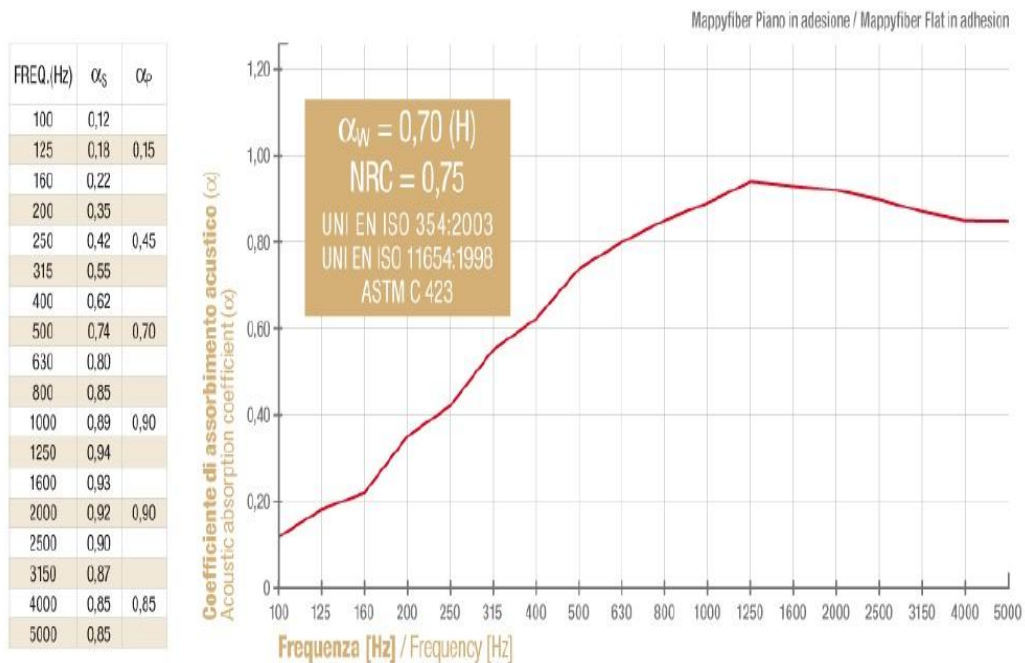


Figura A2. 1 – coefficienti di assorbimento Mappyfiber Piano in adesione.

MAPPYFIBER	NORME SPECIFICATIONS	VALORI VALUES
BASE POLIMERICA POLYMER BASE		POLIESTERE POLYESTER
COLORE COLOUR		SU RICHIESTA UPON REQUEST
DENSITÀ DENSITY		50 kg/m <sup>3</sup> ± 10% (PIANO/FLAT) 3.1 lb/ft <sup>3</sup> ± 10% (PIANO/FLAT) 66 kg/m <sup>3</sup> ± 10% (BOMBATO/CURVED) 4.1 lb/ft <sup>3</sup> ± 10% (BOMBATO/CURVED)
TEMPERATURA DI ESERCIZIO TEMPERATURE RANGE		-50 +100 °C -58 +212 °F
REAZIONE AL FUOCO REACTION TO FIRE	UNI 9177:1987 EN 13501-1:2007 ASTM E 84 AS 1530-3 BS 476-7	CLASSE 1 CLASS 1 EUROCLASSE B s1 d0 EUROCLASS B s1 d0 CLASSE A (INDICAZIONE DA LETTERATURA) CLASS A (LITERATURE INDICATION) PASSA TUTTE LE CATEGORIE (INDICAZIONE DA LETTERATURA) PASS ALL CATEGORIES (LITERATURE INDICATION) CLASSE 1 (INDICAZIONE DA LETTERATURA) CLASS 1(LITERATURE INDICATION)
CLASSE DI FUMOSITÀ SMOKE INDEX	NF F16-101:1988	F1
CONDUTTIVITÀ TERMICA λ, K THERMAL CONDUCTIVITY λ, K-FACTOR	EN 12667:2001 EN 12664:2001	0.0341 W/mK 0.2364 Btu in/hr ft <sup>2</sup> °F
CERTIFICAZIONI CERTIFICATIONS		MARCHIO CE CE MARKING

Figura A2. 2 – caratteristiche tecniche Mappyfiber Piano in adesione.

