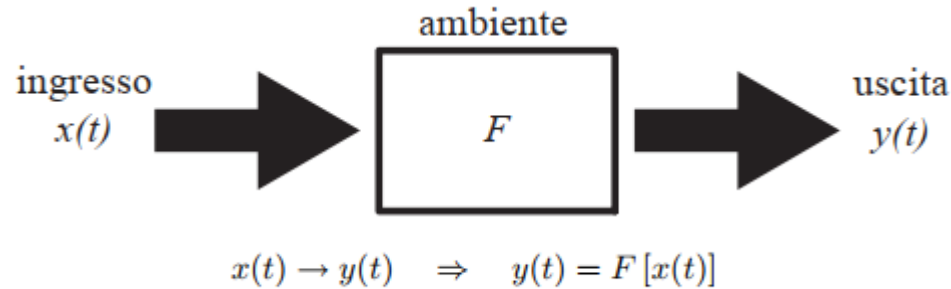


Schema di misura della risposta all'impulso

Un **ambiente acustico** può essere schematizzato come una “scatola nera”, ossia un apparato che trasforma un segnale in ingresso $x(t)$ in uno di uscita $y(t)$, con una legge di trasferimento particolare



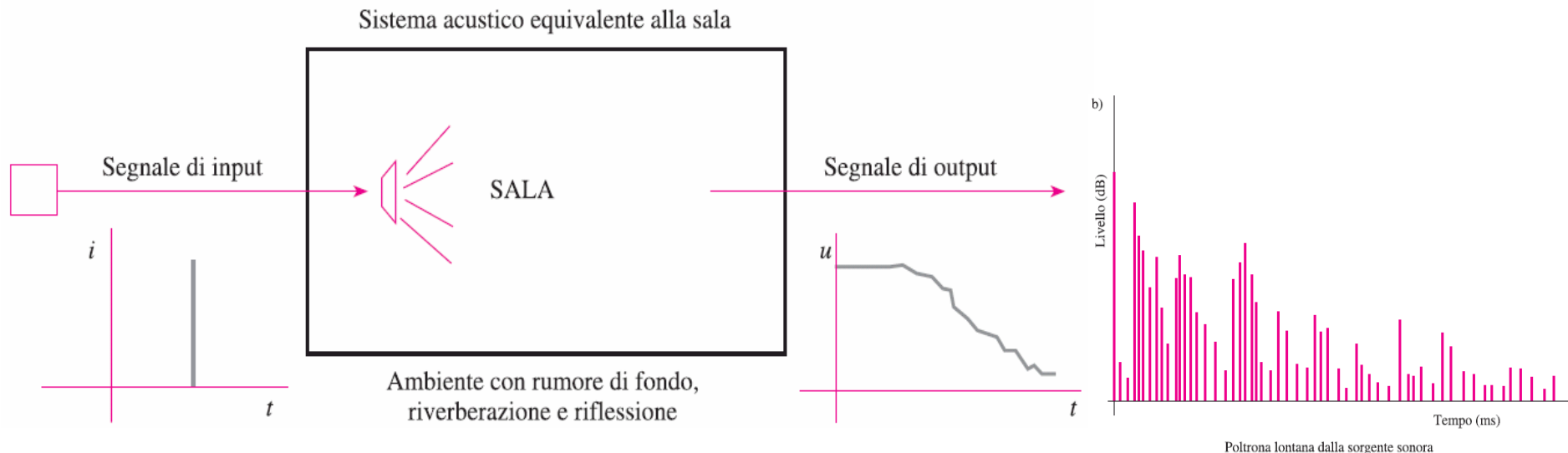
Si presuppone che il sistema sia:

- **Lineare**: vale il principio di sovrapposizione.

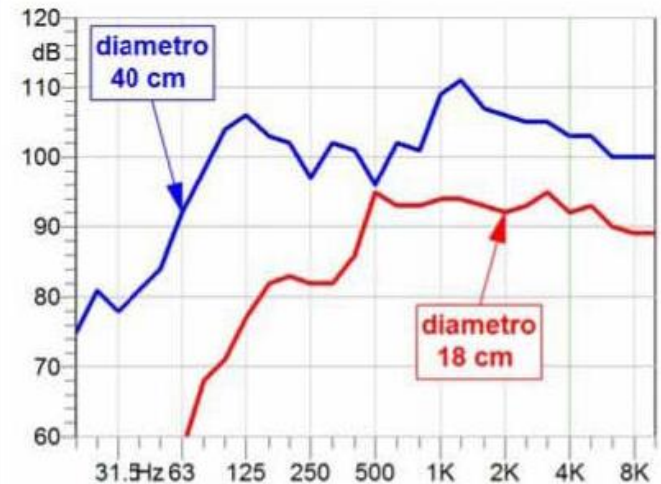
$$x(t) + z(t) \rightarrow y(t) \Rightarrow y(t) = F[x(t) + z(t)] = F[x(t)] + F[z(t)]$$

- **Tempo invariante**

$$x(t) \rightarrow y(t) \Rightarrow x(t - t_0) \rightarrow y(t - t_0)$$



In campo digitale, l'utilizzo di una sequenza $\{\delta\}$ come impulso sarebbe il metodo più semplice per estrarre la funzione di trasferimento di un sistema; tuttavia, quando si passa alla pratica insorgono problemi fisici. Il principale inconveniente che si manifesta nelle misure acustiche usando una sequenza ad impulso come la $\{\delta\}$ è legato all'impossibilità, per qualsiasi altoparlante, di riprodurre un segnale impulsivo brevissimo. **QUINDI UNA SOLUZIONE E'**: utilizzare palloncini esplosivi o spari di pistola a salve o il clappatore.



Impulsive

Fast
Cheap
Intuitive
Random
Interactive

Poor S/N
Uneven spectrum
Prone to clipping
Requires an assistant
Alarming to bystanders!



**Il diametro dei palloncini
influenza la risposta alle basse
frequenze**

Sebbene questo metodo possa tornare buone misure per i tempi di riverberazione di una sala da concerto, queste non sono ripetibili, né abbastanza accurate per ottenere gli IR (IMPULSE RESPONSE) da usare per la correzione acustica



*Tavole di legno incernierate
Clappatore*



Risposta in frequenza. Solo legno e legno + gomma

Electroacoustic “Omni”

Excellent S/N
Equalizable
Good repeatability
Looks cool

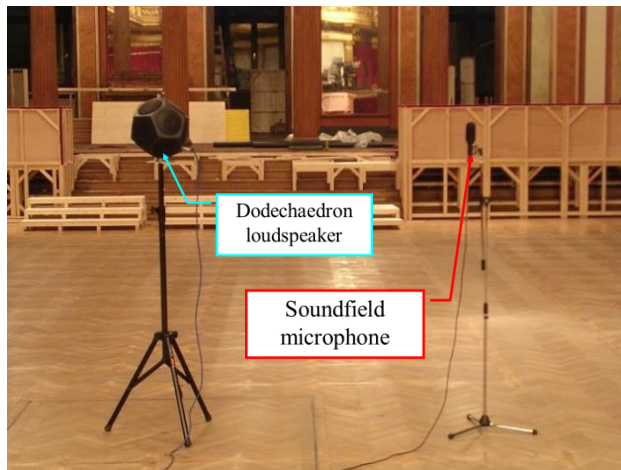
Not omni at HF
Not full range
Power challenged (some models)



MISURA DELLA RISPOSTA ALL'IMPULSO CON SINE-SWEEP

La tecnica che prevede l'utilizzo del *sine-sweep*, ovvero un segnale sinusoidale a frequenza variabile, è la più efficiente per il calcolo degli IR

I *sine-sweep* possono essere lineari (la cui frequenza parte da 20 Hz e cresce linearmente col tempo fino a 20 kHz) oppure esponenziali (i più usati, perché con questi è possibile dare più energia alle frequenze più basse, che sono anche le più critiche, ed andare più velocemente alle alte)



sweep lineare
$$x(t) = \sin \left[2\pi \left(f_{inf} \cdot t + \frac{f_{sup} - f_{inf}}{T} \cdot \frac{t^2}{2} \right) \right]$$

sweep esponenziale
$$x(t) = \sin \left[\frac{2\pi f_{inf} \cdot T}{\ln \left(\frac{f_{sup}}{f_{inf}} \right)} \cdot \left(e^{\frac{t}{T} \cdot \ln \left(\frac{f_{sup}}{f_{inf}} \right)} - 1 \right) \right]$$

dove f_{inf} è la frequenza di partenza (tipicamente 20 Hz), f_{sup} è quella di arrivo (tipicamente 20 kHz) e T è la durata nel tempo dello *sweep* (tipicamente 10 ÷ 50 s). I *sine-sweep* sono, per diverse ragioni più efficienti per le misure della funzione di trasferimento in acustica ambientale soprattutto perché la risposta ad un singolo *sweep* non ripetuto è pressoché uguale a quella che si ha con una ripetizione periodica, quindi durata misura inferiore.

APPLICAZIONE DELLA TEORIA DEI Sistemi, NEL CASO DI UN SISTEMA Acustico (determinazione della RISPOSTA IN FREQUENZA)

L'ACUSTICA AMBIENTALE è la scienza che studia la propagazione del suono in locali chiusi o comunque in presenza di oggetti capaci di causare effetti significativi di assorbimento e riflessione.

Il SUONO è il risultato di una perturbazione ondulatoria (pressione acustica p definita come lo scostamento della pressione attorno al suo valore di equilibrio, rappresentato generalmente dalla pressione atmosferica) che viene generata e si propaga in aria, interagendo con i confini dell'ambiente e gli oggetti in esso contenuti

- La *sensazione uditiva* è legata in misura essenziale alle caratteristiche dell'ambiente.

AD ESEMPIO: UNA sala conferenze contiene 1200 poltroncine imbottite ed uno schermo per proiezione da $16 \times 8 \text{ m}^2$. Inoltre ha:

- ✓ pavimento in parquet
- ✓ pareti e soffitto intonacati con malta di cemento
- ✓ porte d'uscita da $1,8 \times 2,5 \text{ m}^2$ protette da tende pesanti con pieghe
- ✓ tavolo conferenze in legno con superficie esterna di 12 m^2

I PARAMETRI di qualità comunemente usati nella progettazione e correzione di ambienti acusticamente efficienti (**APPLICANDO LA TEORIA DEI SISTEMI !!!**) sono legati alla riverberazione

(*Reverberation Time* **RT60**, *Early Decay Time* **EDT**) e a criteri

energetici (*Clarity* **C50**, **C80**, *Definition* **D50** e **ST1**). A

questi si aggiungono, per le applicazioni che lo richiedano, i parametri di intelligibilità del parlato: *Speech Transmission Index*

STI, *Rapid Speech Transmission Index* **RASTI**)

SPECIFICHE DI PROGETTO DELLA SALA:

AVERE UN RT60 di circa 1.2 s !!!

Campo sonoro

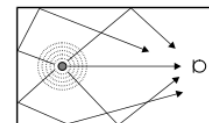
Campo libero o anecoico

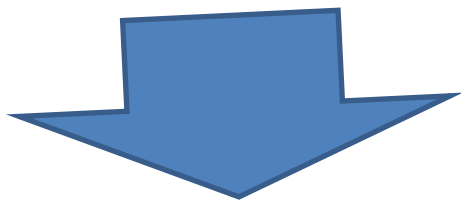


Campo semianecoico



Campo riflesso o riverberante





COSE DA SAPERE NEL CASO DI UN AMBIENTE ACUSTICO.

Requisiti essenziali di un ambiente destinato all'ascolto di parole o musica sono i seguenti:

- buon livello sonoro: almeno 45 dB;
- presenza dell'effetto Haas (prime riflessioni percepite entro 35 ms dal suono diretto);
- assenza di difetti acustici (eco, flutter, ecc.);
- assenza di distorsione o sbilanciamento tonale (causato da assorbimenti di entità diversa nelle diverse bande dello spettro sonoro);
- omogenea distribuzione spaziale del suono;
- tempo di riverberazione vicino a quello ottimale per la specifica destinazione d'uso del locale o in ogni caso inferiore ad esso;
- limitato rumore di fondo.

ALTRI EFFETTI DELLA RIFLESSIONE NEGLI AMBIENTI

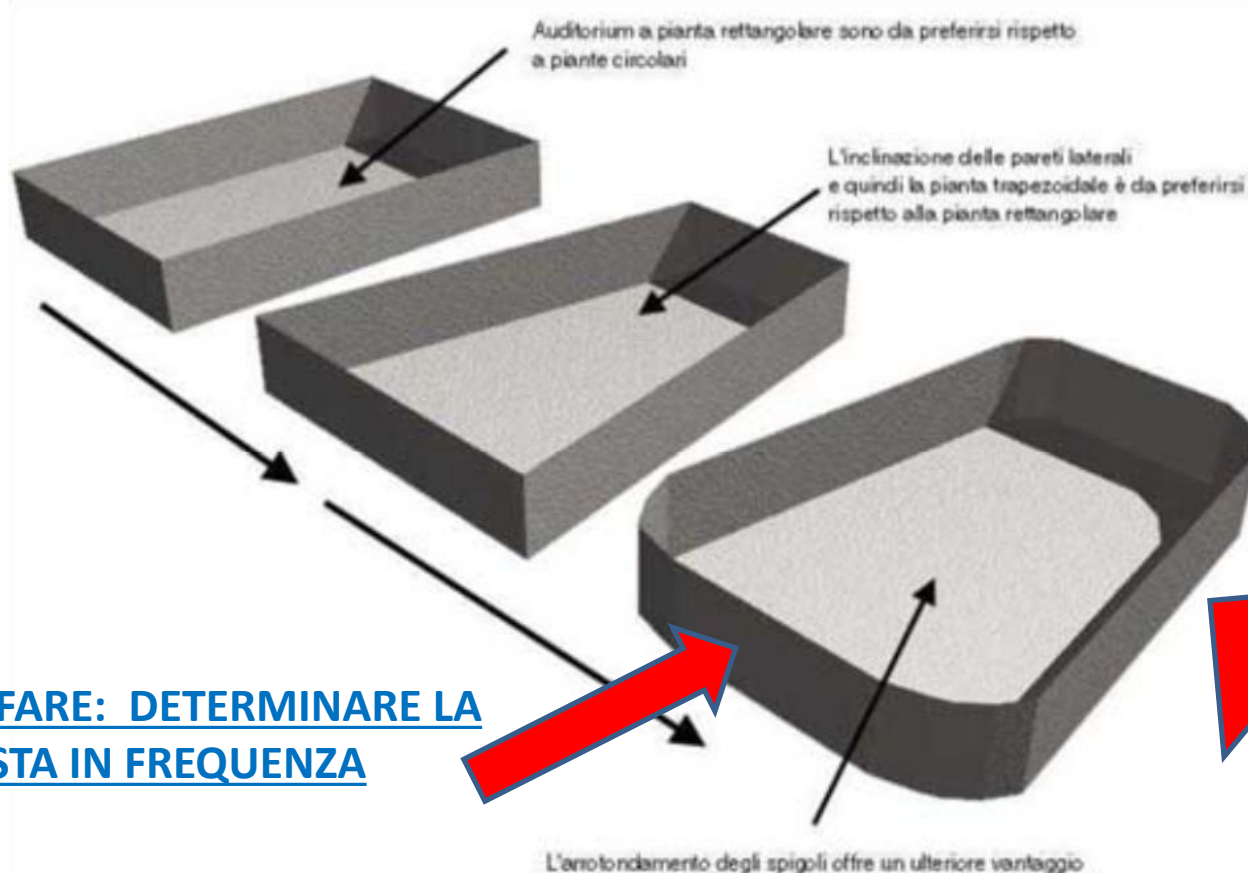
(ESEMPIO PRATICO DI ACUSTICA AMBIENTALE)

- Le riflessioni che arrivano all'orecchio fino a **20-25 ms** dopo il suono diretto potenziano il segnale.
- Le riflessioni che arrivano all'orecchio intorno ai **25-30ms** dopo il suono diretto sono responsabili del cosiddetto **effetto Haas**. Si avverte un unico suono e si ha l'impressione che la direzione della sorgente sia quella da cui arriva il suono riflesso.
- Tra i **50 e 100 ms** di ritardo si parla di **near-eco**, ossia i due suoni si sovrappongono, ma si percepisce una coda sonora quasi separata

RISONANZA ... (ESEMPIO PRATICO DI ACUSTICA AMBIENTALE)

In presenza di pareti solide, riflettenti, parallele tra loro che producono sorgenti secondarie emittenti sulle stesse frequenze d'onda esistono particolari frequenze per le quali l'onda riflessa da una delle pareti si somma esattamente in fase a quella riflessa dall'altra

L'effetto macroscopico è quello di avere una grande difformità del campo sonoro con punti con elevato livello sonoro e punti con basso livello corrispondenti alle interferenze costruttive e distruttive



1° COSA DA FARE: DETERMINARE LA RISPOSTA IN FREQUENZA

GRANDEZZE ACUSTICHE DI RILIEVO IN ACUSTICA AMBIENTALE

$$p_{eff} = \sqrt{\frac{1}{T} \int_0^T p^2(t) dt}$$

Valore quadratico medio della pressione acustica
(spesso espresso in dB SPL) in un dato punto

L'**intensità acustica** I è definita come l'energia che nell'unità di tempo attraversa in direzione normale un'unità di superficie

$$I = \frac{p_{eff}^2}{\rho \cdot c}$$

dove ρ è la densità del mezzo e c la velocità del suono nel mezzo

La **densità di energia sonora** D è definita come l'energia acustica per unità di volume che caratterizza lo stato del mezzo acustico in un certo istante

$$D(t) = \frac{E(t)}{V}$$

Software DA UTILIZZARSI in ACUSTICA degli SPAZI CHIUSI (GRATUITI), (ESEMPIO

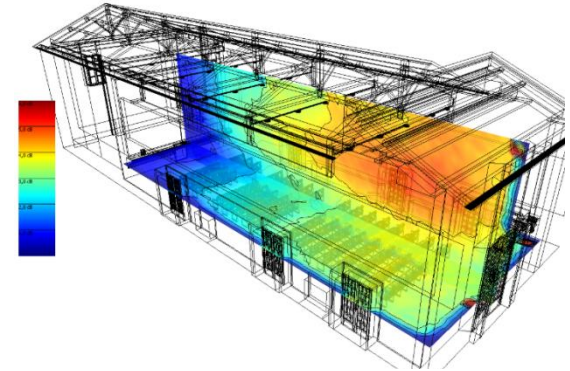
PRATICO DI ACUSTICA AMBIENTALE) I-SIMPA

«SIMULAZIONE PROPAGAZIONE
SUONO NEGLI SPAZI CHIUSI»

strumentazione NECESSARIA:



- Fonometro + calibratore
- Oppure microfono USB calibrato tipo Mini DSP UMIK 1 con asta

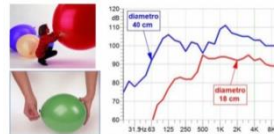


REW

«STUDIO CARATTERISTICHE ACUSTICHE
DEGLI SPAZI CHIUSI; Funzione risposta impulsiva
ecc.»

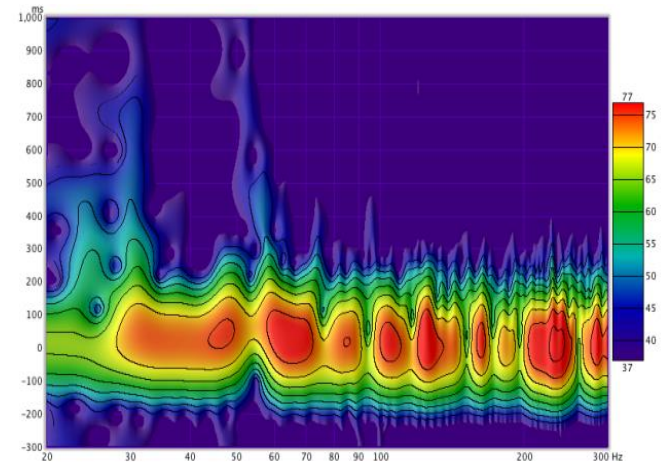
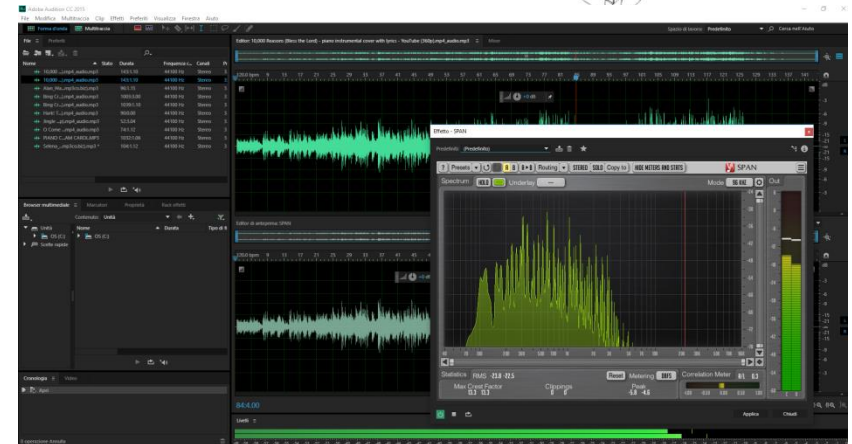
strumentazione NECESSARIA:

- Fonometro + calibratore

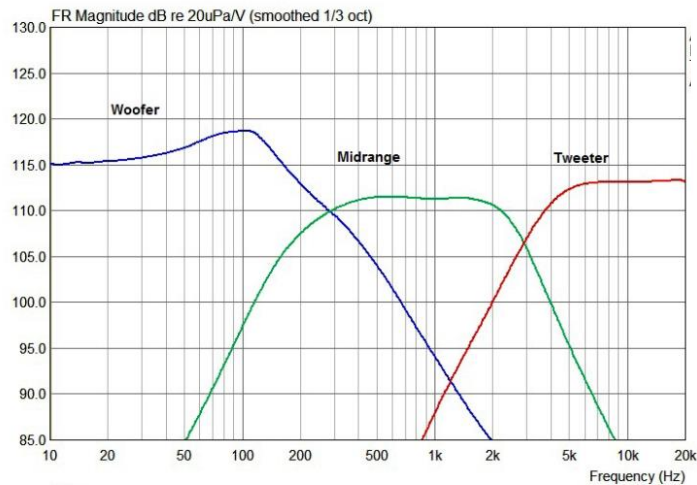


- Materiale Vario

- Oppure microfono USB calibrato tipo Mini DSP UMIK 1 con asta
- Dodecaedro



RISPOSTA IN FREQUENZA di: woofer, midrange, tweeter



Woofer.



tola.



Mid-range



Subwoofer.

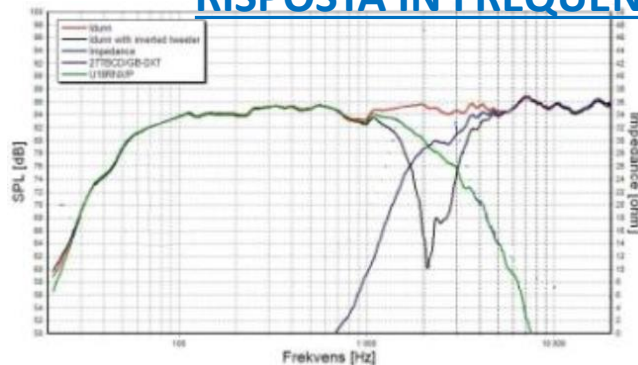
riprodurre suoni sotto i 20 Hz

woofer: specializzati nella riproduzione di suoni di bassa frequenza, dal limite inferiore della banda udibile (20 Hz) fino a frequenze di poche centinaia di hertz

mid-range: specializzati nella riproduzione di suoni di media frequenza, da qualche centinaia di hertz fino a un limite superiore di poche migliaia di hertz

tweeter: specializzati nella riproduzione di suoni di alta frequenza, da poche migliaia di hertz fino al limite superiore della banda udibile (20 kHz)

RISPOSTA IN FREQUENZA di un DIFFUSORE A 3 VIE

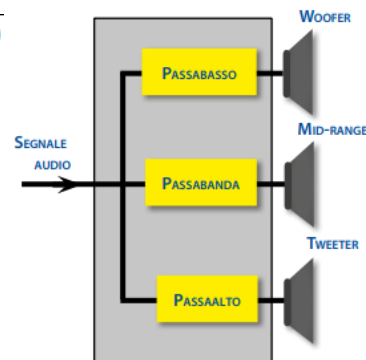
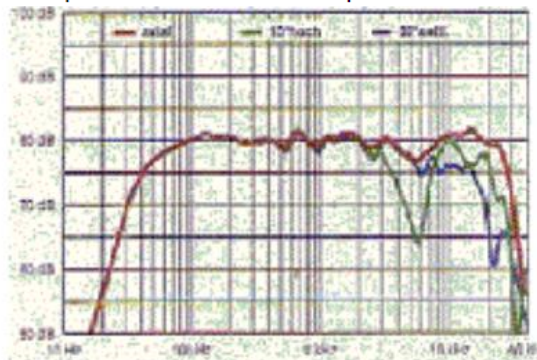


Misure di risposta in frequenza in camera anecoica:

solo woofer	Verde
solo tweeter	Blu
woofer + tweeter in fase	Rosso
woofer - tweeter	Nero

La sovrapposizione di woofer e tweeter comporta un aumento di livello di 6 dB (quando sono in fase) mentre produce un profondo buco (di oltre 20 dB) quando sono in contofase.

Risposta in frequenza del diffusore Opera mod. Callas (del 2009)



Crossover a tre vie.

La sensibilità può essere definita come il valore del livello del valore efficace della pressione sonora emessa da un'unità a seguito dell'applicazione ai suoi morsetti di un segnale sinusoidale con potenza pari a 1 W e a 1000 Hz.

Di norma, la sensibilità viene espressa in dB_{SPL} (Sound Pressure Level) utilizzando come livello di riferimento un valore di pressione sonora standard (20 μPa).



Unità
retroscermo
a tre vie.

SISTEMI DI DIFFUSIONE E TRATTAMENTO ACUSTICO

I componenti tecnici per agire sulla propagazione delle onde sonore sono di vario tipo, ma generalmente si possono distinguere in tre categorie:

- diffusori (piani, curvi, di Schröder)
- bass trap
- DAAD

I diffusori sono componenti acustici basati generalmente sulle leggi fisiche della riflessione delle onde e hanno lo scopo di diffondere il suono in determinate direzioni contribuendo all'aumento della qualità complessiva della stanza.

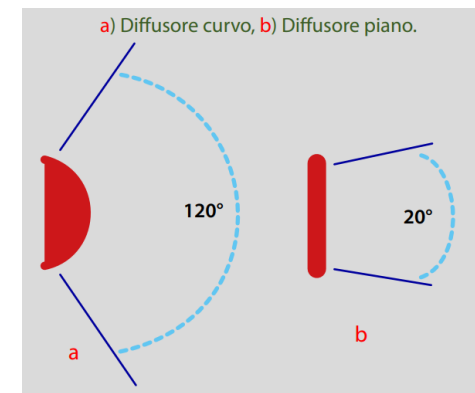
✓ *diffusore di Schröder*



sono sistemi acustici passivi cioè, non contengono sistemi di altoparlanti.
molto efficienti, costituiti da superfici sagomate "a greca" con una profondità proporzionale alla lunghezza d'onda di progetto

✓ *diffusori piani*

✓ *diffusori curvi*

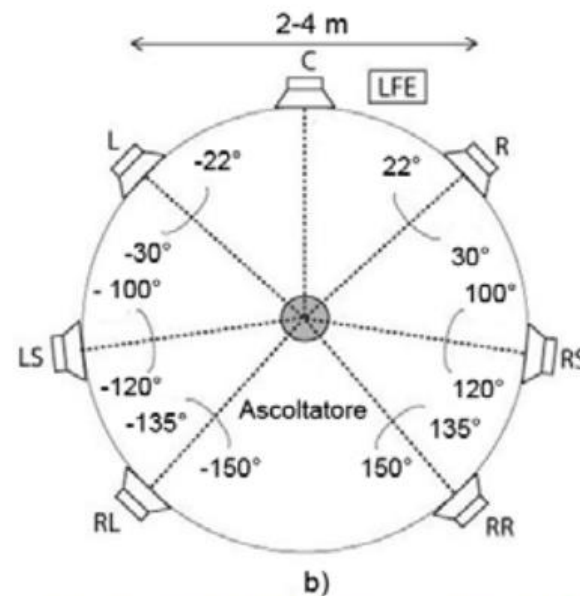
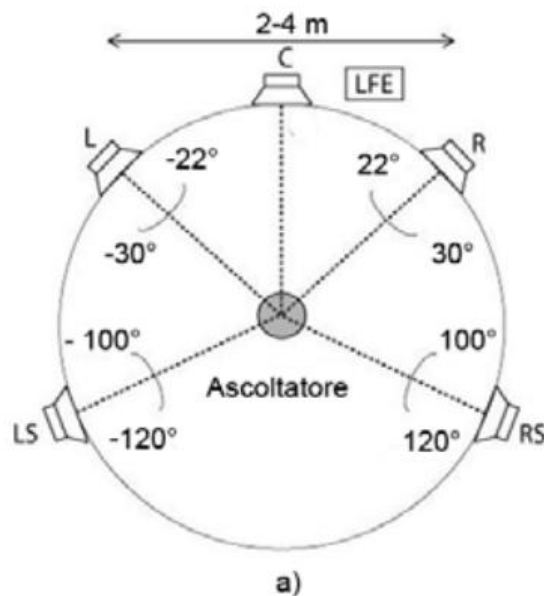


SISTEMI SURROUND

I formati più diffusi sono il 5.1 e il 7.1, dove il primo numero indica la quantità di altoparlanti, mentre il numero dopo il punto indica la presenza di un elemento dedicato alla riproduzione delle basse frequenze (il subwoofer).

Il posizionamento delle casse, la loro distanza dall'ascoltatore e la loro altezza non è casuale, ma è standardizzata dalla norma ITU-R BS 775:

- ✓ l'altezza della cassa deve essere di 1.20 m in modo da essere all'incirca coplanare con le orecchie dell'ascoltatore;
- ✓ la distanza dall'ascoltatore può essere scelta tra due opzioni: 2.4 m (casse anteriori) e 1.8 m (casse posteriori), oppure 3.5 m (casse anteriori) e 2.4 m (casse posteriori);
- ✓ gli angoli con cui orientare le casse sono invece schematizzati in figura



Orientamento delle casse nei sistemi 5.1 (a) e 7.1 (b).

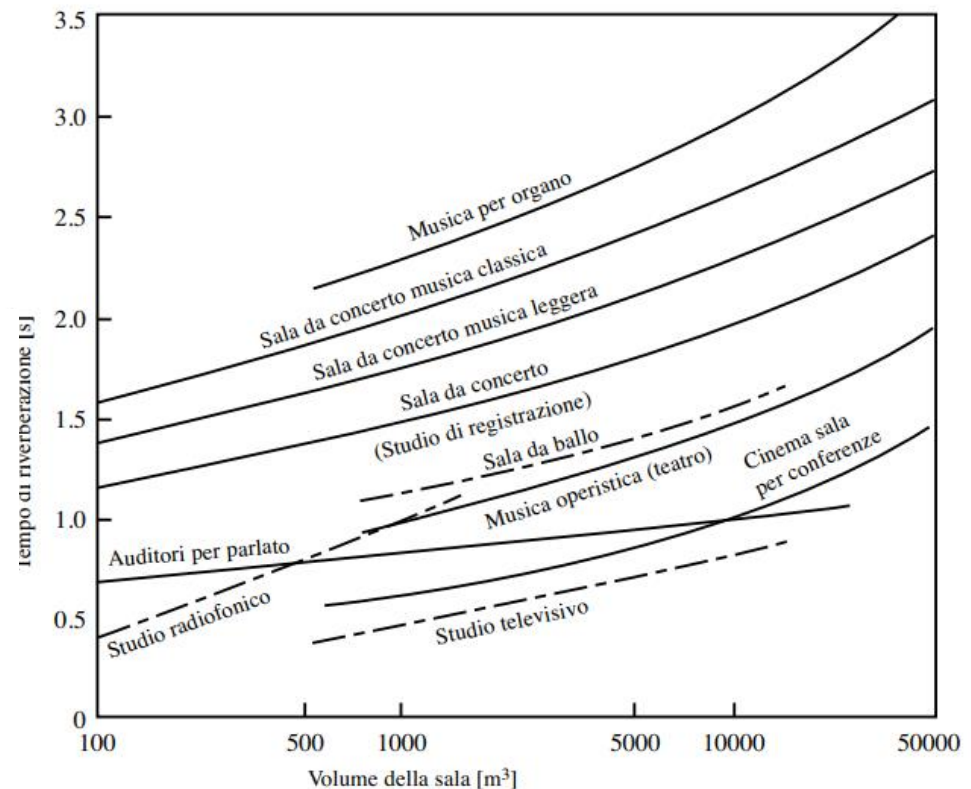
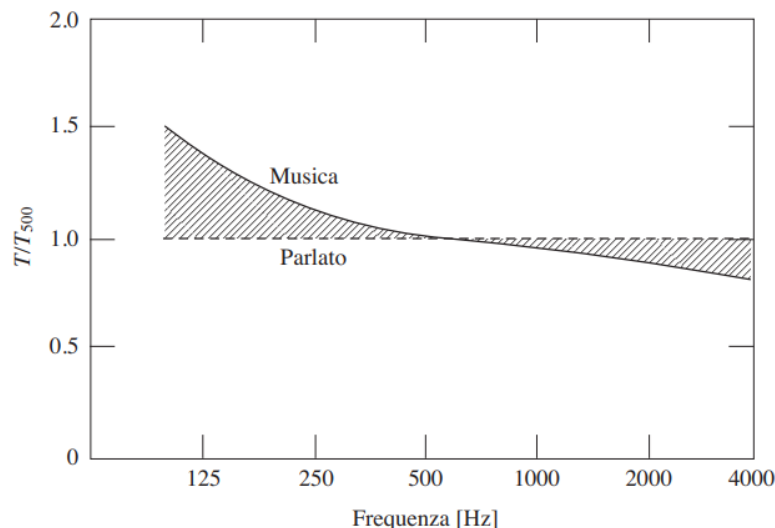
Tempo di riverberazione **OTTIMALE** per un ambiente chiuso (ESEMPIO PRATICO DI ACUSTICA AMBIENTALE)

Per la migliore intelligibilità (sia della parola che della musica) si deve avere nel punto di ascolto un'intensità sonora sufficiente ed una dispersione temporale non eccessiva del suono emesso dalla sorgente. Sono state proposte delle formule empiriche che forniscono una stima del tempo di riverberazione ottimale (in s) in funzione del volume dell'ambiente, nel caso della musica e del parlato

$$RT60_{parlato} = 0.1 V^{1/3}$$

$$RT60_{musica} = 0.5 + 10^{-4} V$$

Solitamente, soprattutto nello studio di grandi auditori, si usa determinare l'andamento del valore del tempo di riverberazione in funzione della frequenza



TEMPO DI RIVERBERAZIONE OTTIMALE SECONDO NORMA UNI 11367

(ESEMPIO PRATICO DI ACUSTICA AMBIENTALE)

È possibile determinare il tempo di riverberazione ottimale in frequenza mediante il volume della stanza e a un coefficiente k legato alla destinazione d'uso della sala:

$$RT_{60ott,1000Hz} = k\sqrt[3]{V}$$

Locali destinati a conferenze (parlato)

$k = 0,30$

Locali destinati a cinema

$k = 0,40$

Locali destinati a rappresentazioni teatrali

$k = 0,50$

Locali destinati all'ascolto di musica (classica)

$k = 0,55$

Partendo dal valore di RT60 ottimale determinato a 1000 Hz è possibile valutarlo nelle bande di frequenza attraverso dei coefficienti di proporzionalità

	125	250	500	1000	2000	4000
coeff. Proporzionalità	1,75	1,3	1,1	1	1,05	1,1

TEMPO DI RIVERBERAZIONE OTTIMALE SECONDO NORMA UNI 11367

(ESEMPIO PRATICO DI ACUSTICA AMBIENTALE)

I valori ottimali del tempo di riverberazione medio fra 500 Hz e 1000 Hz sono ricavabili dalle espressioni seguenti in funzione del volume dell'ambiente, V , in m^3 :

$$T_{\text{ott}} = 0,32 \lg (V) + 0,03 \text{ [s]}$$

(ambiente non occupato adibito al parlato)

$$T_{\text{ott}} = 1,27 \lg (V) - 2,49 \text{ [s]}$$

(ambiente non occupato adibito ad attività sportive)

Si suggerisce che i risultati ottenuti dalle misurazioni di tempo di riverberazione T ad ambiente non occupato, rispettino il seguente criterio, in tutte le bande di ottava comprese fra 250 Hz e 4 000 Hz:

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

RIVERBERAZIONE - RT60, ed ASSORBIMENTO (ESEMPIO PRATICO DI ACUSTICA AMBIENTALE)

Il **fenomeno fisico** acustico della riverberazione descrive la persistenza del suono dopo che la sorgente sonora ha cessato di vibrare. E causato dalla riflessione continuata delle onde sonore sulle superfici dell'ambiente in cui si propagano. Il **tempo di riverberazione** (RT60 - *Reverberation Time*) ad una data frequenza è il tempo necessario affinché la densità di energia sonora decresca di 60 dB dal valore originario, dopo che la sorgente abbia cessato di vibrare.

Secondo la **legge di Sabine**, il tempo di riverberazione RT60 è direttamente proporzionale al volume e inversamente proporzionale all'assorbimento totale dell'ambiente:

dove V è il volume dell'ambiente in m^3 , A l'assorbimento totale del suono


$$RT60 = 0.161 \frac{V}{A}$$

L'assorbimento del suono è un **processo** in cui l'energia associata alla vibrazione acustica dell'aria si trasferisce in energia interna (con aumento di temperatura) ed energia meccanica di vibrazione macroscopica dei materiali su cui il suono incide

Il coefficiente di assorbimento del suono α di un materiale è definito come la frazione di energia persa dalle onde

$$\alpha = \frac{\text{Energia Persa}}{\text{Energia Incidente}}$$

α è una costante adimensionale e può assumere valori compresi tra 0 ed 1.

I materiali con $\alpha = 0$ sono chiamati “**riflettori perfetti**”, quelli con $\alpha = 1$ “**assorbitori perfetti**”

Nel trattare l'acustica ambientale si usa definire la grandezza fisica chiamata **assorbimento (acustico) in mq** di una superficie S , $A = S \cdot \alpha$ che viene determinata come il prodotto della superficie stessa per il suo coefficiente di assorbimento

Si introduce, SUCCESSIVAMENTE, il concetto di assorbimento totale di un ambiente chiuso con pareti di diversi materiali come somma degli assorbimenti

$$A = S_1\alpha_1 + S_2\alpha_2 + \dots + S_n\alpha_n = \sum S_i\alpha_i$$

Infine si valuta α_{medio} , il **coefficiente di assorbimento medio** di un ambiente chiuso:

$$\bar{\alpha} = \frac{A}{S}$$



« S_i » è l'area di una superficie parziale ed α_i il coefficiente di assorbimento relativo alla superficie « S_i » presa in considerazione

OPPURE si VALUTA:

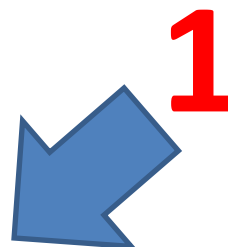
Il coefficiente NRC (Noise Reduction Coefficient) da un'indicazione del comportamento generale del materiale alle frequenze mediane.

$$NRC = \frac{\alpha_{250} + \alpha_{500} + \alpha_{1000} + \alpha_{2000}}{4}$$

ELENCAZIONE «PASSI» DELLA MODALITA' DI INTERVENTO

(ESEMPIO PRATICO DI ACUSTICA AMBIENTALE)

Dati geometrici dell'ambiente	
Grandezza	
Larghezza [m]	22
Lunghezza [m]	45
Altezza [m]	10
Volume totale [m ³]	9900
Superficie pavimento in parquet [m ²]	990
Superficie pareti [m ²]	1340
Superficie soffitto [m ²]	990
Dati di progetto geometrici	
Superficie unitaria porte d'uscita [m ²]	4,5
Superficie totale porte d'uscita [m ²]	49,5
Superficie schermo da proiezione [m ²]	128
Superficie tavolo da conferenza [m ²]	12
Altri dati di progetto caratteristici	
N° porte d'uscita	11
N° poltroncine	1200
Superficie unitaria porte d'uscita [m ²]	4,5
Superficie schermo da proiezione [m ²]	128
Superficie complessiva bocchette d'immissione aria [m ²]	7,2
Numero bocchette immissione aria	18
Superficie bocchetta unitaria [m ²]	0,4
Portata d'aria trattata dall'UTA [m ³ /h]	24000
Portata d'aria uscente da ogni bocchetta [m ³ /h]	1333
Superficie parete netta [m ²] (senza schermo e porte)	1162,5
Superficie totale (soffitto+pavimento+pareti) [m ²]	3320



Si ricordano qui di seguito alcuni spettri di coefficienti di assorbimento che occorrono nella progettazione acustica della sala:

	125 Hz	250 Hz	500 Hz	1 KHz	2 KHz	4 KHz
✓ poltroncina imbottita libera	0,10	0,20	0,30	0,30	0,30	0,35
✓ poltroncina imbottita occupata	0,20	0,40	0,45	0,45	0,50	0,45
✓ persona	0,15	0,30	0,40	0,40	0,45	0,40
✓ tende pesanti drappeggiate	0,08	0,10	0,15	0,25	0,40	0,50
✓ intonaco	0,03	0,04	0,04	0,05	0,05	0,08
✓ bocchette d'immissione aria	0,15	0,20	0,30	0,35	0,30	0,20
✓ schermo da proiezione	0,03	0,05	0,10	0,15	0,25	0,30

Per le sale da conferenza i valori dei tempi di riverberazione consigliati sono:

$$\tau_{60}=1,2 \text{ s (f=500 Hz)}$$

$$\tau_{60}=1,7 \text{ s (f=125 Hz)}$$



Correzione acustica della sala

L'analisi acustica si limita alle due frequenze:

Bassa frequenza: 125 Hz

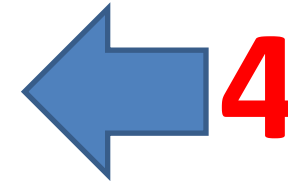
Media frequenza: 500 Hz

Queste frequenze sono quelle di maggiore interesse per la correzione acustica della sala.