Condizioni di Vendita:

Pagamento: da concordare.

Trasporto: 5% valore ordine oppure 50€ per imponenti inferiori a 1000€.

Consegna: 10gg lavorativi salvo il meglio.

## 2.TopAkustik

Fornitore: Patt Srl Via Udine 40 33040 Attimis / Udine

Italy Ph.+ 39 0432 796411 Fax + 39 0432 796400

e-mail: [topakustik@patt-srl.it](mailto:topakustik@patt-srl.it)

Le lamelle TopAkustik sono proposte in diverse tipologie estetiche determinate dalle dimensione delle fresature e dalla loro distanza reciproca sulla superficie visibile, e dalle distinte geometrie di perforazione del retro. A ciascuna tipologia corrispondono precise caratteristiche di fonoassorbenza.

Materiale di supporto:	MDF 16 mm E1 massa volumica 760 Kg/m <sup>3</sup>  MDF 16 mm FR (ignifugo classe I)
Superficie visibile:	Rivestimento melaminico di nobilitazione Bianco 0118 Acerò 1681 Faggio 2018 Alluminio 6265 Ulteriori decorativi secondo mazzetta
Superficie posteriore:	TNT nero, accoppiato
Lunghezza lamelle:	4061 mm
Larghezza lamelle:	128 mm
Tolleranze:	larghezza = 0.1 mm / lunghezza = +/- 2 mm
Lati lunghi:	con unione a incastro maschio - femmina
Lati corti:	taglio di testa a squadra (90°)

Figura A2. 3 – caratteristiche comune alle tipologie di configurazione TopAkustik

Materiale scelto: TopAkustik 28/4.

Descrizione: lamelle perforate in MDF ricavate da pannelli di peso contenuto, retro con tessuto fonoassorbente, applicate su struttura con intercapedine di 170 mm. Classe 1 di reazione al fuoco.

Misurazione  
in camera riverberante  
*Measurements  
in reverberation chamber*

riferimento / *reference:*  
volume / *volume:*  
temperatura / *temperature:*  
umidità dell'aria / *air humidity:*  
superficie rivestita / *area covered:*