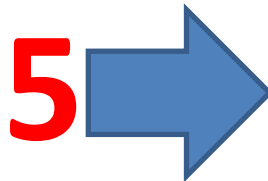
Analisi acustica della sala a 125 Hz

Superfici assorbenti	Area S_i [m ²] o numero	Coefficiente di assorbimento α_i	Unità di Assorbimento $\alpha_i * S_i$ [m ²]	Tipi di assorbenti
pavimento	990	0,04	39,6	legno (parquet)
pareti laterali	864	0,03	25,92	intonaco cemento
parete con schermo	92	0,03	2,76	intonaco cemento
parete di fondo	206,5	0,03	6,195	intonaco cemento
schermo	128	0,03	3,84	cotone
soffitto	990	0,03	29,7	intonaco cemento
tende pesanti porte	49,5	0,08	3,96	cotone
bocchette d'aria	7,2	0,15	1,08	a griglie
poltroncine	1200	0,1	120	imbottite



Analisi acustica della sala a 500 Hz

Superfici assorbenti	Area S_i [m ²] o numero	Coefficiente di assorbimento α_i	Unità di Assorbimento $\alpha_i * S_i$ [m ²]	Tipi di assorbenti
pavimento	990	0,07	69,3	legno (parquet)
pareti laterali	864	0,04	34,56	intonaco cemento
parete con schermo	92	0,04	3,68	intonaco cemento
parete di fondo	206,5	0,04	8,26	intonaco cemento
schermo	128	0,1	12,8	cotone
soffitto	990	0,04	39,6	intonaco cemento
tende pesanti porte	49,5	0,15	7,425	cotone
bocchette d'aria	7,2	0,3	2,16	a griglie
poltroncine	1200	0,3	360	imbottite



Calcolo del tempo di riverberazione

Si procede al calcolo del tempo di riverberazione per le seguenti tre situazioni:

1- Sala vuota

2 - Sala semipiena (75% occupati)

3 - Sala piena

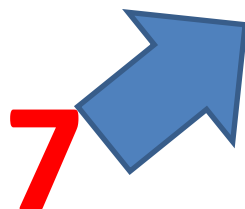
6



Calcolo della sommatoria delle unità di assorbimento UA (somma di $\alpha_i \cdot S_i$ [m2])			
Frequenza	sala vuota	sala semipiena	sala piena
125 Hz	233,06	323,06	353,06
500 Hz	537,79	672,79	717,79

Calcolo del coefficiente di assorbimento medio α_m			
Frequenza	sala vuota	sala semipiena	sala piena
125 Hz	0,07	0,10	0,11
500 Hz	0,16	0,20	0,22

$$\alpha_m = \frac{\sum \alpha_i \cdot S_i}{\sum S_i}$$



Calcolo del tempo di riverberazione τ_s con la formula di Sabine			
Frequenza	sala vuota	sala semipiena	sala piena
125 Hz	6,80	4,90	4,49
500 Hz	2,95	2,35	2,21



$$\tau_s = 0,16 \cdot \frac{V}{\sum \alpha_i \cdot S_i}$$

Calcolo del tempo di riverberazione τ_{60} con la formula di Eyring			
Frequenza	sala vuota	sala semipiena	sala piena
125 Hz	6,56	4,66	4,24
500 Hz	2,70	2,11	1,96

$$\tau_{60} = 0,16 \cdot \frac{V}{\left[S \cdot \ln \frac{1}{(1 - \alpha_m)} \right]}$$

Il tempo ottimale di riverberazione si verifica in genere per la situazione intermedia (sala semipiena) e per la frequenza con tempo di riverbero che si discosta maggiormente da quello ottimale. Nel nostro esempio:

$$f=125 \text{ Hz}$$

$$\tau_{60}=4,66 \text{ s}$$

Dalla formula di Eyring si ricava:

$$\alpha_m = 1 - e^{-0,16 \cdot V / \tau_{60} \cdot S}$$

Si ricava: $\alpha_m = 0,24$

L'assorbimento totale si dovrà portare a:

$$S \alpha_m = 3320 \cdot 0,24 = 812,43 \text{ m}^2$$

L'incremento sarà di:

$$(812,43 - 323,06) = 489,38 \text{ m}^2$$



10

Per determinare la superficie del materiale assorbente necessario per la correzione acustica della sala si procede nel seguente modo:

- 1) Si considera il valore del coefficiente di assorbimento del materiale scelto alla frequenza di 125 Hertz, per esempio $\alpha=0,6$, e si sottrae il valore del coefficiente di assorbimento della parete nuda ($\alpha=0,03$), ottenendo un valore di 0,57.
- 2) Si divide la superficie dell'incremento dell'assorbimento da realizzare per il coefficiente calcolato al punto che precede e si ottiene la superficie del materiale assorbente da applicare:

$$S_{\text{mat.ass}} = 489,38 / 0,57 = 858,56 \text{ m}^2$$



11

OSSERVAZIONE

!!!



Il materiale assorbente sarà applicato dapprima sulla parete di fondo, di fronte alla sorgente sonora, poi sulle pareti laterali ed infine al soffitto. Le parti vicine alla sorgente sonora si escludono in maniera che l'energia sonora si possa diffondere, quanto più possibile, uniformemente nell'ambiente.

DOVE EFFETTUARE LE CORREZIONI ACUSTICHE; PUNTI DI PRIMA RIFLESSIONE

Le prime riflessioni sono costituite dai fronti d'onda che arrivano all'ascoltatore immediatamente dopo al suono diretto.

avremo dei punti di riflessione:

- Sulle pareti laterali destra/sinistra.
- Sul soffitto
- Sul pavimento (posizionare un tappeto piuttosto spesso)
- Sulla parete anteriore

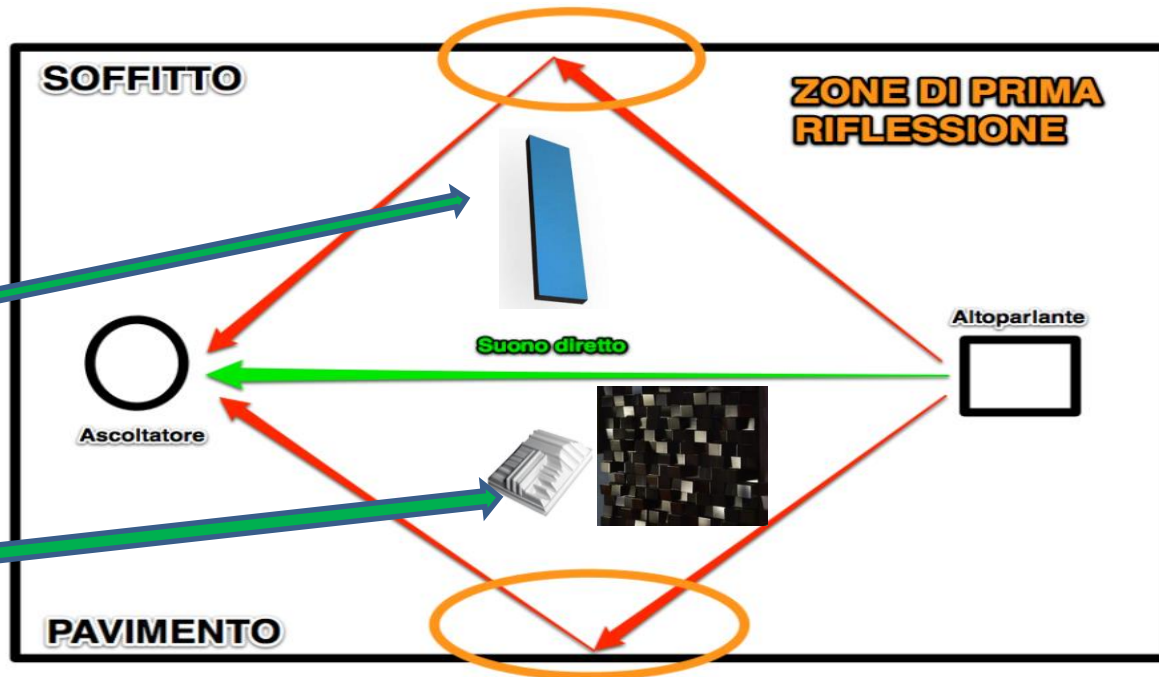
Possiamo trattare i punti di prima riflessione con dei pannelli fonoassorbenti, questa è la scelta tipica di uno studio di registrazione o un impianto 5.1/Home Theater.

Possiamo trattare i punti di prima riflessione con dei pannelli diffusori, questa è la scelta che si fa soprattutto nel campo dell'Hi-Fi, in questo caso infatti cerchiamo di diffondere le prime riflessioni senza assorbirle.

Possiamo pensare di trattare i punti di prima riflessione con un misto di fonoassorbenti e diffusori. Questa è una soluzione di compromesso e permette di dosare a piacere il controllo delle riflessioni laterali e la profondità dell'immagine stereo.

Regola dello specchio

- 1) Sedersi nel punto di ascolto con gli altoparlanti posizionati correttamente.
- 2) Chiedete ad un vostro amico di muovere lo specchio tenendolo addossato ad una parete (la destra per esempio).
- 3) Quando riuscirete a vedere nello specchio l'altoparlante di dx, avrete individuato il punto di prima riflessione della cassa destra sulla parete destra.
- 4) Quando riuscirete a vedere nello specchio l'altoparlante di sx, avrete individuato il punto di prima riflessione della cassa sinistra sulla parete destra.
- 5) Ripetere i passi 2-3-4 per la parete laterale opposta, per il soffitto e per il pavimento (eventualmente anche per la parete anteriore e frontale, anche se in questo caso dovremmo valutare la situazione da caso a caso)



Si avranno diversi punti di prima riflessione per ciascun punto di ascolto nella sala

EARLY DECAY TIME - EDT

(ESEMPIO PRATICO DI ACUSTICA AMBIENTALE)

Un altro **parametro utile per determinare la qualità dell'acustica** di un ambiente è l'EDT (*Early Decay Time*), definito come sei volte il tempo di riverberazione calcolato sui primi 10 dB del decadimento sonoro: è misurato tra 0 e -10 dB sotto il valore iniziale del livello sonoro

Nella maggior parte dei casi i valori di EDT sono inferiori a quelli dell'RT60 e l'entità della discrepanza costituisce un buon giudizio dell'imperfetta diffusione locale

l'**EDT** viene utilizzato perchè prende in considerazione l'effetto dei primi riflessi sonori e, soprattutto, **è più vicino alla percezione soggettiva della riverberazione**. Inoltre l'EDT è collegato ad altre sensazioni come, ad esempio, la chiarezza degli attacchi e la loro intensità: **questo parametro ha dimostrato di essere meglio correlato con le sensazioni psicoacustiche soggettive**

DEFINITION (Indice di Definizione)- D50

(ESEMPIO PRATICO DI ACUSTICA AMBIENTALE)

L'organo uditivo umano non riesce a distinguere separatamente suoni che si verificano molto ravvicinati nel tempo (circa 50 ms per il parlato; 80 ms per la musica). Le prime riflessioni che giungono all'orecchio umano entro 50÷80 ms dal suono diretto, oltre a non essere percepite singolarmente, sono effettivamente fuse con il suono diretto stesso

L'energia che arriva prima dei 50 ms si chiama **energia utile**

L'energia che arriva dopo prende il nome di **energia inutile o dannosa**

L'indice di definizione D50 costituisce una misura di chiarezza con la quale l'ascoltatore recepisce il messaggio parlato

È un parametro di qualità ma è anche significativo per l'intelligibilità del parlato



$$D50 = \frac{\int_{0ms}^{50ms} p^2(t) dt}{\int_{0ms}^{+\infty} p^2(t) dt} = \frac{\text{Energia Utile}}{\text{Energia Totale}}$$

Gli ambienti acustici adatti per il **parlato** richiedono **D50 > 0.5**, mentre quelle adatte per l'**esecuzione musicale** **D50 < 0.5**

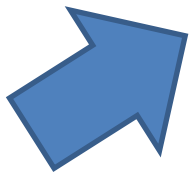
CLARITY (Indice di Chiarezza) - C80

(ESEMPIO PRATICO DI ACUSTICA AMBIENTALE)

L'indice di chiarezza (in dB) ha il fine di valutare la possibilità, per un ascoltatore, di percepire nitidamente note musicali suonate in rapida successione, nonchè di distinguere chiaramente più note suonate simultaneamente da uno o più strumenti

$$C80 = 10 \log \frac{D80}{1 - D80} = 10 \log \frac{\int_{0ms}^{80ms} p^2(t) dt}{\int_{80ms}^{+\infty} p^2(t) dt}$$

C80 è principalmente usato per la musica: interpreta sensazioni soggettive che riguardano la percezione della chiarezza degli attacchi, differenza tra le varie voci, trasparenza, localizzazione della sorgente e definizione del suono .



Valori di C80 attorno a 0 dB sono relativi ad ambienti acustici adatti per l'esecuzione della musica sinfonica, mentre per l'opera lirica dev'essere compreso tra 1 ÷ 4 dB. I valori limite per la musica strumentale sono -2 ÷ +2 dB.

ST1

(ESEMPIO PRATICO DI ACUSTICA AMBIENTALE)

Questo parametro (in dB), è utile per ambienti adibiti ad attività musicali

$$ST1 = 10 \log \frac{\int_{10ms}^{100ms} p^2(t) dt}{\int_{0ms}^{10ms} p^2(t) dt}$$

L'ST1 `e un parametro per la valutazione delle condizioni in cui si trovano ad operare gli **artisti sul palco**: descrive la facilità di udire gli altri membri dell'orchestra. Nella sua valutazione la distanza sorgente–ricevitore è assunta pari approssimativamente ad 1 m

STI-RASTI

(ESEMPIO PRATICO DI ACUSTICA AMBIENTALE)

I coefficienti di chiarezza e definizione possono essere utilizzati per stimare l'intelligibilità della parola ma non prendono in considerazione il livello di rumore di fondo.

Se l'ambiente acustico da esaminare ha una funzione strettamente legata all'utilizzo del **parlato** piuttosto che della musica, è essenziale analizzare la situazione con dei criteri specifici di intelligibilità come l'**STI** (*Speech Transmission Index*) e il **RASTI** (*RApid Speech Transmission Index*).

Questi parametri ci permettono di misurare anche la “distanza critica” oltre la quale l'intelligibilità del parlato non è di qualità

I valori di STI e RASTI variano da 0 a 1, dove il valore 0 indica nessuna intelligibilità ed il valore 1 dà un'intelligibilità totale.

Per una stanza di dimensioni regolari, valori oltre 0.60 sono considerati buoni, sopra 0.75 eccellenti.

Per la sale da conferenza con coefficienti di assorbimento che variano da 0.1 ÷ 0.4, la distanza critica assume i valori tra 15 ÷ 20 m

INTELLEGGIBILITA' DEL PARLATO – METODO DI PEUTZ

(ESEMPIO PRATICO DI ACUSTICA AMBIENTALE)

Il metodo di Peutz-Davis valuta analiticamente l'intelleggibilità mediante la percentuale di perdita di consonanti durante l'articolazione del parlato: %APcons.

$$\%AP_{cons} = \frac{200d^2T_{60}}{VQ}$$

d: distanza sorgente – ricevitore (m)

T_{60} : tempo di riverberazione (s)

V: volume dell'ambiente (m³)

Q: fattore di direttività della sorgente

da 0 a 5 intelligibilità ottima
da 5 a 10 intelligibilità buona
da 10 a 15 intelligibilità sufficiente
da 15 a 20 scarsa intelligibilità
superiore a 20 cattiva intelligibilità

Partendo dalla sorgente per le distanze considerate si calcola l'intelleggibilità con la formula del Metodo di Peutz.

Si può allora tracciare un diagramma in pianta ed in sezione delle curve che individuano le aree di pari intelligibilità.

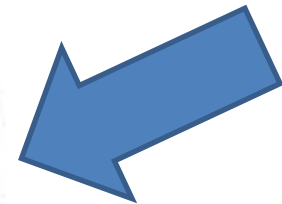
Tale metodo ha il suo fondamento nell'analisi della potenza sonora diretta rispetto a quella riverberata. Vale la seguente relazione almeno fino a che il rapporto segnale-rumore risulta maggiore di 25 dB.

Altri descrittori di qualità acustica: C50 e STI

(ESEMPIO PRATICO DI ACUSTICA AMBIENTALE)

Le caratteristiche interne di un ambiente, soprattutto quando sia essenziale garantire una buona intelligibilità del parlato, possono essere ben descritte attraverso i parametri **C50** (chiarezza) e **STI** (speech transmission index).

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

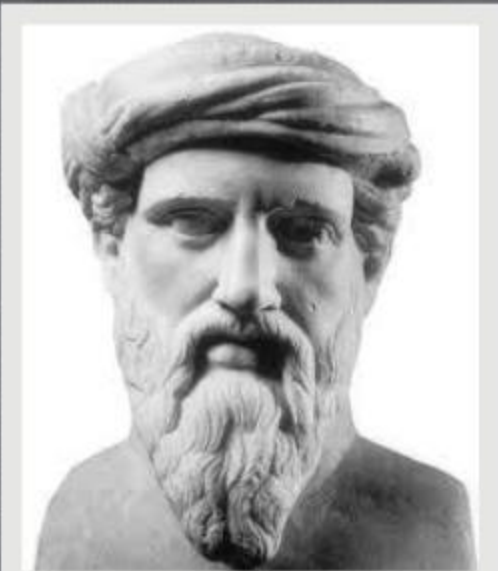


Le modalità di misurazione e di valutazione sono descritte nella serie **UNI EN ISO 3382** e nella **CEI EN 60268-16**.

**ED ORA UN PO' DI OPERE DEL
PASSATO**

gli antichi

VI A.C.



Pitagora:

- matematico, filosofo e scienziato
- esperimenti sulle proprietà di corde vibranti
- effetti del suono sui sistemi biologici

PERIODO GRECO E ROMANO



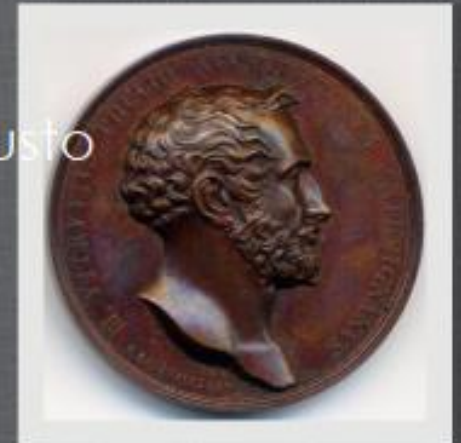
IV A.C.

- Aristosseno di Taranto:
- discepolo di Aristotele
 - filosofo e musicista
 - autore di 'Elementi di armonia'

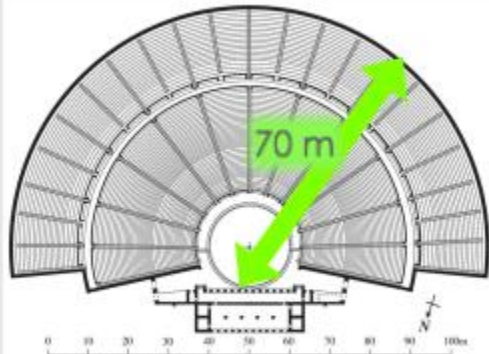
I.A.C.

Marco Vitruvio Pollione:

- scrittore romano, architetto e ingegnere
- prestò servizio sotto Giulio Cesare e Augusto
- autore del trattato 'De architectura'



Teatro di Epidauro



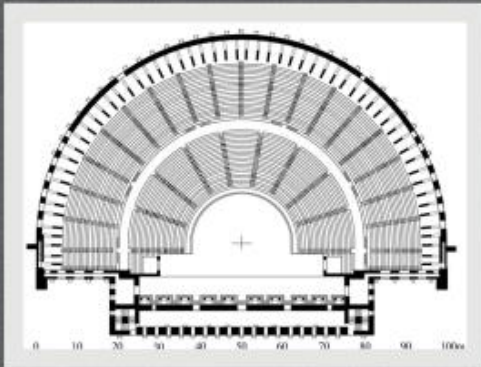
Epidaureum (modern Epidaure, Greece)
Cavea width: 112 m, orchestra width: 24.85 m, capacity: 11,700-14,700, ca. 300-340 BC.
From: *Wikipedia Commons*

IV A.C.



Teatro di Aspendos

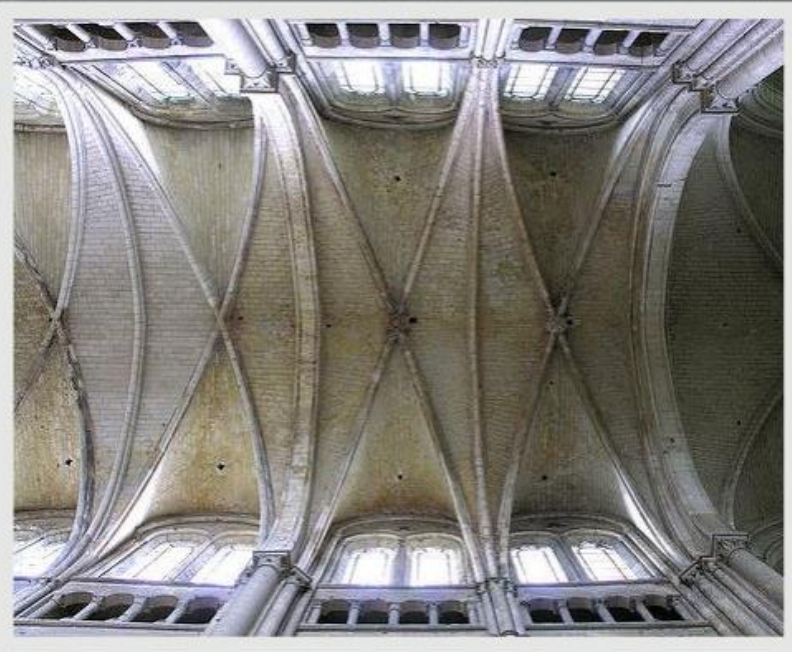
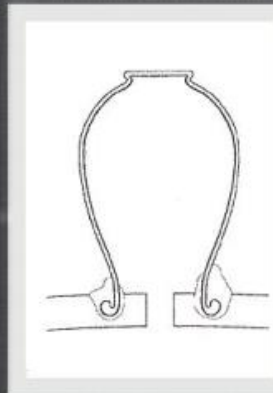
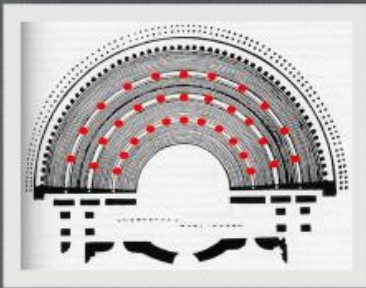
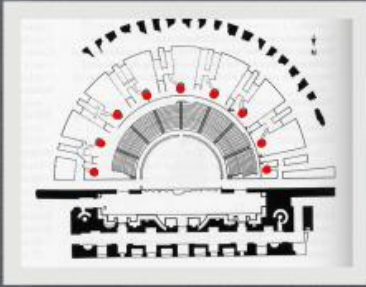
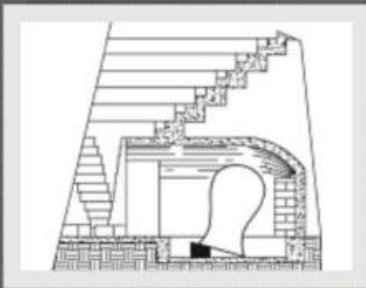
II A.C.



MEDIOEVO

A.D. 1100 - 1400

XII sec.



la rivoluzione scientifica

XVII D.C.



Robert Boyle e Robert Hooke:

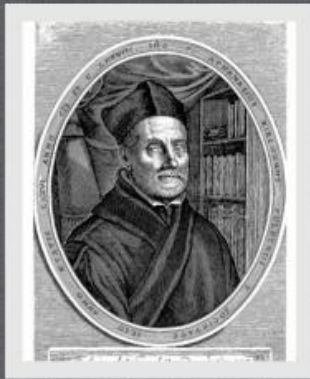
- fisici e scienziati
- autore del trattato 'Harmonie Universelle'
- trasmissione del suono



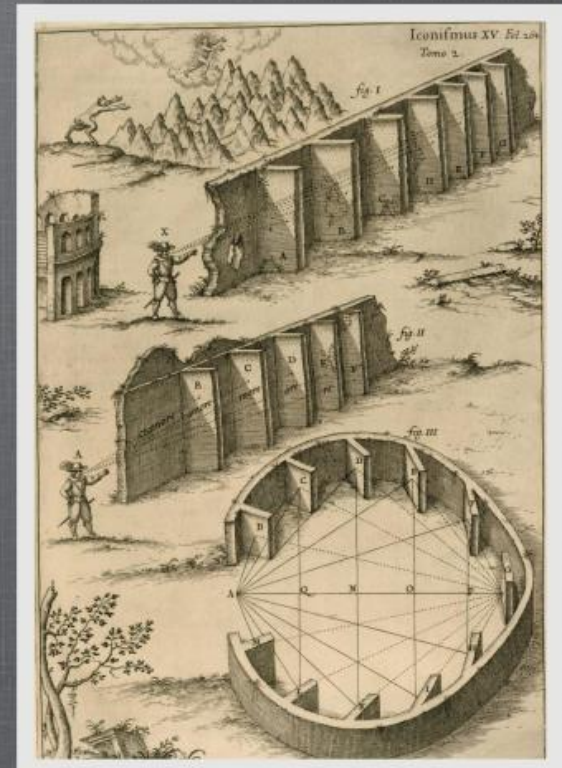
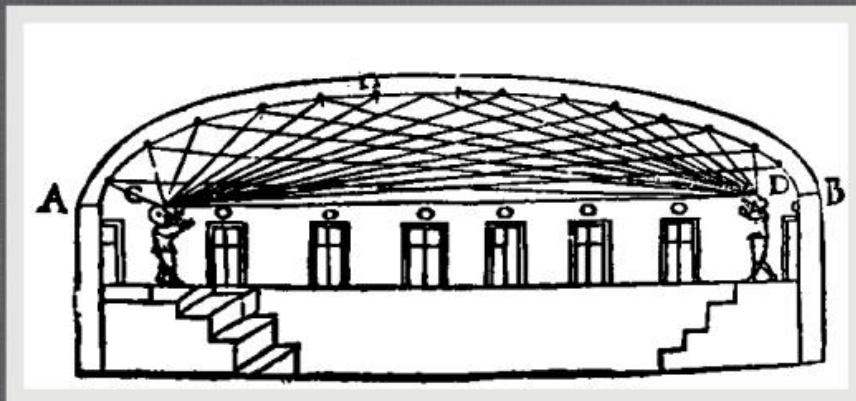
FENOMENI ACUSTICI

Studi sull'acustica

XVII sec.

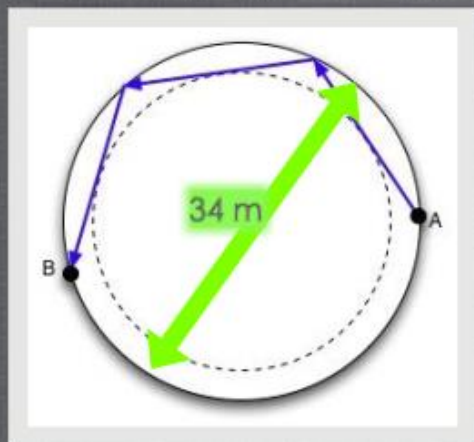


Athanasius Kircher (1602-1680):
- filosofo tedesco
- autore di 'Musurgia Universalis'



Gallerie dei sussurri

XVII sec.



ETA' MODERNA

Fogg Lecture Hall- Boston

XIX sec.



eta' moderna

Influenza del riverbero sulla musica



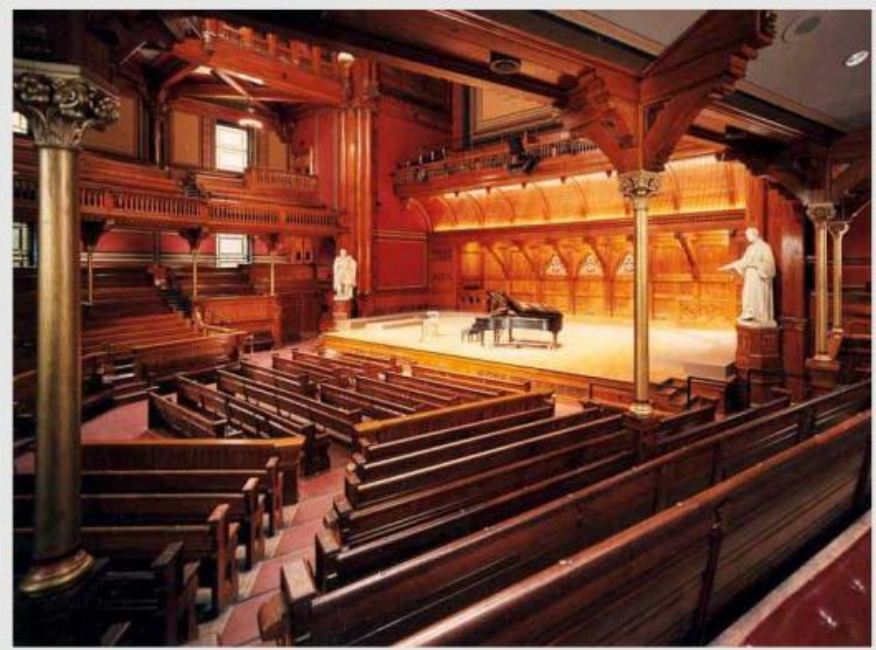
long reverberation



short reverberation

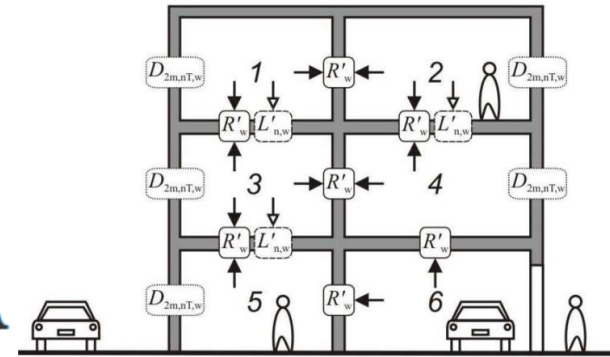
NASCITA ACUSTICA MODERNA

Wallace Clement Sabine (1868-1919)



MISURE IN OPERA; MODALITA' ESECUTIVA

MISURE ACUSTICHE IN OPERA



- MISURA IN OPERA DELL' ISOLAMENTO ACUSTICO PER VIA AEREA (UNI EN ISO 140-4) SOSTITUITA DALLA UNI EN ISO 16283-1
- MISURA IN OPERA DELL' ISOLAMENTO ACUSTICO DI FACCIATE ED ELEMENTI DI FACCIATA (UNI EN ISO 140-5) SOSTITUITA DALLA UNI EN ISO 16283-3
- MISURA IN OPERA DELL' ISOLAMENTO ACUSTICO DI SOLAI DAL RUMORE DI CALPESTIO (UNI EN ISO 140-7) SOSTITUITA DALLA UNI EN ISO 16283-2
- MISURA DEL TEMPO DI RIVERBERAZIONE NEGLI AUDITORI (UNI EN ISO 3382) IN VIGORE
- POTENZA SONORA DI SORGENTI DI RUMORE – METODO INEGNERISTICO PER SORGENTI IN CAMPO LIBERO SU UN PIANO RIFLETTENTE (UNI EN ISO 3744) IN VIGORE
- POTENZA SONORA DI SORGENTI DI RUMORE – METODO DI CONTROLLO MEDIANTE SUPERFICIE DI INVILUPPO SU UN PIANO RIFLETTENTE (UNI EN ISO 3746) IN VIGORE

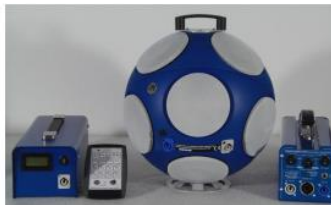
Recentemente le norme ISO140-4 e 14 riguardanti le misure di fono isolamento in opera sono state sostituite e accorpate nella **ISO16283-1** introducendo le novità del movimento manuale del microfono/fonometro ed il procedimento per la misura delle basse frequenze. Le Norme ISO140-7 e 5 per il calpestio e la facciata in opera sono state aggiornate alla ISO16283 2 e 3.

Il pacchetto software Noise & Vibration Works (in particolare l'opzione 3 acustica edilizia) sono stati modificati per accogliere questo notevole lavoro di adeguamento normativo. In particolare l'interfaccia di misura del tempo di riverbero è stata completamente rinnovata e potenziata per rendere il tecnico sempre più confidente sui risultati che ha raccolto. E la procedura di misura è stata adeguata alla necessità di utilizzare due posizioni di sorgente e alla misure dei livelli agli angoli degli ambienti di piccolo volume per la correzione in bassa frequenza.

TIPICA STRUMENTAZIONE

Kit 304 Sorgente con amplificatore esterno
alimentazione a batteria e rete elettrica.

ISO 16283/ISO 140/ISO 3382/ISO 354



DA 304	Amplificatore digitale: 300w RMS, alimentazione da rete, batteria, generatore segnali, caricabatteria. (4.2 kg)	2.154,00
RC 304	Telecomando wireless multi-funzione: trasmissione radio 16 tasti (153x94x23mm)	200,00
DL 304	Sorgente Sferica: 600W, magneti al neodimio, cavo 5m (CB-SPK4.5), base ;Ø 330/375 (8.5 kg)	2.085,00
BAG30	Borsa di Trasporto imbottita, comprensiva di tracolla. Per amplificatore DA304	86,00
BP 300	Pacco Batterie: (24+24)V -7,2 Ah Al piombo, lunghezza 2m incluso (345x205x70)mm (10.6 kg).	290,00
TR 300	Treppiede Alluminio: altezza 120/220 cm, tubo Ø 35mm, con molla ad aria compressa. (2.7kg)	90,00
FC 300	Cassa trasporto: rivestita internamente , (400x400x480mm) (6.2 kg)	295,00
Kit 304 (completo)	(DA 304)+(RC 304)+(DL 304)+(CB-SPK8.5)+(BAG 304)+(BP 300)+(TR 300) (FC300)	€ 5.200,00

Spherical Source + Amplifier + Remote Control + Flight Case + Battery Pack + Tripod



DA304: Amplificatore (4.2 kg), 300 Wrms, Generatore rumore incluso (pink/white/swept-sine), Completamente controllato con telecomando a radio frequenza con 16 tasti .

Alimentazione : 230VAC, (115VAC su richiesta); Alimentazione DC 24+24V pacco batterie (unità separata)

DL 304: Sorgente Sferica 8.5 kg; Diametro 35 cm; Altoparlanti: (12 x 5" magneti al neodimio) 600W max., Risposta in frequenza 50 to 20,000 Hz (equalizzata tramite amplificatore DA304)

Lw max (non equalizzato) 123 dB.

catena microfonica n.1: composta da fonometro integratore classe I Larson Davis modello 824 matricola 3763 e microfono Larson Davis modello 2541 matricola 8432. Certificato di taratura SIT M1.08.FON.170 del 09/05/2008 rilasciato da centro SIT n°62.

catena microfonica n.2: composta da fonometro integratore classe I Larson Davis modello 824 matricola 3313 e microfono Larson Davis modello 2541 matricola 8146. Certificato di taratura SIT 2007/410/F del 25/11/2007 rilasciato da centro SIT n°54.

DS04



Generatore direzionale per misure di facciata,
da collegare all'amplificatore **DA304**

920,00

NORMATIVA

Requisiti acustici

Il decreto **D.P.C.M. 5/12/1997** fissa i **valori limite** dei requisiti acustici passivi che caratterizzano la **prestazione acustica di un edificio nei confronti del rumore esterno** (isolamento acustico di facciata) e **del rumore interno** (potere fonoisolante, livello di pressione sonora di calpestio, livello sonoro degli impianti):

Ambienti abitativi	Valori limite [dB]				
	R' _w	D _{2m,n,T,w}	L' _{nw}	L _{ASmax}	L _{Aeq}
Edifici adibiti ad ospedali, cliniche, case di cura e assimilabili	55	45	58	35	25
Edifici adibiti a residenze, alberghi, pensioni ed attività assimilabili	50	40	63	35	35
Edifici adibiti ad attività scolastiche a tutti i livelli e assimilabili	50	48	58	35	25
Edifici adibiti ad uffici, attività ricreative e di culto, attività commerciali o assimilabili	50	42	55	35	35

TAB. 1 - Valori limite D.P.C.M. 5/12/1997

Nella TAB.1 sono stati evidenziati i valori limite per gli edifici scolastici. Il D.P.C.M richiede che tali requisiti **siano rispettati in opera**, quindi ad edificio ultimato.



Un altro criterio particolarmente significativo per gli edifici scolastici è il tempo di riverberazione che quantifica la permanenza di una coda sonora nell'ambiente, con tutte le sue implicazioni sull'intelligibilità del parlato. In tema di tempo di riverberazione si rimanda alla **Circolare del Ministero dei Lavori Pubblici n.3150 del 22/05/1967** riguardante gli edifici scolastici.

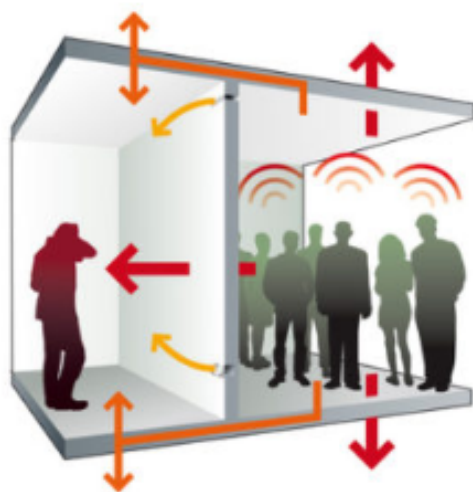
Ambienti abitativi	Valori limite [s]	Valore misurato [s]
Aule scolastiche	1,2	Media dei tempi di riverberazione misurati alle frequenze di 250 500 1000 2000 Hz, ad aula arredata, presenza due persone massimo
Palestre	2,2	Media dei tempi di riverberazione misurati alle frequenze di 250 500 1000 2000 Hz

TAB.2 - Circolare Ministero Lavori Pubblici n.3150 del 22/05/1967

Edifici pubblici: requisiti acustici passivi

Il Decreto ministeriale 11 gennaio 2017, "Adozione dei criteri ambientali minimi per gli arredi per interni, per l'edilizia e per i prodotti tessili", ha introdotto anche alcune importanti novità sul fronte del comfort **acustico**, limitatamente agli **edifici pubblici**.

Requisiti acustici passivi e classificazione acustica



Transmission du bruit : → directe / → indirecte ou latérale / → parasite

In particolare, secondo quanto previsto dal Paragrafo 2.3.5.6 dell'allegato 2:

- i valori dei **requisiti acustici passivi** dell'edificio devono corrispondere almeno a quelli della Classe II della norma UNI 11367 [in materia di **classificazione acustica degli edifici**]
- per **ospedali, case di cura e scuole** i requisiti acustici passivi, devono soddisfare il livello di "**prestazione superiore**" riportato nell'Appendice A della UNI 11367
- devono essere rispettati i valori di "**prestazione buona**" nell'Appendice B della UNI 11367
- gli ambienti interni devono essere idonei al raggiungimento dei valori indicati nella norma UNI 11532 (**tempo di riverbero e intelligibilità del parlato**) .

Valori dei **requisiti acustici passivi di classe II** secondo la norma UNI 11367:

- Isolamento acustico normalizzato di facciata: $D_{2m,nT,w} - \geq 40$ dB
- Potere fonoisolante apparente di partizioni verticali e orizzontali fra ambienti di differenti unità immobiliari: $R'w \geq 53$ dB
- Livello di pressione sonora di calpestio normalizzato fra ambienti di differenti unità immobiliari: $L'_{nw} \leq 58$ dB
- Livello sonoro corretto immesso da impianti a funzionamento continuo $L_{ic} dB(A) \leq 28$ dB

CRITERI AMBIENTALI MINIMI DI ACUSTICA NELLE GARE D'APPALTO

Il DM 11 gennaio 2017 sui "Criteri ambientali minimi" ha introdotto, per le gare di appalto degli edifici pubblici, alcune importanti novità sul tema del comfort acustico.

Nell'Allegato 2 al Paragrafo 2.3.5.6 si legge che:

- I valori dei requisiti acustici passivi dell'edificio devono corrispondere almeno a quelli della **Classe II** della norma UNI 11367 (Tabella 1)
- I requisiti acustici passivi di ospedali, case di cura e scuole devono soddisfare il livello di "**prestazione superiore**" riportato nell'Appendice A della UNI 11367 .
- L'isolamento acustico tra ambienti di uso comune ed ambienti abitativi deve rispettare almeno i valori caratterizzati come "**prestazione buona**" nell'Appendice B della UNI 11367
- Gli ambienti interni devono essere idonei al raggiungimento dei valori di tempo di riverbero (T) e intelligibilità del parlato (STI) indicati nella norma UNI 11532.



Descrittore	Classe II
Isolamento di facciata $D_{2m,nT,w}$ [dB]	≥ 40
Isolamento ai rumori tra unità immobiliari R'_w [dB]	≥ 53
Livello di rumori da calpestio L'_{nw} [dB]	≤ 58
Livello di rumore impianti continui L_{ic} [dBA]	≤ 28
Livello di rumore impianti discontinui L_{id} [dBA]	≤ 33

Tabella 1 – Norma UNI 11367 - Valori di Classe II



Questo è uno dei pochi casi in cui la norma UNI 11367 (Classificazione acustica delle unità immobiliari) e la UNI 11532 (Caratteristiche acustiche interne di ambienti confinati) vengono citate espressamente in un documento pubblico.

I valori richiesti dal nuovo Decreto sono generalmente più restrittivi rispetto alle prescrizioni attualmente in vigore, indicate nel DPCM 5-12-1997 (Tabella 2). Infatti, anche se i limiti del decreto del 1997 non sono direttamente confrontabili con le classi acustiche della norma UNI, si osservano in linea di massima richieste più performanti per isolamento ai rumori aerei, rumori da calpestio e impianti. Per i casi che fanno eccezione, come ad esempio l'isolamento acustico di facciata delle scuole, restano prevalenti i limiti del DPCM.