ITA 19.12.1994  
218 m<sup>3</sup>  
13°  
80%  
10m<sup>2</sup>

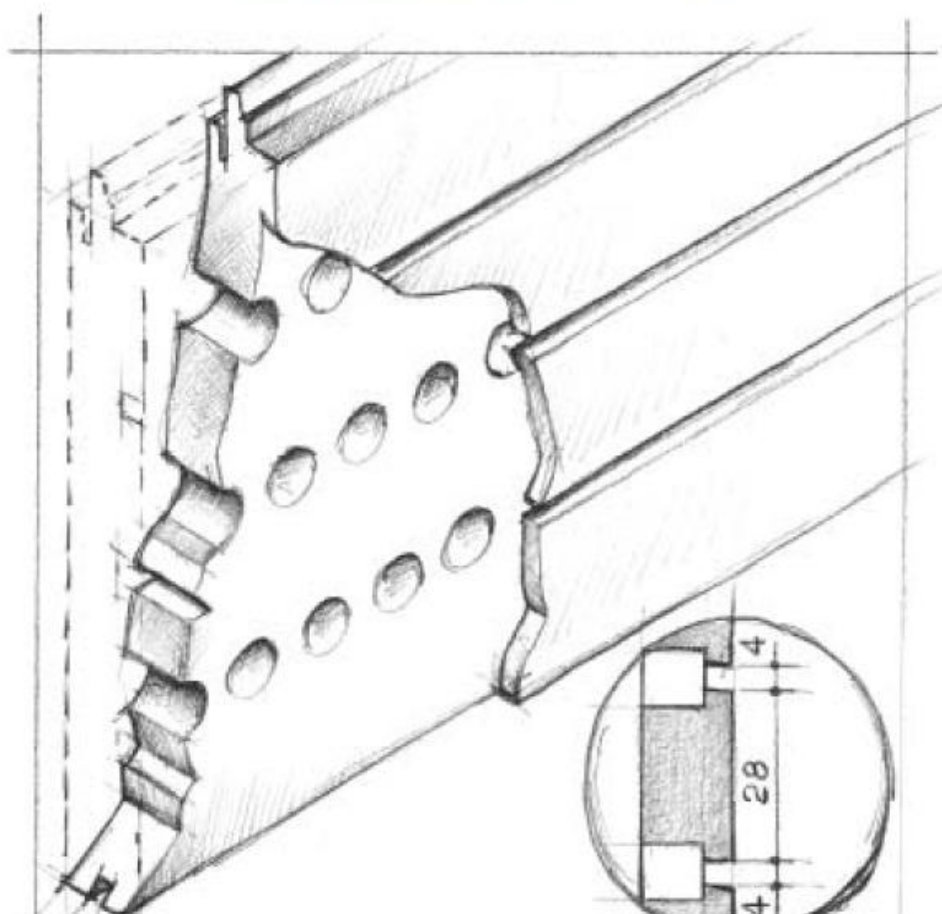
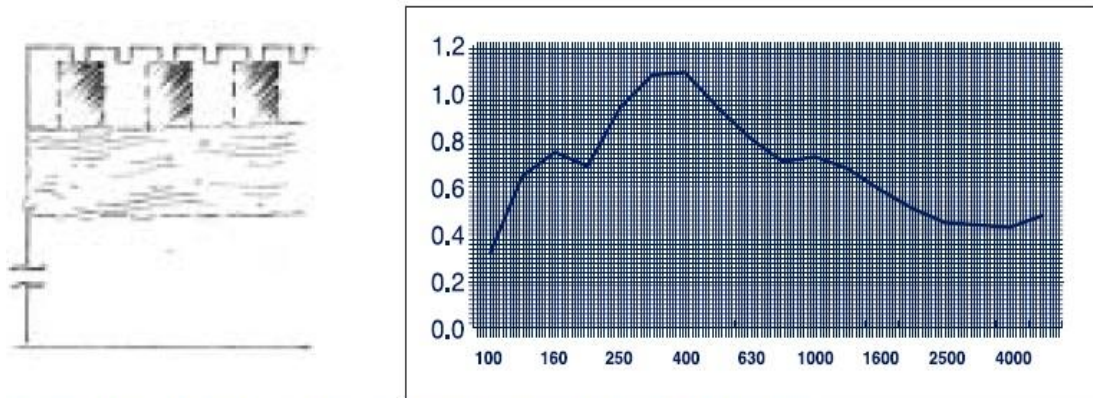


Figura A2. 4 – caratteristiche TopAkustik 28/4.

Grado di assorbenza secondo ISO 354:



**Spazio libero / Free Space 170 mm lana di roccia / Mineral Wool 30 mm**

Basse frequenze / Low frequency (100-315 Hz): 0.74  
 Medie frequenze / Medium frequency (400-1250 Hz): 0.83  
 Alte frequenze / High frequency (1600-5000 Hz): 0.48

Figura A2. 5 – grafico assorbimento TopAkustik 28/4.

Freq. (Hz)	Risultato / Result
100	0.32
125	0.65
160	0.75
200	0.69
250	0.94
315	1.08
400	1.09
500	0.94
630	0.81
800	0.71
1000	0.73
1250	0.68
1600	0.59
2000	0.51
2500	0.45
3150	0.44
4000	0.43
5000	0.48

Figura A2. 6 – coefficiente di assorbimento indicato dal fornitore per TopAkustik 28/4 con intercapedine 170mm.