Disponibile sul PAF (RUMORE/NORMATIVA) il DECRETO 11 gennaio 2017 **Ministero dell'Ambiente e della Tutela del Territorio e del Mare** **Adozione dei criteri ambientali minimi per gli arredi per interni, per l'edilizia e per i prodotti tessili, che ha introdotto** specifici valori dei requisiti acustici passivi da rispettare nell' «Affidamento di servizi di progettazione e lavori per la nuova costruzione, ristrutturazione e **manutenzione** di edifici pubblici» (allegato 2 punto 2.3.5.6), adeguando i criteri individuati dal DPCM 05/12/1997 "Determinazione dei requisiti acustici e passivi degli edifici", in relazione allo stato dell'arte degli standard di buona tecnica in materia.

In particolare il Decreto 11 Gennaio 2017 richiede che i valori dei requisiti acustici passivi dell'edificio corrispondano almeno a quelli della classe II ai sensi della norma UNI 11367. Gli ospedali, le case di cura e le scuole devono soddisfare il livello di "prestazione superiore" riportato nel prospetto A.1 dell'Appendice A della norma 11367. Devono essere altresì rispettati i valori caratterizzati come "prestazione buona" nel prospetto B.1 dell'Appendice B alla norma UNI 11367.

Gli ambienti interni devono essere idonei al raggiungimento dei valori indicati per i descrittori acustici riportati nella norma UNI 11532.

I descrittori acustici da utilizzare sono:

quelli definiti nella UNI 11367 per i requisiti acustici passivi delle unità immobiliari; 

almeno il tempo di riverberazione e lo STI per l' **acustica** interna agli ambienti di cui alla UNI 11532.

Verifica:

Il progettista deve dare evidenza del rispetto del criterio, sia in fase di progetto iniziale che in fase di verifica finale della conformità, conseguendo rispettivamente un progetto acustico e una relazione di conformità redatta tramite misure acustiche in opera, che attestino il raggiungimento della classe acustica prevista dal criterio e i valori dei descrittori acustici di riferimento ai sensi delle norme UNI 11367, UNI 11444, UNI 11532.



Sommario : La norma descrive gli aspetti generali comuni a tutti i settori di applicazione, in particolare i descrittori che meglio rappresentano la qualità acustica di un ambiente, indicandone i valori di riferimento in relazione alla destinazione d'uso dell'ambiente stesso, i metodi di previsione e le tecniche di valutazione che costituiscono una metodologia operativa comune.

La norma si applica a diverse destinazioni d'uso quali:

1) settore scolastico - comunicativo/collettivo - collettivo - piccole sale conferenze e/o polifunzionali col limite di 250 m³;

2) settore sanitario;

3) settore uffici, con riguardo degli open plan offices;

4) settore ristorazione;

5) settore direzionale commerciale - sportivo - terziario;

6) settore produttivo/industriale - fieristico - espositivo.

Come deve essere verificato e garantito il rispetto di tali parametri?

Come previsto dal decreto, *"il **progettista** deve **dare evidenza** del rispetto del criterio, sia in fase di progetto iniziale che in fase di verifica finale della conformità, conseguendo rispettivamente un **progetto acustico** e una **relazione di conformità** redatta tramite misure acustiche in opera, che attestino il raggiungimento della classe acustica prevista dal criterio e i valori dei descrittori acustici di riferimento ai sensi delle norme UNI 11367, UNI 11444, UNI 11532. Qualora il progetto sia sottoposto ad una verifica valida per la successiva certificazione dell'edificio secondo uno dei protocolli di sostenibilità energetico-ambientali degli edifici (rating systems) di livello nazionale o internazionale, la conformità al presente criterio può essere dimostrata se nella certificazione risultano soddisfatti tutti i requisiti riferibili alle prestazioni ambientali richiamate dal presente criterio."*

TERMINOLOGIA e DEFINIZIONI

Tempo di riverberazione

Il tempo di riverberazione quantifica la "coda sonora" che permane all'interno di un ambiente anche dopo l'interruzione dell'emissione della energia sonora di una sorgente. La riverberazione è causata dalle **riflessioni multiple su pareti, pavimento e soffitto** che le onde sonore subiscono una volta disattivata la sorgente del rumore: essa dipende dalla geometria dell'ambiente, dalle caratteristiche fonoassorbenti delle pareti/solai e dagli oggetti in esso contenuti.

Livello di rumore all'esterno

L'**isolamento acustico di facciata** è il requisito acustico passivo che il D.P.C.M. 5/12/1997 riserva al controllo del rumore proveniente dall'esterno di un'aula scolastica. Come indicato nella norma UNI EN ISO 16283-3:

Per le scuole il D.P.C.M. 5/12/1997 indica un **valore minimo di 48 dB** per il requisito di facciata $D_{2m,nT,w}$: si tratta di un limite sicuramente molto restrittivo soprattutto perché **prescinde totalmente dal clima acustico dell'area** in cui è presente l'edificio scolastico.



Isolamento acustico tra partizioni interne

In un edificio scolastico troviamo partizioni interne verticali e orizzontali che separano le aule e gli altri ambienti scolastici.

Per verificare l'isolamento di una partizione il D.P.C.M. 5/12/1997 utilizza il potere fonoisolante R'_w specificando però che esso **deve essere verificato per le partizioni che separano due unità immobiliari distinte**. La suddetta affermazione ha creato non poche perplessità per la sua applicazione nei confronti delle partizioni che separano due aule scolastiche in quanto è difficile considerarle come unità immobiliari distinte.

L'interpretazione più diffusa è quindi che il D.P.C.M. 5/12/1997 non debba essere applicato per le partizioni tra aule scolastiche; *nell'Appendice A della norma UNI 11367 "Valori di riferimento per i requisiti acustici di ospedali e scuole"* sono introdotti due indici che riguardano le partizioni tra ambienti appartenenti alla stessa unità immobiliare (come le aule scolastiche appunto):

Indice	Prestazione normale [dB]	Prestazione superiore [dB]
Isolamento acustico normalizzato di divisori tra ambienti sovrapposti della stessa unità immobiliare, $D_{nT,w}$	50	55
Isolamento acustico normalizzato di divisori tra ambienti adiacenti della stessa unità immobiliare, $D_{nT,w}$	45	50

TAB.3 - UNI 11367-Appendice A

Livello di pressione sonora di calpestio

Il **livello di pressione sonora di calpestio** è il requisito acustico passivo che il D.P.C.M. 5/12/1997 riserva al controllo del rumore impattivo proveniente dall'esterno di un'aula scolastica. Esso è **misurato** come indicato nella norma UNI EN ISO 16283-2:

Livello di rumore all'interno dovuto agli impianti

Il D.P.C.M. 5/12/1997 richiede per gli impianti il rispetto in opera dei seguenti livelli sonori:

- livello sonoro immesso da impianti **a funzionamento continuo** L_{Aeq}
- livello sonoro immesso da impianti **a funzionamento discontinuo** L_{ASmax}

Per impianti a funzionamento continuo si intendono impianti di riscaldamento, di climatizzazione, di ricambio d'aria, ecc..; per impianti a funzionamento discontinuo, ovvero con un funzionamento non costante tempo, si intendono impianti sanitari, ascensori, montacarichi, ecc...

La norma tecnica di riferimento per la **misurazione opera** del livello di pressione sonora di impianti tecnici negli edifici è la **UNI EN 16032:2005**.

Dal **punto di vista previsionale** di solito si preferisce fornire delle indicazioni sulla posa in opera preventiva di accorgimenti quali rivestimenti esterni che aumentino la massa dei condotti, supporti antivibranti, silenziatori per le bocchette di aerazione.

Negli edifici scolastici è importante distribuire correttamente gli ambienti: i locali tecnici "rumorosi" dovrebbero essere separati dagli ambienti più sensibili adibiti alla permanenza di persone.

Per quanto riguarda i livelli massimi di rumorosità degli impianti nelle scuole la normativa italiana individua 35 dB per L_{ASmax} e 25 dB per L_{Aeq} .

Controllo del rumore esterno

Il parametro acustico su cui agire per il controllo del rumore esterno è l'isolamento acustico di facciata. Per migliorare l'isolamento di facciata occorre innanzitutto agire sul potere fonoisolante dei suoi componenti (parete e serramenti) e sull'isolamento acustico di eventuali piccoli elementi (bocchette d'aria e cassonetti). Una particolare attenzione va riservata ai componenti vetrati, che di solito sono il punto debole della facciata.

Controllo del rumore interno

Per ridurre il rumore generato dagli ambienti adiacenti si interviene sul potere fonoisolante delle partizioni interne (orizzontali e verticali):

- contropareti/controsoffitti
- pavimenti galleggianti

Il **pavimento galleggiante** è un tipico intervento di correzione acustica che coinvolge un solaio: consiste nel realizzare, mediante la posa di uno strato di materiale resiliente, una "vasca" perfettamente isolata rispetto alle strutture portanti dell'edificio e che impedisce la trasmissione delle vibrazioni. Questo intervento permette sia di migliorare il fonoisolamento del solaio ai rumori aerei sia di attenuare la trasmissione di rumori impattivi.

SEMPLICI INTERVENTI DI CORREZIONE ACUSTICA



Correzione del tempo di riverberazione

Per contenere l'**eccessiva riverberazione del suono in un'aula scolastica** si applicano di solito materiali con diverse caratteristiche, in grado di far ottenere tempi di riverberazione adeguati sull'intero spettro di frequenze di interesse.

Di solito i trattamenti acustici in un'aula scolastica prevedono:

- **parete di fondo**: applicazione pannelli fonoassorbenti
- **pareti laterali**: applicazione pannelli fonoassorbenti
- **soffitto**: applicazione controsoffitto con materiale fonoassorbente
- **soffitto**: applicazione sopra la cattedra dell'insegnante di un pannello di materiale riflettente

Nelle figure seguenti sono schematizzati due possibili soluzioni di correzione acustica di un'aula scolastica.

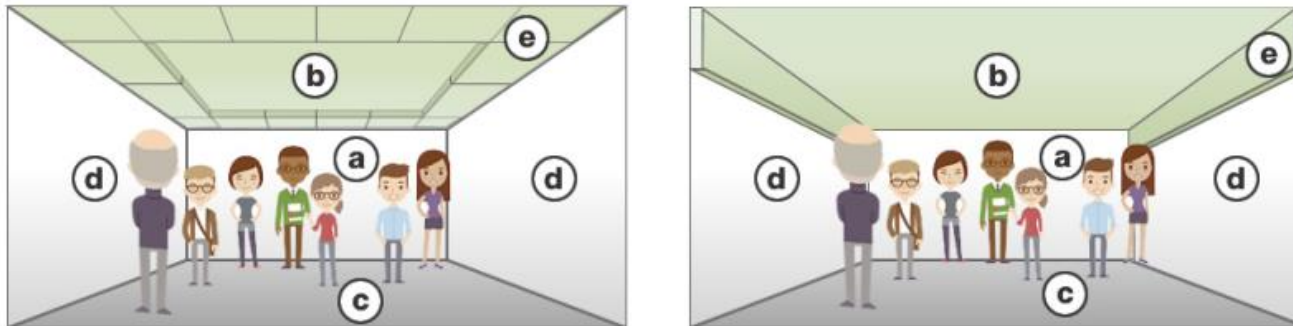


FIG. 1 - Intervento di correzione acustica aula scolastica: possibili soluzioni

- 
- a. muro di fondo fonoassorbente
 - b. soffitto fonoriflettente
 - c. pavimento fonoassorbente
 - d. muri fonoriflettenti
 - e. soffitto fonoassorbente

Categorie di ambienti abitativi	Parametri [dB]				
	R'_w	$D_{2m,nT,w}$	L'_{nw}	L_{ASmax}	L_{Aeq}
Edifici adibiti ad ospedali, cliniche, case di cura	≥ 55	≥ 45	≤ 58	≤ 35	≤ 25
Edifici adibiti a residenze, alberghi, pensioni	≥ 50	≥ 40	≤ 63	≤ 35	≤ 35
Edifici adibiti ad attività scolastiche a tutti i livelli	≥ 50	≥ 48	≤ 58	≤ 35	≤ 25
Edifici adibiti ad uffici, attività ricreative, di culto, commerciali	≥ 50	≥ 42	≤ 55	≤ 35	≤ 35

Tabella 2 – DPCM 5-12-1997 – Valori limite

Un altro aspetto da considerare è il fatto che la versione attuale della norma UNI 11532, documento pubblicato nel 2014, non individua specifici valori limite per tempo di riverbero e STI. Riporta solo alcune tabelle che indicano i valori prescritti per legge in vari paesi per tipologia di ambiente (scuole, ospedali, uffici, ecc.). La norma però è in corso di revisione e la prossima versione definirà nuove prescrizioni.

Il DM 11 gennaio 2017 specifica che i progettisti dovranno **evidenziare il rispetto dei criteri di acustica sia in fase di progetto che in fase di verifica finale**. In particolare sarà necessario realizzare un progetto acustico ante-operam e una relazione di conformità basata su misure acustiche al termine dei lavori.

ESEMPI PRATICI E CONSIDERAZIONI AGGIUNTIVE

Gli edifici scolastici individuati sono rappresentativi delle tecniche costruttive degli anni 70' – 80', antecedenti quindi al D.P.C.M. 5/12/97 riguardante la “Determinazione dei requisiti acustici passivi degli edifici”.

Ulteriore requisito a cui dovevano rispondere le infrastrutture scolastiche da sottoporre al progetto era quello di essere edifici ad almeno un piano e che l'aula presa come rappresentativa dello studio avesse sia un'altra aula adiacente che una sovrastante per poter effettuare le indagini acustiche riguardanti il tempo di riverbero, l'isolamento acustico in opera sia della partizione verticale che della partizione orizzontale e il livello del rumore di calpestio del solaio.

Le prove acustiche sono state eseguite in periodo pomeridiano in giornate in cui le scuole non svolgevano la loro normale attività didattica, senza la presenza degli scolari ma del solo personale di servizio o amministrativo che provvedeva all'apertura della scuola stessa consentendo l'esecuzione delle prove.

Le prove acustiche all'interno delle aule individuate sono state eseguite con i normali arredi, (banchi, sedie, cattedra, armadi, tendaggi).

Le prove acustiche all'interno delle aule individuate sono state eseguite con i normali arredi, (banchi, sedie, cattedra, armadi, tendaggi).

6.3.1 Tempo di riverberazione T

Sono state utilizzate 2 posizioni di sorgente (S1 e S2) e 5 posizioni di microfono (M1, M2, M3, M4, M5) ogni misurazione è stata ripetuta 2 volte per un totale di 20 misure di tempo di riverbero in ciascuna delle aule considerate come riceventi, nelle diverse scuole prese in esame.

L'altezza della sorgente di rumore omnidirezionale (dodecaedro) è stata posta a 1,8 metri di altezza, mentre il microfono è stato posto a 1,5 metri di altezza. Le diverse altezze di sorgente e microfoni e il rispetto delle distanze minime indicate nella norma, servono per rendere il più diffuso possibile il campo sonoro nell'ambiente emittente e per fare in modo che le posizioni dei microfoni siano fuori dal campo diretto della sorgente. E' stato utilizzato come tipologia di rumore generato dalla sorgente omnidirezionale un "rumore rosa", che ha la caratteristica di possedere la stessa energia sonora in ogni banda (d'ottava, di terzi d'ottava ecc..), e quindi di avere un elevato contenuto energetico anche alle basse frequenze. Quest'ultima condizione è utile per poter avere delle misure più affidabili ed evitare problemi di interferenza con il rumore di fondo.

6.3.2 Potere fonoisolante apparente R' (partizione verticale)

Sono state utilizzate 2 posizioni di sorgente (S1, e S2) e 5 posizioni di microfono (M1, M2, M3, M4, M5) nella stanza trasmittente e 5 posizioni di microfono (M1, M2, M3, M4, M5) nella stanza ricevente per un totale di 10 misure di confronto.

L'altezza della sorgente di rumore omnidirezionale (dodecaedro) è stata posta a 1,8 metri di altezza, mentre il microfono è stato posto a

1,5 metri di altezza. E' stato utilizzato come tipologia di rumore generato dalla sorgente omnidirezionale un "rumore rosa".

6.3.3 Potere fonoisolante apparente R' (partizione orizzontale)

Sono state utilizzate 2 posizioni di sorgente (S1, e S2) e 5 posizioni di microfono (M1, M2, M3, M4, M5) nella stanza trasmittente e 5 posizioni di microfono (M1, M2, M3, M4, M5) nella stanza ricevente per un totale di 10 misure di confronto.

L'altezza della sorgente di rumore omnidirezionale (dodecaedro) è stata posta a 1,8 metri di altezza, mentre il microfono è stato posto a 1,5 metri di altezza. E' stato utilizzato come tipologia di rumore generato dalla sorgente omnidirezionale un "rumore rosa".

6.3.4 Livello normalizzato di rumore di calpestio L'_n

Sono state utilizzate 4 posizioni della macchina normalizzata di calpestio nella stanza trasmittente (S1, S2, S3, S4) e 5 posizioni di microfono nella camera ricevente (M1, M2, M3, M4, M5) per un totale di 20 misure di calpestio (5 misure di livello di pressione sonora per ogni posizione della macchina normalizzata di calpestio). I microfoni nella stanza ricevente sono stati posti a 1,5 metri di altezza.

6.3.5 Livello del rumore di fondo

Al termine delle misure per il conseguimento di ogni singolo parametro sopra riportato, è stata eseguita una misurazione del livello del rumore di fondo. Tuttavia la differenza tra i livelli di pressione sonora rilevati in camera ricevente sono sempre risultati maggiori di più di 10 dB rispetto al rumore di fondo. Pertanto non è stato necessario eseguire la correzione dei livelli misurati (prevista dalla norma nel caso di differenze tra livelli misurati e rumore di fondo minori di 10 dB).

7.2.4 Indice di isolamento acustico standardizzato di facciata

Si utilizza il metodo per la misurazione dell'isolamento al rumore aereo di intere facciate (metodo globale). Tale metodo ha lo scopo di stimare la differenza di livello sonoro esterno-interno nelle reali condizioni di traffico. Quando il livello del rumore da traffico non è sufficiente, può essere utilizzato un generatore direzionale di campo sonoro.

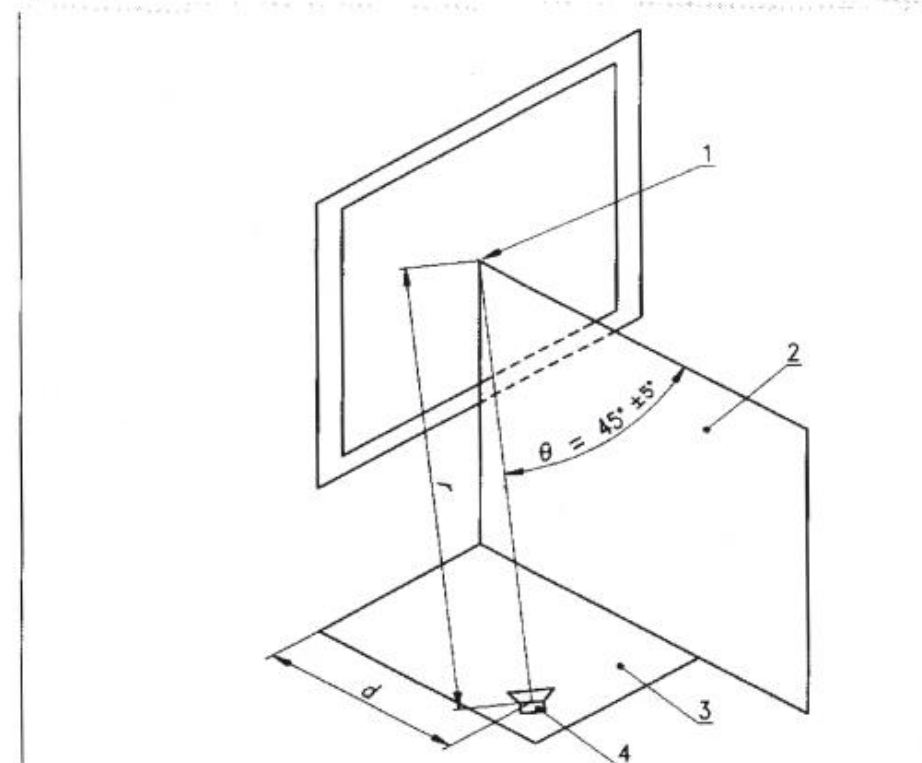
Posizione dell'altoparlante.

Posizionare l'altoparlante in una o più posizioni fuori dall'edificio ad una distanza d dalla facciata con un angolo di incidenza del suono uguale a $45^\circ \pm 5^\circ$ (vedi figura). La distanza r tra la sorgente sonora e il centro del provino deve essere almeno 7 m ($d > 3,5$ m). Affinché la variazione del livello di pressione sonora sul provino sia minimizzata, la sorgente sonora deve essere posizionata direttamente sul terreno o, in alternativa, il più alto possibile dal terreno.

Geometria del metodo con altoparlante

Legenda

- 1 Normale alla facciata
- 2 Piano verticale
- 3 Piano orizzontale
- 4 Altoparlante



Misurazioni davanti alla facciata.

Il microfono deve essere posizionato :

$2 \text{ m} \pm 0,2$ dal piano della facciata, oppure

1 m da un'eventuale balaustra o altre simili sporgenze.

L'altezza del microfono deve essere 1,5 m al di sopra del pavimento dell'ambiente ricevente.

Se la parete principale della facciata è una costruzione in pendenza come un tetto, scegliere la posizione ad una distanza non minore della proiezione della parte verticale della

facciata. Se la stanza è molto grande o se ha più di un muro esterno, usare diverse posizioni della sorgente.

Il livello di rumore così misurato deve essere indicato con $L_{1,2m}$.

Misurazioni con traffico stradale.

Durante le misurazioni, il rumore di fondo (LAF95) nell'ambiente ricevente deve essere almeno 10 dB minore del livello equivalente di pressione sonora misurato. Come sorgente sonora utilizzare il rumore da traffico esistente che incide sul provino. La durata della misurazione deve contenere almeno 50 passaggi di veicoli.

Per tener conto delle possibili fluttuazioni del rumore da traffico, occorre misurare il livello equivalente di pressione sonora contemporaneamente su entrambi i lati del provino. La posizione esterna del microfono è analoga alle misurazioni effettuate con altoparlante.

Misurazioni nell'ambiente ricevente.

Devono essere impiegate almeno cinque posizioni di microfono o un microfono a movimento continuo. In ciascuna posizione del microfono il tempo di misura deve essere pari a 30/40 secondi. Impiegando un microfono mobile il tempo di misura minimo è di 60 secondi.

Distanze minime di separazione:

0,7 m tra le posizioni dei microfoni;

0,5 m tra ciascuna posizione di microfono e le pareti dell'ambiente o i diffusori;

1,0 m tra ciascuna posizione di microfono e la sorgente sonora.

Quando viene utilizzato un microfono mobile, la traiettoria deve avere un raggio di almeno 0,7 m. La durata del periodo di traiettoria non deve essere inferiore di 15 s.

Misurare i livelli del rumore di fondo per assicurarsi che le rilevazioni nell'ambiente ricevente non siano influenzate da rumori estranei. Il livello di fondo deve essere preferibilmente minore di 10 dB rispetto al livello combinato del segnale e del rumore di fondo.

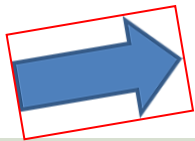
7.2.5 misura del livello di rumorosità degli impianti tecnologici dell'edificio.

Il rumore di impianti tecnologici a funzionamento discontinuo (ascensori, autoclavi, scarichi, erogatori di acqua nei servizi, ecc.) viene valutato con il parametro LASMax livello massimo ponderato A con costante di tempo slow, durante il funzionamento dell'impianto esaminato.

Il rumore di impianti tecnologici a funzionamento continuo (centrali termiche, centrali di aspirazione/ventilazione, ecc.) viene valutato con il parametro LAeq livello equivalente ponderato A, durante il funzionamento dell'impianto esaminato.

Le procedure di misura sono indicate nel Decreto Ministero dell'Ambiente 16 marzo 1998 "Tecniche di rilevamento e di misurazione dell'inquinamento acustico in ambiente abitativo"

APPLICAZIONE DELLA NORMA E METODOLOGIA IN PRATICA



"Misurazioni in opera dell'isolamento acustico per via aerea tra ambienti"

La presente norma definisce il procedimento per la misurazione in opera delle proprietà di isolamento al rumore aereo di pareti interne, pavimenti e porte, tra due ambienti in condizioni di campo acustico diffuso e per la determinazione della protezione fornita agli occupanti dell'edificio.

Strumentazione:

- sorgente sonora omidirezionale;
- Microfoni;
- sistema di acquisizione dei dati.

Metodologia:

- La misurazione del livello medio di pressione sonora viene eseguita attraverso l'utilizzo di un microfono singolo spostato da una posizione alla successiva (o in alternativa di un microfono rotante);
- Occorre impiegare almeno cinque posizioni di microfono uniformemente distribuite sia nell'ambiente emittente che nell'ambiente ricevente.

- I livelli di pressione sonora misurati dai microfoni, per gamma di frequenza tra 100 e 3150 Hz, devono essere mediati su base energetica.
- Un passaggio fondamentale è quello della **misura del rumore di fondo** per assicurare che le rilevazioni nell'ambiente ricevente non siano influenzate da rumori estranei.
- La normativa impone che se la differenza tra il livello di pressione sonora misurato e il rumore di fondo è minore di 10 dB ma maggiore di 6 dB, si deve calcolare la correzione del livello del segnale attraverso l'equazione:

$$L = 10 \lg (10^{L_{sb}/10} - 10^{L_b/10})$$

- L livello corretto del segnale, in decibel;
- L_{sb} livello combinato del segnale e del rumore di fondo, in decibel;
- L_b livello del rumore di fondo, in decibel.

Se, invece, la differenza è minore o uguale a 6 dB, si deve utilizzare una correzione pari a 1,3 dB.

Calcolo di R'

$$R' = L_1 - L_2 + 10 \log \frac{S}{A} \quad [\text{dB}]$$

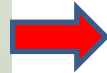
dove:

- L_1 è il livello medio di pressione sonora nell'ambiente di emissione [dB]
- L_2 è il livello medio di pressione sonora nell'ambiente di ricezione [dB]
- S è l'area dell'elemento in prova [m^2]
- A sono le unità assorbenti dell'ambiente ricevente, valutate in base alla:

Calcolo di R'_w : METODOLOGIA DI MISURA

Dopo aver calibrato l'intero sistema di misurazione, i rilievi da effettuare sono:

- una valutazione del tempo di riverberazione dell'ambiente ricevente;
- misure del livello di rumore di fondo dell'ambiente ricevente;
- determinazione del potere fonoisolante apparente, mediante la misura dei livelli nella stanza emittente(L1) e in quella ricevente(L2).



Formula di Sabine

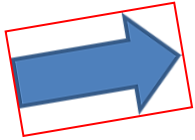
$$t_{60} = 0,16 \frac{V}{A} [s]$$

t_{60} =tempo di riverberazione: tempo necessario affinché la pressione sonora registrata in un punto della sala discenda di 60 dB dal momento dello spegnimento della sorgente

V: volume ambiente ricevente in m^3

Note

- Se l'area di separazione è minore di 10 mq deve essere riportato nel resoconto di prova;
- In tale caso S è il valore più elevato tra s e $V/7.5$, dove V è il volume dell'ambiente ricevente che è il più piccolo;
- Per l'emissione devono essere impiegate almeno 2 posizioni;
- Se gli ambienti hanno volumi molto differenti, l'ambiente più ampio deve essere quello emittente;
- Per il posizionamento dei microfoni (almeno 5 posizioni) si devono rispettare le seguenti condizioni:
 - 0,7 m tra le posizioni dei microfoni;
 - 0,5 m tra ciascuna posizione di microfono e le pareti dell'ambienti;
 - 1,0 m tra ciascuna posizione di microfono e la sorgente sonora
- Il tempo di integrazione deve essere maggiore di 6 secondi.
- per la misura del tempo di riverberazione nell'ambiente ricevente devono essere misurati almeno sei decadimenti con almeno una posizione della sorgente e tre dei microfono con due letture ciascuno



MISURA DELL'ISOLAMENTO ACUSTICO DI FACCIATA NORMALIZZATO RISPETTO AL TEMPO DI RIVERBERAZIONE $D_{2m,nT}$

L'isolamento acustico di facciata, normalizzato rispetto al tempo di riverberazione, ($D_{2m,nT}$) è definito da:

$$D_{2m,nT} = D_{2m} + 10 \log_{10}(T/T_0)$$

$$D_{2m} = L_{1,2m} - L_2;$$

$L_{1,2m}$ è il livello di pressione sonora esterno a 2 metri dalla facciata;

L_2 è il livello di pressione sonora medio nell'ambiente ricevente

T è il tempo di riverberazione nell'ambiente interno ricevente, in secondi;

T_0 è il tempo di riverberazione di riferimento assunto pari a 0,5 secondi.

Metodologia di misura

**Misure con il metodo
dell'altoparlante**

**Misure con traffico
stradale**

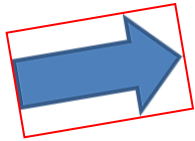
Posizionamento altoparlante

- distanza di 5 m dalla facciata
- distanza di 7 m rispetto al centro del provino
- angolo di incidenza del suono pari a $(45\pm 5)^\circ$ rispetto al centro della facciata

- Le misure del livello di pressione sonora **all'esterno** saranno determinate invece posizionando il fonometro all'esterno a metà della larghezza della facciata, ad una distanza di 2 m dal piano della facciata e ad un'altezza di 1,5 m al di sopra del pavimento dell'ambiente ricevente.

- Le misure saranno effettuate in bande di terzo di ottava, nel range 100 – 5000 Hz e sarà generato un **rumore rosa per un tempo pari a 10 s.**

- Per ogni posizione dell'altoparlante (una per ciascuna facciata), il livello di pressione sonora nell'ambiente ricevente è determinato utilizzando un microfono, spostato da una posizione alla successiva (cinque posizioni) e mediando i livelli di pressione sonora, rilevati nelle 5 diverse posizioni microfoniche, su base energetica. La misura è ottenuta attraverso l'utilizzo di un singolo microfono spostato almeno in 5 posizioni differenti uniformemente distribuite nell'ambiente ricevente rispettando le seguenti condizioni:
 - 0,7 m tra le posizioni dei microfoni;
 - 0,5 m tra ciascuna posizione di microfono e le pareti dell'ambienti;
 - 1,0 m tra ciascuna posizione di microfono e la sorgente sonora



MISURA DEL LIVELLO DI PRESSIONE SONORA DI CALPESTIO NORMALIZZATO L'_n

- Strumentazione:
 - generatore di rumore di calpestio normalizzato (Il generatore deve essere provvisto di cinque martelli);
 - un microfono;
 - sistema di acquisizione dei dati.

Metodologia

- Il generatore normalizzato di calpestio deve essere posto in almeno quattro posizioni diverse mantenendo una distanza minima con il bordo del pavimento di 0,5 m, inoltre, la linea congiungente i martelli deve essere orientata a 45° rispetto all'asse delle travi.
- La misura è ottenuta attraverso l'utilizzo di un singolo microfono spostato almeno in quattro posizioni differenti uniformemente distribuite nell'ambiente ricevente rispettando le seguenti condizioni:
 - ✓ 0,7 m tra le posizioni dei microfoni;
 - ✓ 0,5 m tra ciascuna posizione di microfono e le pareti dell'ambiente;
 - ✓ 1,0 m tra ciascuna posizione di microfono e il solaio superiore eccitato dal generatore di calpestio.
- Il tempo di integrazione deve essere di almeno 6 secondi per ciascuna banda di frequenza con frequenza centrale minore di 400 Hz, mentre per bande più elevate è possibile la diminuzione fino a 4 secondi.
- I livelli di pressione sonora misurati dal microfono, per gamma di frequenza tra 100 e 3150 Hz, devono essere mediati su base energetica

Una volta corretto il livello di pressione sonora rispetto al rumore di fondo e dopo aver calcolato l'area equivalente di assorbimento con la formula di Sabine, la norma impone che il livello di pressione sonora di calpestio normalizzato rispetto all'assorbimento acustico deve essere calcolato con la formula:

$$L'_n = L + 10 \lg A/A_0$$

dove:

- L livello di pressione sonora di calpestio, in decibel;
- A area, in metri quadri, di assorbimento equivalente nell'ambiente ricevente;
- A₀ area di assorbimento equivalente di riferimento, pari a 10 m².

Calcolo di L'_n : METODOLOGIA DI MISURA

Dopo aver calibrato l'intero sistema di misurazione, i rilievi da effettuare sono:

- una valutazione del tempo di riverberazione dell'ambiente ricevente;
- misure del livello di livello di rumore di fondo dell'ambiente ricevente;
- determinazione di L'_n , mediante la misura dei livelli sonoro di calpestio in quella ricevente(L').

NORMA UNI 11367

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	≥ 0	$\geq 0,6$
Ambienti adibiti ad attività sportive	≥ -2	$\geq 0,5$

- $T_{ott} = 0,32 \log (V) + 0,03$ 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.

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 compresa fra i 250 Hz e i 4000 Hz:

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

ESEMPIO SCUOLA CON NORMA 11367

Nell'ambito della zonizzazione acustica comunale il complesso è localizzato in classe III.

Gli ambienti sono distribuiti su tre livelli parzialmente sovrapposti.

La struttura dell'edificio è in cemento armato non intonacato, le finestrate 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 vetrati, con un

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

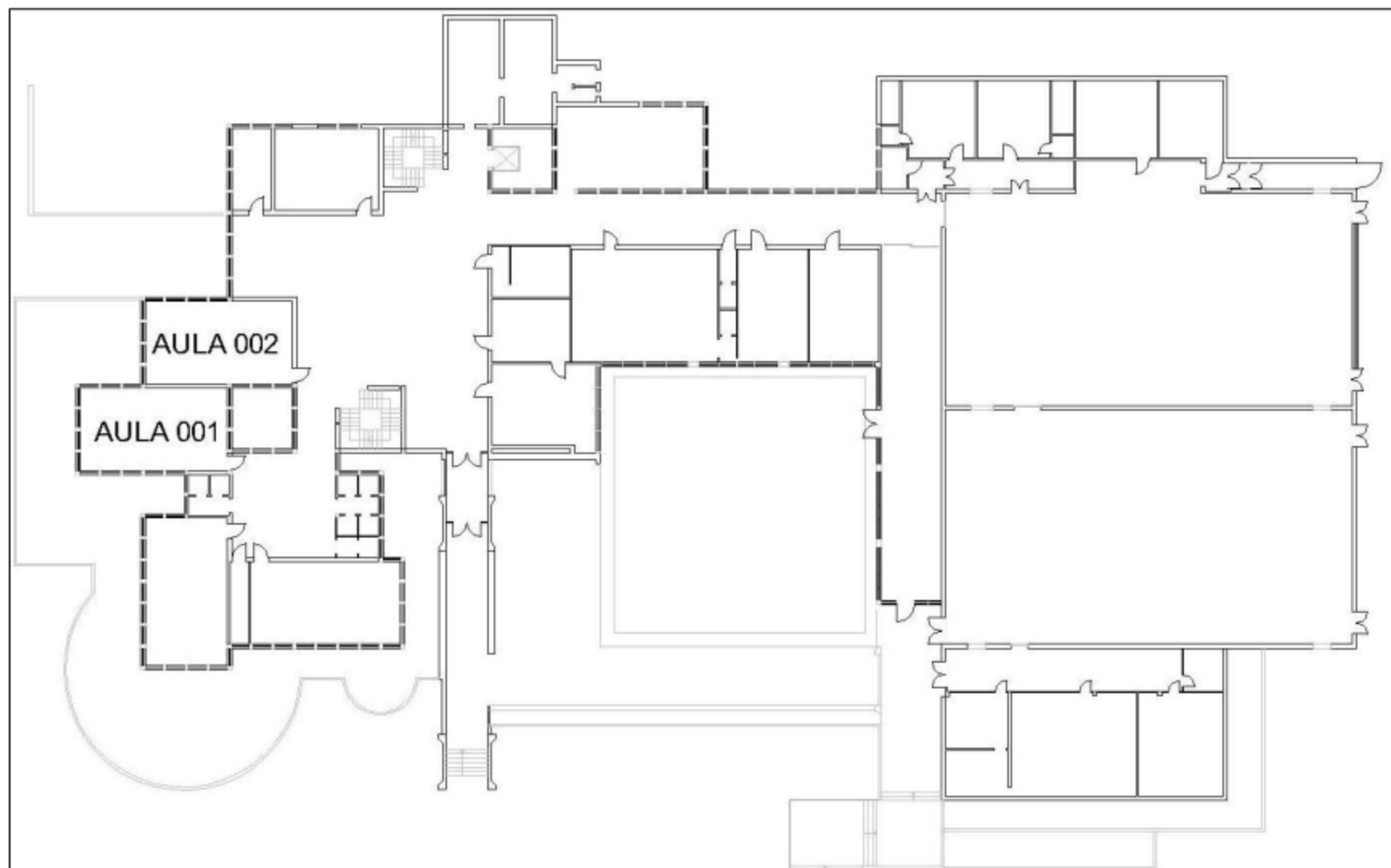


Figura 5.3- Pianta del piano terra

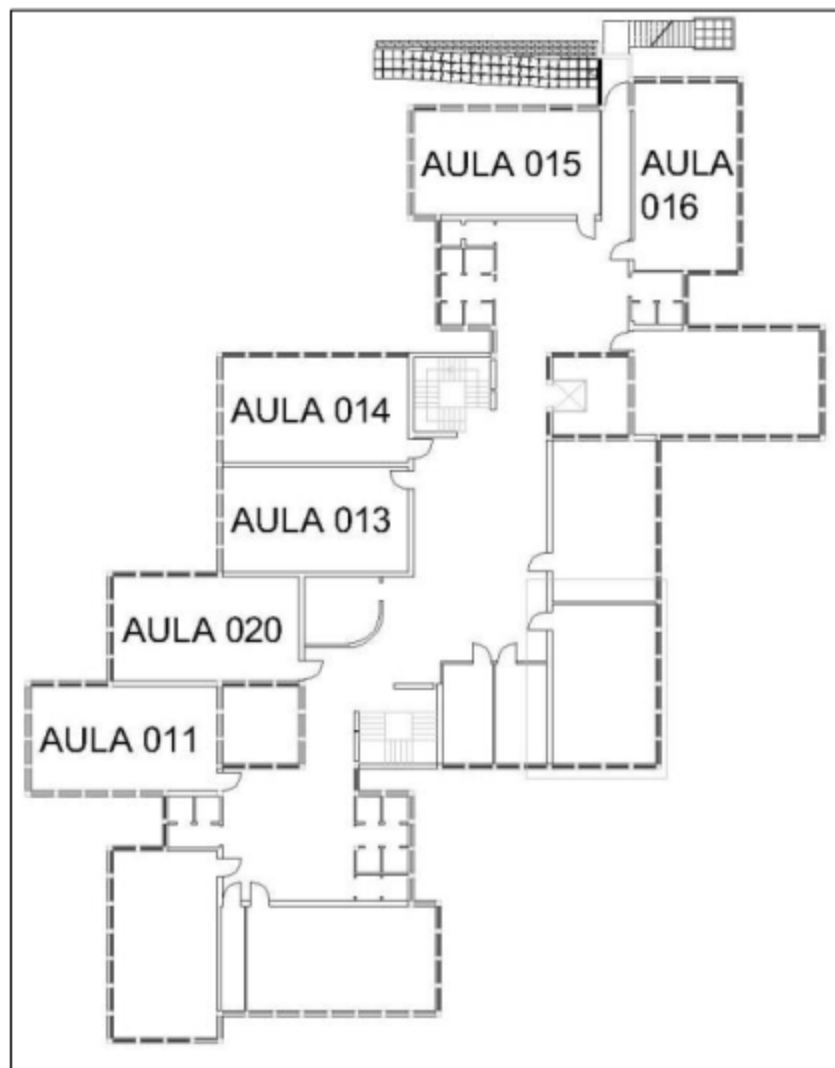


Figura 5.4- Pianta del piano terra

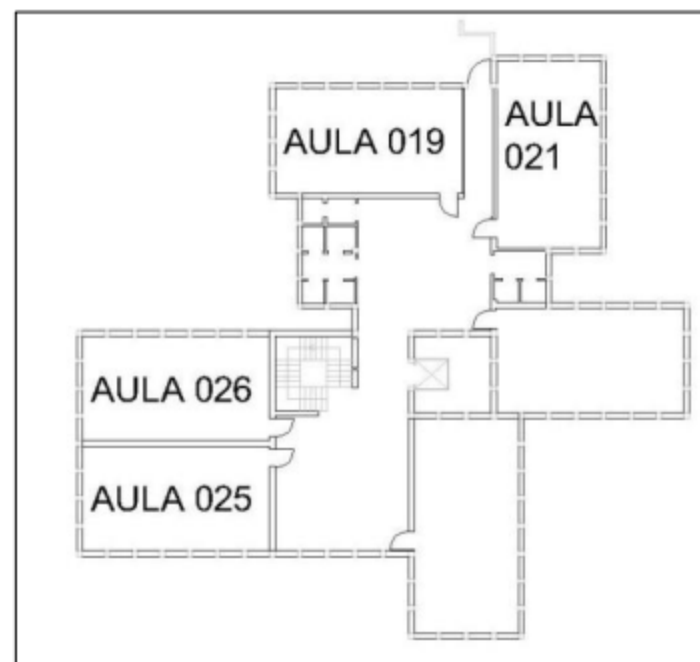


Figura 5.5 - Pianta del piano terra

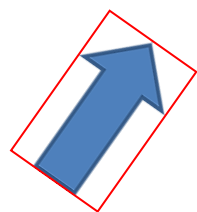
Le aule sono costituite da un modulo spaziale che presenta dimensioni pressoché costanti: il volume è di circa 178m^3 , la superficie calpestabile è 58m^2 , la distanza tra il piano del pavimento e l'intradosso del soffitto è 3 metri.

- La struttura di sostegno è in cemento armato: pilastri 30×40 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 cassettone 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 30×40 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 15×15 cm.

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



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.

tempi di riverberazione

norma UNI EN ISO16283-1.

Procedura di misura

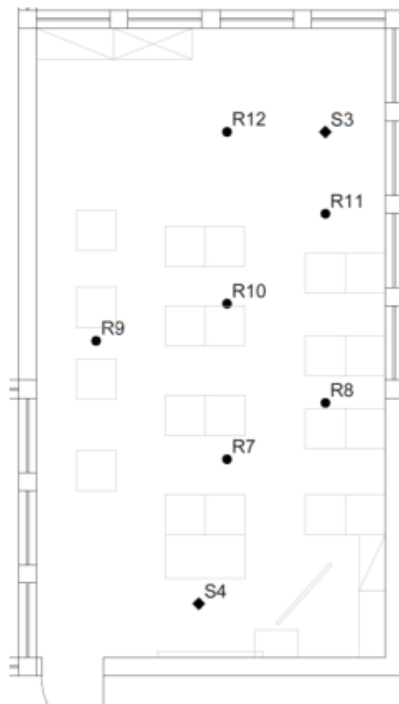


Figura 5.5 - Aula 002: posizioni microfoniche R e della sorgente S

La misura dei tempi di riverberazione delle aule sono stati eseguiti ponendo nell'ambiente arredato in oggetto, sia il dodecaedro che IL FONOMETRO. 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.

esempio, sono illustrati i risultati delle misure ottenute nell'aula 002 e gli schemi dei punti di misura nell'ambiente, figura 5.5.

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.

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

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.

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:

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

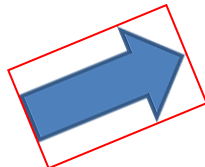
Tabella 5.4a- Confronto tra i valori dei T60 misurati nelle aule e le prescrizioni del DPCM del '97

DPCM 5/12/1997	n° AULA	001	002	011	013	014	015	016	020	025	026
	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

norma UNI EN ISO16283-1.

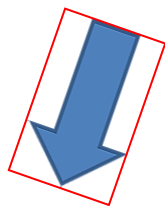
Anche la norma UNI 11367 suggerisce una valutazione basata sui valori ottimali dei tempi di riverbero in funzione del volume dell'ambiente. Come abbiamo visto nel capitolo 3.2.1, i valori ottimali medi tra i 500 e 1000 Hz per ambienti non occupati adibiti al parlato sono ricavabili dalla seguente espressione,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

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



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:

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



Il DM 11 gennaio 2017 sui “Criteri ambientali minimi” ha introdotto, per le gare di appalto degli edifici pubblici, alcune importanti novità sul tema del comfort acustico.

Nell’Allegato 2 al Paragrafo 2.3.5.6 si legge che:

- I valori dei requisiti acustici passivi dell’edificio devono corrispondere almeno a quelli della **Classe II** della norma UNI 11367 (Tabella 1)
- I requisiti acustici passivi di ospedali, case di cura e scuole devono soddisfare il livello di “**prestazione superiore**” riportato nell’Appendice A della UNI 11367 .
- L’isolamento acustico tra ambienti di uso comune ed ambienti abitativi deve rispettare almeno i valori caratterizzati come “**prestazione buona**” nell’Appendice B della UNI 11367
- Gli ambienti interni devono essere idonei al raggiungimento dei valori di tempo di riverbero (T) e intelligibilità del parlato (STI) indicati nella norma UNI 11532.



Descrittore	Classe II
Isolamento di facciata $D_{2m,nT,w}$ [dB]	≥ 40
Isolamento ai rumori tra unità immobiliari R'_w [dB]	≥ 53
Livello di rumori da calpestio L'_{nw} [dB]	≤ 58
Livello di rumore impianti continui L_{ic} [dBA]	≤ 28
Livello di rumore impianti discontinui L_{id} [dBA]	≤ 33

Tabella 1 – Norma UNI 11367 - Valori di Classe II

Misure del potere fonoisolante apparente di pareti e solai

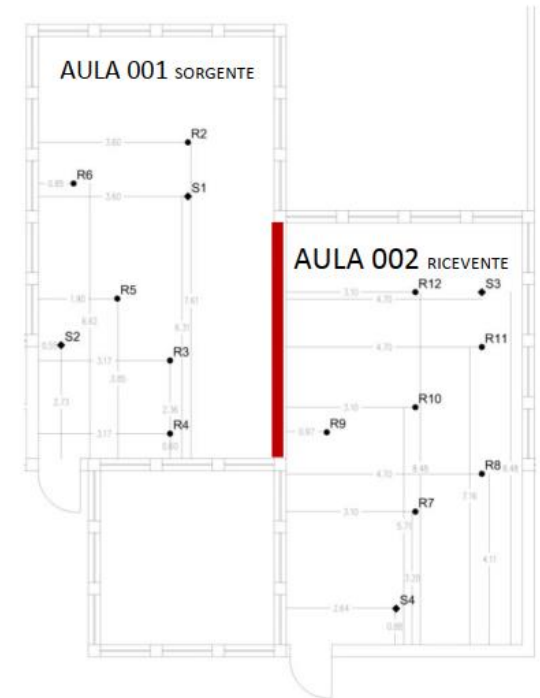
Procedura di misura

norma UNI EN ISO16283-1.

La misura del potere fonoisolante apparente R di pareti e 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.

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.



misura durata di tempo di 20 secondi.

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.

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

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 .

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:

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

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 $16,9\text{m}^2$.

A è l'area di assorbimento equivalente:

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

V volume dell'ambiente di prova, circa 178m^3 ;

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.

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

Misure del livello di pressione sonora di calpestio

norma UNI EN ISO16283-1.

sorgente il generatore normalizzato 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.

Procedura di misura

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,

l'acquisizione è avvenuta per un intervallo di tempo di 20 secondi.



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.

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

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

Si sottrae il rumore di fondo L_F 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 m^2 .

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

Misure del dell'isolamento acustico di facciata

norma UNI EN ISO16283-1.

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

Procedura di misura

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*.

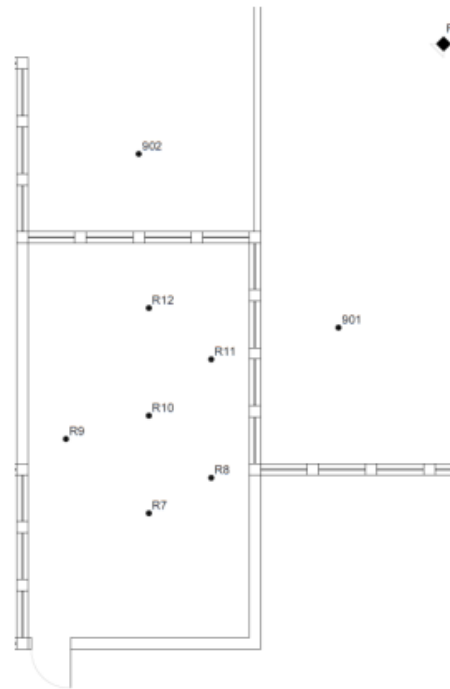
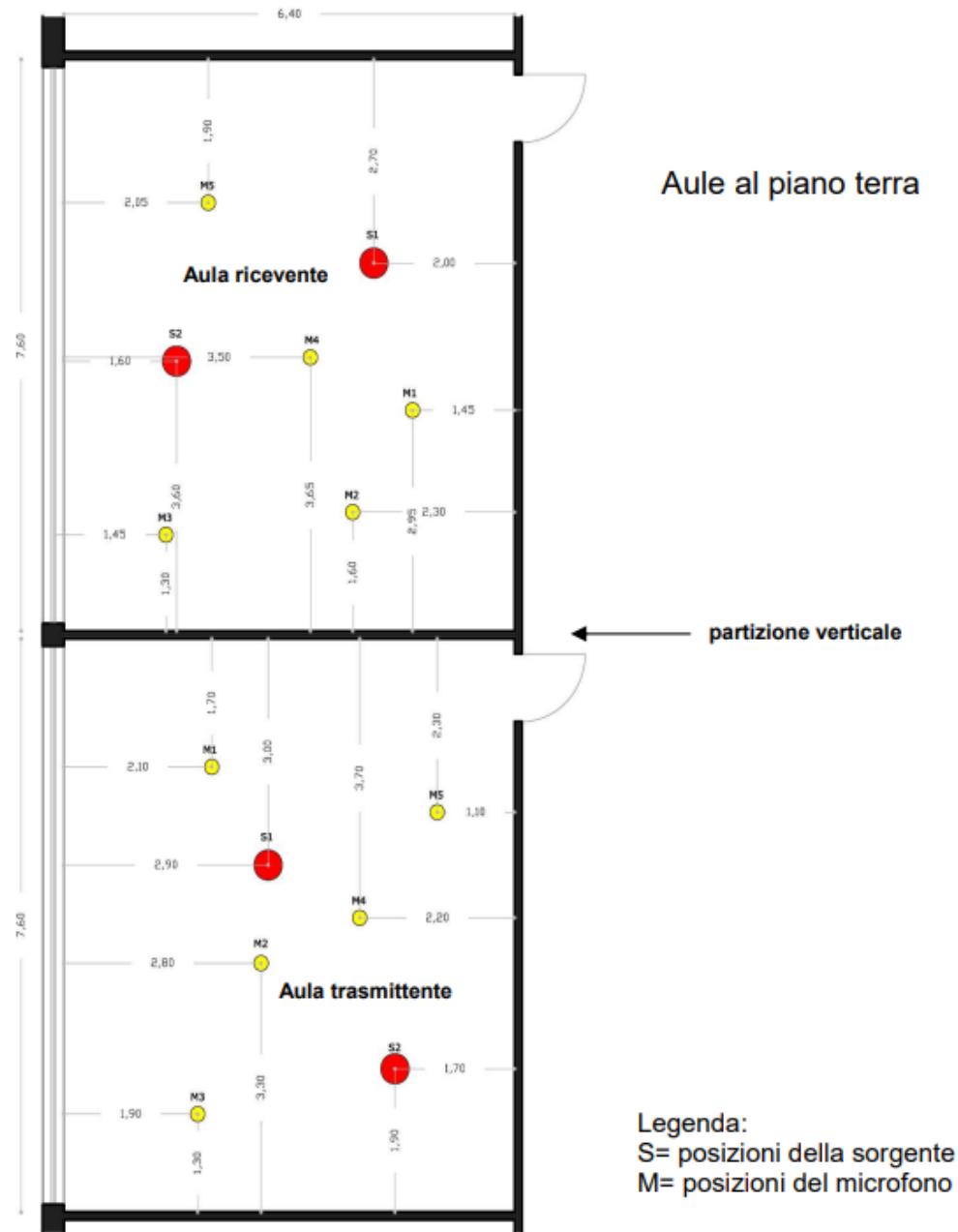


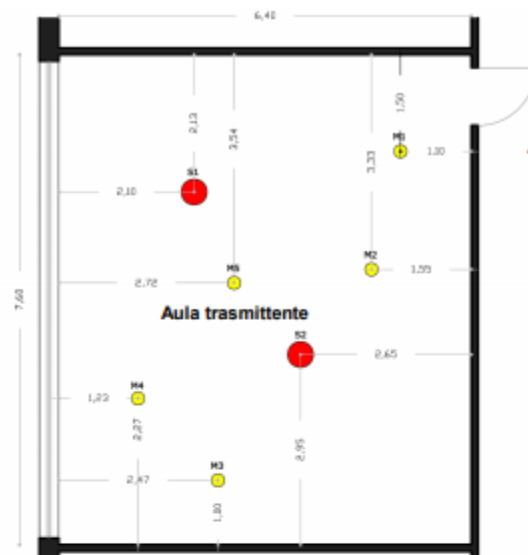
Figura 5.18- Pianta dell'aula ricevente 002, sono indicate le posizioni microfoniche, interne ed esterne, e la posizione della sorgente elettroacustica

sorgente sonora per una durata di 20 secondi.

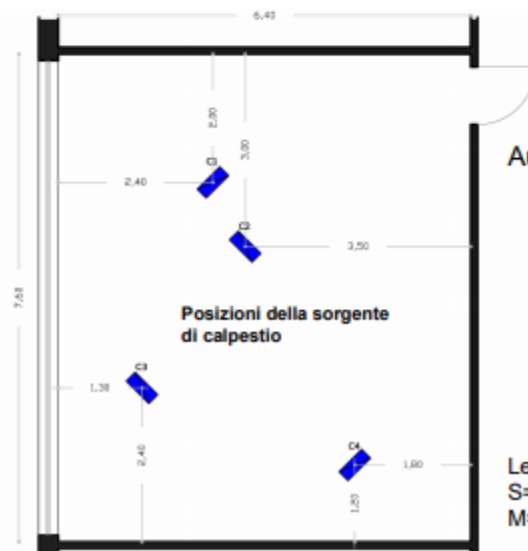
CASO PRATICO

7.1 Piante delle aule





Aula al primo piano



Aula al primo piano

Legenda:

S= posizioni della sorgente

M= posizioni del microfono

7.2 Rilevazione del tempo di riverbero stanza ricevente

Si riportano i valori del tempo di riverbero rilevati in ciascuna combinazione di posizione di misura e posizione di sorgente, nonché il valor medio, che è stato poi utilizzato per il calcolo degli R' e dell' L'_n

TEMPO DI RIVERBERO SCUOLA n.1											
FREQUENZA [Hz]	S1 M1 [s]	S1 M2 [s]	S1 M3 [s]	S1 M4 [s]	S1 M5 [s]	S2 M1 [s]	S2 M2 [s]	S2 M3 [s]	S2 M4 [s]	S2 M5 [s]	MEDIA [s]
100	1.46	1.55	1.49	1.67	1.52	1.45	1.45	1.32	1.67	1.39	1.53
125	2.12	1.55	1.47	1.18	1.25	0.91	0.91	1.79	1.54	1.36	1.47
160	1.35	1.63	1.62	1.81	1.87	1.60	1.60	1.65	1.45	1.59	1.61
200	1.69	1.34	1.36	1.70	1.63	1.39	1.39	1.50	1.61	1.60	1.55
250	1.35	1.19	1.13	1.49	1.31	1.43	1.43	1.29	1.42	1.29	1.35
315	1.55	1.49	1.45	1.39	1.10	1.61	1.61	1.60	1.35	1.56	1.45
400	1.66	1.42	1.49	1.44	1.34	1.68	1.68	1.56	1.33	1.34	1.47
500	1.37	1.28	1.47	1.26	1.50	1.66	1.66	1.34	1.41	1.67	1.45
630	1.30	1.34	1.34	1.60	1.53	1.34	1.34	1.22	1.51	1.58	1.42
800	1.73	1.29	1.24	1.44	1.51	1.40	1.40	1.28	1.47	1.43	1.45
1000	1.34	1.50	1.47	1.30	1.54	1.37	1.37	1.58	1.56	1.36	1.44
1250	1.44	1.27	1.36	1.43	1.63	1.44	1.44	1.43	1.42	1.32	1.40
1600	1.36	1.37	1.18	1.51	1.36	1.37	1.37	1.26	1.40	1.32	1.36
2000	1.32	1.34	1.38	1.24	1.30	1.47	1.47	1.26	1.35	1.40	1.33
2500	1.16	1.26	1.28	1.25	1.30	1.18	1.18	1.30	1.36	1.39	1.28
3150	1.23	1.28	1.19	1.18	1.33	1.22	1.22	1.16	1.29	1.20	1.23

7.3 Determinazione del potere fonoisolante apparente della partizione verticale R' e del rispettivo indice di valutazione R'_w

Di seguito si riportano le tabelle contenenti i livelli di pressione sonora misurati, in conformità con la UNI EN ISO 140-4 nella stanza trasmittente e ricevente.

Le posizioni della sorgente sono identificate con la sigla S1 e S2 e le posizioni del microfono con la sigla M1, M2, M3, M4, M5.

LIVELLO DI PRESSIONE SONORA STANZA TRASMITTENTE (L1)											
SCUOLA n.1											
FREQUENZA [Hz]	S1 M1 [dB]	S1 M2 [dB]	S1 M3 [dB]	S1 M4 [dB]	S1 M5 [dB]	S2 M1 [dB]	S2 M2 [dB]	S2 M3 [dB]	S2 M4 [dB]	S2 M5 [dB]	Media Energetica [dB]
100	88.8	89.0	88.0	88.2	88.7	89.9	89.3	89.1	91.0	92.0	89.6
125	91.6	92.7	90.9	95.1	92.5	92.9	92.5	94.5	91.6	91.9	92.8
160	93.7	97.2	91.1	93.7	93.9	98.5	96.1	99.3	96.1	95.7	96.1
200	93.8	95.4	92.7	95.1	91.2	91.9	92.5	93.0	92.8	88.8	93.1
250	93.0	94.6	90.1	93.5	94.2	90.1	95.5	95.0	94.0	90.8	93.5
315	95.5	92.7	92.3	93.6	91.4	91.5	94.4	94.8	91.8	91.8	93.2
400	92.3	92.1	92.1	92.9	91.6	91.7	93.0	91.9	91.2	90.6	92.0
500	93.0	93.9	92.3	94.8	91.3	92.2	92.4	92.0	92.9	89.0	92.6
630	93.4	92.1	91.2	92.0	91.1	91.6	92.4	92.5	91.9	91.2	92.0
800	93.2	93.8	92.5	91.6	92.7	90.1	93.5	93.0	93.0	90.5	92.5
1000	92.2	93.1	92.2	92.8	91.8	91.4	91.9	92.0	92.3	92.0	92.2
1250	91.2	93.3	92.0	91.9	92.1	92.5	92.3	91.6	93.2	91.2	92.2
1600	94.4	95.8	94.3	93.8	94.1	93.0	94.1	93.7	93.3	93.1	94.0
2000	97.7	98.7	97.4	97.9	97.3	97.2	97.6	97.8	97.2	97.3	97.6
2500	94.7	97.4	94.9	96.3	95.3	95.8	96.1	95.5	95.3	94.7	95.7
3150	94.6	96.0	94.6	96.1	95.1	94.4	95.1	95.4	95.7	95.4	95.3

LIVELLO DI PRESSIONE SONORA STANZA RICEVENTE (L2)**SCUOLA n.1**

FREQUENZA [Hz]	S1 M1 [dB]	S1 M2 [dB]	S1 M3 [dB]	S1 M4 [dB]	S1 M5 [dB]	S2 M1 [dB]	S2 M2 [dB]	S2 M3 [dB]	S2 M4 [dB]	S2 M5 [dB]	Media Energetica [dB]
100	55.4	53.1	51.8	54.9	53.1	56.3	58.8	56.3	57.0	53.4	55.5
125	58.5	56.7	53.9	54.4	60.0	57.2	57.7	54.4	54.7	58.3	57.0
160	61.3	60.1	60.4	61.9	60.7	59.2	59.4	59.1	59.8	61.2	60.4
200	56.6	55.3	54.7	54.0	53.7	53.9	55.1	54.5	54.3	55.7	54.9
250	56.4	55.3	53.3	55.0	54.4	53.5	54.3	54.5	53.7	53.8	54.5
315	55.6	54.2	54.9	55.3	55.0	53.5	53.6	54.7	53.0	55.6	54.6
400	51.8	52.9	52.1	51.7	52.9	53.1	51.2	52.7	51.8	53.6	52.4
500	52.6	52.2	51.9	51.7	52.2	51.4	51.6	52.6	51.4	51.6	51.9
630	50.9	50.3	50.3	51.5	50.1	51.9	52.0	50.5	51.3	51.4	51.1
800	51.3	50.7	49.7	50.2	49.0	50.2	49.9	50.2	49.7	48.9	50.0
1000	49.7	49.5	49.1	48.8	48.4	49.4	49.0	49.0	48.4	47.3	48.9
1250	47.6	47.2	48.8	47.5	48.0	48.5	48.0	47.3	47.4	47.0	47.8
1600	47.2	47.3	47.9	47.4	47.4	46.7	47.6	47.3	47.1	46.6	47.3
2000	49.3	49.1	49.8	49.1	49.5	48.7	49.2	49.1	48.8	48.5	49.1
2500	48.4	48.2	48.7	49.3	48.4	48.0	47.9	47.7	48.7	47.8	48.3
3150	48.9	48.6	48.3	49.9	49.5	48.5	49.0	48.8	49.3	48.8	49.0

Potere fonciolante apparente secondo la UNI EN ISO 140-4:2000
Misurazione in opera dell'isolamento acustico per via aerea tra ambienti

Data della prova: 09/10/08

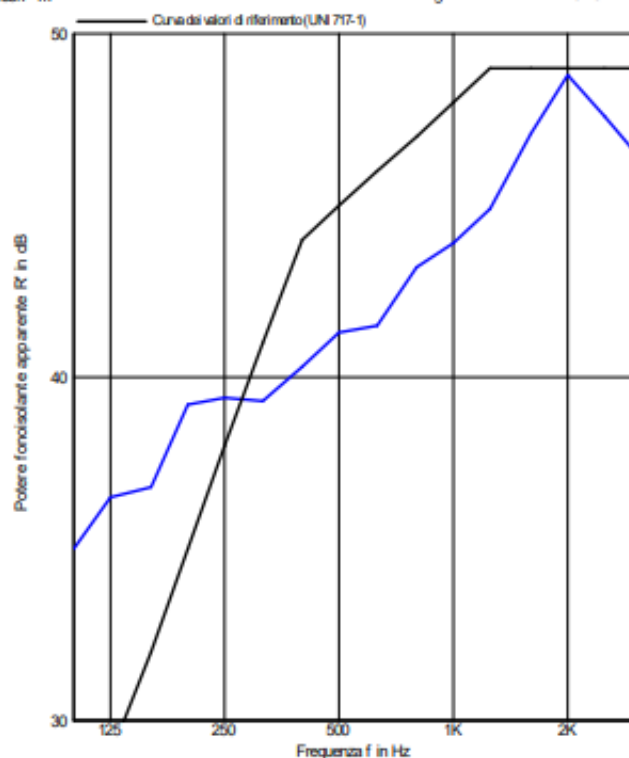
Scuola Media n. 1

Area S del divisorio:
Volume dell'ambiente emittente:
Volume dell'ambiente ricevente:

20.5 m²
155.7 m³
155.7 m³

Somma degli scarti sfavorevoli: 31.8 dB

Frequenza f Hz	R' Terzo di ottava dB
100	35.0
125	36.5
160	36.8
200	39.2
250	39.4
315	39.3
400	40.3
500	41.3
630	41.5
800	43.2
1000	43.9
1250	44.9
1600	47.1
2000	48.8
2500	47.6
3150	46.3



Valutazione secondo la ISO 717-1

$R'_w (C; C_{tr}) = 45 \quad (-1; -2) \text{ dB}$

Valutazione basata su risultati di misurazioni in opera
ottenute in terzi di ottava mediante un metodo tecnico progettuale

7.4 Determinazione del potere fonoisolante apparente della partizione orizzontale R' e del rispettivo indice di valutazione R'_w

LIVELLO DI PRESSIONE SONORA STANZA TRASMITTENTE (L1)											
SCUOLA n.1											
FREQUENZA [Hz]	S1 M1 [dB]	S1 M2 [dB]	S1 M3 [dB]	S1 M4 [dB]	S1 M5 [dB]	S2 M1 [dB]	S2 M2 [dB]	S2 M3 [dB]	S2 M4 [dB]	S2 M5 [dB]	Media Energetica [dB]
100	88.8	88.8	92.5	90.3	93.0	87.1	90.3	89.6	92.5	90.8	90.7
125	90.9	90.4	94.2	95.5	92.1	91.4	91.9	96.0	90.8	90.6	92.9
160	92.4	90.3	93.7	96.5	95.4	90.7	98.3	93.5	90.4	95.1	94.4
200	93.3	93.4	94.7	93.3	91.8	90.2	92.7	95.2	89.3	93.0	93.0
250	94.7	94.6	92.3	93.9	91.6	90.3	93.5	94.2	93.8	92.3	93.3
315	92.8	93.3	93.6	94.6	88.9	90.5	93.0	92.0	92.2	91.6	92.5
400	89.6	89.9	89.7	94.5	91.6	90.0	92.3	92.3	91.2	93.1	91.7
500	90.9	90.2	89.4	93.1	92.7	90.4	94.7	92.1	92.2	93.5	92.2
630	92.2	92.5	90.1	91.5	91.0	89.6	90.8	91.4	90.6	90.9	91.1
800	91.7	91.8	90.8	92.4	90.9	90.6	92.2	92.4	93.9	91.1	91.9
1000	90.7	91.0	91.4	92.9	92.5	90.1	91.6	92.7	92.3	92.3	91.8
1250	93.0	93.3	91.4	92.8	92.0	92.0	91.7	92.4	91.8	91.1	92.2
1600	93.3	93.3	93.3	95.5	93.8	93.1	94.3	93.3	94.0	93.7	93.8
2000	97.3	97.1	96.8	97.8	97.5	96.6	97.4	98.1	96.6	97.8	97.3
2500	95.4	95.3	94.6	96.4	96.0	95.2	95.8	96.1	94.9	95.7	95.6
3150	95.0	95.3	94.3	96.5	95.9	93.8	95.4	95.3	94.9	95.1	95.2

LIVELLO DI PRESSIONE SONORA STANZA RICEVENTE (L2)
SCUOLA n.1

FREQUENZA [Hz]	S1 M1 [dB]	S1 M2 [dB]	S1 M3 [dB]	S1 M4 [dB]	S1 M5 [dB]	S2 M1 [dB]	S2 M2 [dB]	S2 M3 [dB]	S2 M4 [dB]	S2 M5 [dB]	Media Energetica [dB]
100	57.0	57.4	60.9	54.3	61.1	57.5	54.0	57.4	58.9	57.1	58.1
125	57.7	57.2	56.7	56.6	61.9	58.5	58.8	60.2	60.8	59.7	59.2
160	64.0	57.2	62.2	61.3	60.9	64.4	61.9	63.9	60.7	61.4	62.2
200	53.6	54.7	54.1	56.4	53.0	55.1	53.2	53.4	55.0	56.2	54.6
250	53.2	54.3	52.4	52.9	51.8	53.0	54.2	52.6	55.1	54.4	53.5
315	49.9	51.2	51.0	52.3	51.3	51.0	50.5	50.8	51.5	50.5	51.0
400	47.6	49.1	47.2	49.7	48.4	47.7	48.2	47.0	48.1	48.0	48.2
500	46.7	46.8	45.4	45.3	45.7	46.2	44.7	44.8	46.9	45.4	45.9
630	45.3	44.4	45.1	45.9	43.7	45.4	44.0	44.0	44.2	43.5	44.6
800	46.8	43.7	45.3	44.5	45.6	45.6	45.0	45.5	44.5	44.0	45.1
1000	43.9	43.6	42.6	43.1	43.1	43.7	43.1	44.4	42.9	43.7	43.4
1250	42.8	42.6	42.2	41.9	41.8	43.3	42.5	42.2	42.2	41.6	42.3
1600	42.7	42.4	42.3	43.3	41.4	42.3	43.5	42.6	43.3	42.3	42.7
2000	43.8	43.5	43.2	44.4	43.1	43.7	43.6	42.6	43.7	43.5	43.5
2500	40.8	40.8	40.4	40.9	40.8	40.6	40.9	41.2	40.7	39.8	40.7
3150	37.0	37.7	37.1	37.2	37.3	37.1	37.7	38.0	37.5	37.0	37.4

Potere fonoisolante apparente secondo la UNI EN ISO 140-4:2000
Misurazione in opera dell'isolamento acustico per via aerea tra ambienti

Data della prova: 09/10/08

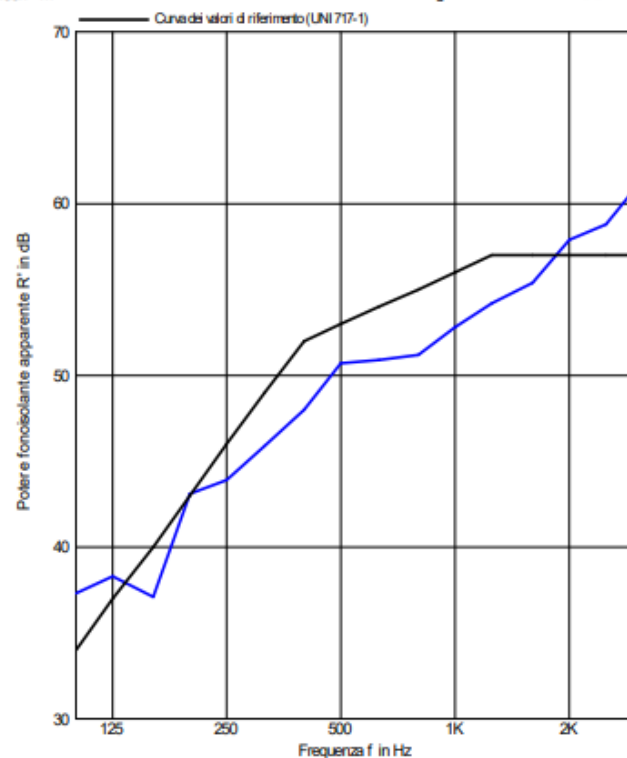
Scudia Media n.1

Area S del divisorio:
Volume dell'ambiente emittente:
Volume dell'ambiente ricevente:

48.7 m²
155.7 m³
155.7 m³

Somma degli scarti sfavorevoli: 28.9 dB

Frequenza f Hz	R' Terzo di ottava dB
100	37.3
125	38.3
160	37.1
200	43.1
250	43.9
315	45.9
400	48.0
500	50.7
630	50.9
800	51.2
1000	52.8
1250	54.2
1600	55.4
2000	57.9
2500	58.8
3150	61.5



Valutazione secondo la ISO 717-1

$R'_w (C; C_v) = 53 \quad (-1; -5) \text{ dB}$

Valutazione basata su risultati di misurazioni in opera
ottenute in terzi di ottava mediante un metodo tecnico progettuale

calpestio L'_n e del rispettivo indice di valutazione L'_{nw}

Di seguito si riportano le tabelle contenenti i livelli di pressione sonora misurati, in conformità con la UNI EN ISO 140-7 nella stanza ricevente.

Le posizioni della macchina di calpestio sono identificate con la sigla S1, S2, S3, S4 e le posizioni del microfono con la sigla M1, M2, M3, M4, M5.

LIVELLO DI CALPESTIO SCUOLA n.1										
FREQUENZA [Hz]	S1 M1 [dB]	S1 M2 [dB]	S1 M3 [dB]	S1 M4 [dB]	S1 M5 [dB]	S2 M1 [dB]	S2 M2 [dB]	S2 M3 [dB]	S2 M4 [dB]	S2 M5 [dB]
100	52.9	54.9	58.2	55.1	56.8	54.3	58.8	57.1	59.7	57.6
125	56.2	56.3	57.6	57.8	59.8	61.0	61.5	59.1	60.4	60.2
160	58.1	61.0	58.3	60.2	60.4	61.7	61.9	62.5	60.3	62.4
200	57.6	58.5	60.2	60.0	59.9	58.9	59.9	62.4	62.2	60.3
250	60.5	62.9	60.3	62.9	60.5	63.3	62.8	63.0	64.3	63.7
315	65.6	64.9	62.1	64.9	62.4	63.4	63.2	63.2	64.3	63.3
400	60.8	60.9	60.4	62.0	61.2	62.9	62.1	61.6	62.8	61.4
500	56.8	56.8	57.0	58.3	56.8	60.1	59.2	58.2	59.5	58.9
630	57.4	56.6	57.9	58.1	57.6	61.3	60.9	61.1	62.9	62.0
800	60.6	60.1	61.2	61.7	61.1	60.7	61.2	60.4	61.1	59.2
1000	60.1	60.8	59.9	60.9	61.5	61.0	60.9	60.3	60.6	60.1
1250	57.0	56.3	56.2	56.6	57.2	61.3	60.7	60.4	60.5	61.6
1600	53.7	54.3	54.0	54.1	54.8	57.2	57.3	56.6	57.5	57.0
2000	53.1	52.8	52.6	53.8	53.3	55.2	54.7	54.2	54.9	54.2
2500	50.6	50.4	50.2	51.8	51.4	53.7	52.6	52.5	53.6	52.7
3150	46.4	46.3	46.4	47.9	47.3	51.1	50.5	49.8	50.6	49.7

LIVELLO DI CALPESTIO SCUOLA n.1											
FREQUENZA [Hz]	S3 M1 [dB]	S3 M2 [dB]	S3 M3 [dB]	S3 M4 [dB]	S3 M5 [dB]	S4 M1 [dB]	S4 M2 [dB]	S4 M3 [dB]	S4 M4 [dB]	S4 M5 [dB]	MEDIA ENERGETICA [dB]
100	56.5	56.2	55.1	56.6	55.9	54.3	56.6	55.7	53.2	54.1	56.3
125	56.8	55.9	59.8	55.2	53.7	56.3	60.1	56.7	56.9	55.1	58.4
160	62.9	59.9	59.6	56.5	55.0	59.9	61.9	60.2	60.2	62.0	60.6
200	61.0	59.3	65.6	59.0	60.8	61.8	62.8	60.7	61.4	62.5	61.1
250	62.5	62.5	65.0	65.0	61.1	65.4	65.9	64.0	66.4	65.0	63.7
315	66.6	66.2	65.7	66.4	65.6	64.4	63.1	63.8	64.1	64.2	64.6
400	62.7	61.8	61.0	62.6	62.0	61.5	61.9	61.6	62.8	61.4	61.8
500	57.9	59.1	58.0	57.8	57.0	60.1	58.9	59.5	59.3	59.5	58.6
630	57.5	57.6	57.0	58.0	57.5	62.6	62.2	61.1	60.9	61.3	60.1
800	61.2	60.7	60.8	60.3	60.5	61.4	60.2	60.1	60.9	59.6	60.7
1000	59.2	59.8	60.4	59.9	59.5	58.8	59.8	59.5	59.8	59.8	60.2
1250	62.2	61.9	61.5	61.9	61.8	57.7	57.7	56.8	56.6	56.7	59.7
1600	64.6	63.7	62.2	63.3	62.9	54.4	55.1	54.0	54.0	53.0	59.1
2000	57.6	57.5	56.7	56.7	56.5	51.5	50.6	49.7	50.5	49.3	54.4
2500	59.0	58.1	59.2	57.7	57.7	53.8	55.7	54.4	54.7	53.5	55.1
3150	55.8	55.5	56.9	55.8	54.7	54.6	56.5	56.8	56.7	55.5	53.7

Data della prova: 09/10/08

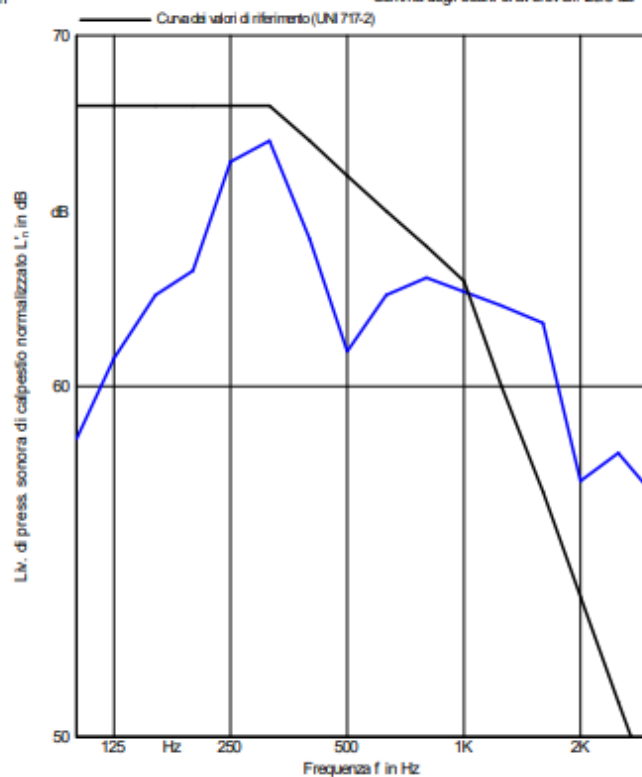
Scuola Media n.1

Volume dell'ambiente ricevente:

155.7 m³

Somma degli scarti sfavorevoli: 26.3 dB

Frequenza Hz	L' _n dB
100	58.5
125	60.8
160	62.6
200	63.3
250	66.4
315	67.0
400	64.2
500	61.0
630	62.6
800	63.1
1000	62.7
1250	62.3
1600	61.8
2000	57.3
2500	58.1
3150	56.8



Valutazione secondo la ISO 717-2 dell'indice di livello di rumore di calpestio del solaio normalizzato rispetto all'assorbimento acustico

L'_{n,w} (C_n) = 66 (-6) dB

Valutazione basata su risultati di misurazioni in opera ottenute in terzi di ottava mediante un metodo tecnico progettuale

Conclusioni

Lo scopo della tesi è stato quello di valutare, dal punto di vista acustico, le condizioni attuali del parco edilizio scolastico Italiano.

La legislazione di riferimento è il D.P.C.M. 5/12/1997, riguardante la "Determinazione dei requisiti acustici passivi degli edifici": tale decreto definisce dei parametri acustici e ne stabilisce dei valori minimi, allo scopo di ridurre l'esposizione umana al rumore e di garantire quindi un adeguato grado di benessere alle persone che occupano questi ambienti.

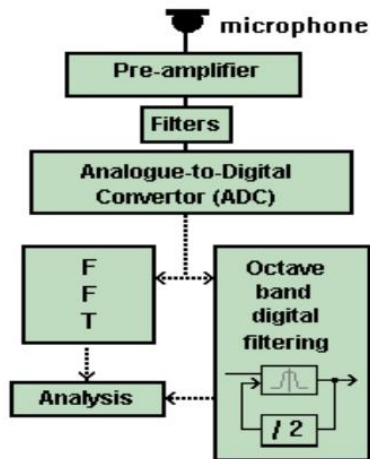
Tabella riepilogativa dei parametri soddisfatti di ciascuna scuola

Parametri	Scuola	
Tempo di riverbero	NO	
Indice di valutazione R'_w partizione verticale	NO	
Indice di valutazione R'_w partizione orizzontale	SI	
Indice di valutazione L'_{nW} calpestio	NO	

Tra gli obiettivi dello studio, vi era anche quello della salvaguardia delle malattie professionali dei docenti che devono poter insegnare senza subire stress vocali (condizioni che invece si possono verificare nel caso di riverberazione eccessiva). Alla luce dei risultati ottenuti, sembra necessario rivedere quelli che sono i criteri progettuali delle scuole, quali la tipologia di arredi e la distribuzione degli spazi, in modo tale da tendere ad un miglioramento della situazione riscontrata.

L'analisi strumentale è stata svolta nel pieno rispetto della legislazione vigente e della normativa di riferimento.

USO DEL FONOMETRO PER LA DETERMINAZIONE DELLA RISPOSTA IN FREQUENZA DELLA «ROOM»



Il punto di ingresso del segnale è il rappresentato dal microfono (la parte più importante e costosa del fonometro) in cui si realizza la conversione tra pressione sonora e segnale elettrico. La caratteristica fondamentale di un microfono è la sua sensibilità, espressa dal rapporto tra la tensione prodotta in mV e la pressione sonora applicata, in Pa, con un range di valori che va da 2 a 100 mV/Pa

Utilizzato correttamente dà risposta in frequenza piatta. Tuttavia, se viene usato in modo errato (ad esempio ponendolo a 90° rispetto alla fonte che produce il suono che voglio misurare) sottostima le componenti ad alta frequenza, perché perde parte del segnale

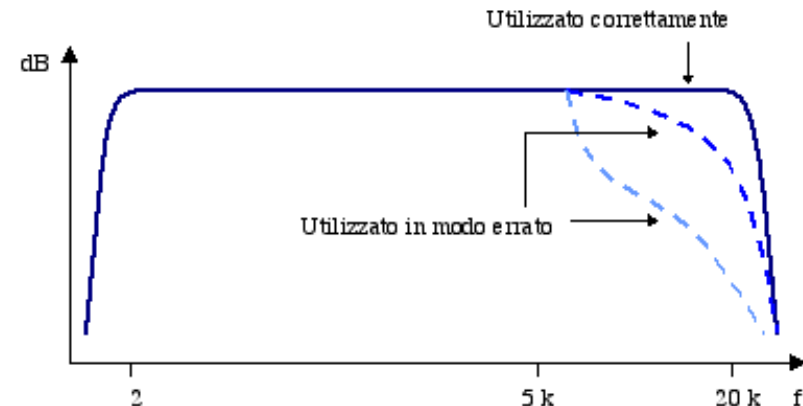


Il fonometro è uno strumento per misurare l'intensità dei suoni

Teoricamente un microfono dovrebbe essere omnidirezionale. In pratica però non lo è mai perfettamente, almeno non alle alte frequenze. Per questo motivo sono state realizzate due diverse tipologie: a campo libero o a campo diffuso.



Un microfono a campo libero si usa puntandolo nella direzione da cui proviene il suono



fonometro

(in inglese: Sound Level Meter). E' essenzialmente costituito da un microfono, preamplificatori, rettificatore RMS, compressore logaritmico ed indicatore digitale (o analogico).



Secondo le norme IEC 651 la lettura delle misure di un fonometro deve avere una precisione che varia da 0.7 a 1 a 1.5. Quelli più semplici danno la misura del livello istantaneo del rumore, altri più complessi elaborano questa misura per dare:

- livello equivalente (L_{eq}), ossia l'integrale del rumore nel tempo: praticamente un valor medio (si parla di fonometri integratori);
- analisi del rumore alle varie frequenze (analizzatori in bande di ottava e 1/3 ottava);
- analisi statistica;
- analisi di evento;
- analisi architettoniche: tempo di riverbero RT60 e perdita di trasmissione attraverso parete.



Il fonometro è uno strumento inventato nel 1922 da A. G. Webster per determinare le grandezze acustiche oggettive ed i parametri della sensazione uditiva nei confronti dell'intensità dei suoni e dei rumori. Essenzialmente è costituito da un microfono panoramico che trasforma i suoni in impulsi elettrici e da un amplificatore la cui uscita è collegata con un voltmetro a valore efficace tarato in decibel. Opportuni filtri acustici permettono di ottenere dallo strumento una sensibilità uguale a quella dell'orecchio umano normale.

La legge italiana impone il calcolo del livello equivalente, dato dalla formula

$$L_{eq} = 10 \lg \left[\frac{\frac{1}{T} \int_0^T p_i^2 dt}{p_0^2} \right]$$

dove p_i indica la pressione istantanea ponderata A e il numeratore dell'argomento del logaritmo è il valore medio efficace della pressione (fatto senza costante di tempo) che tiene conto di tutti gli istanti della misurazione.

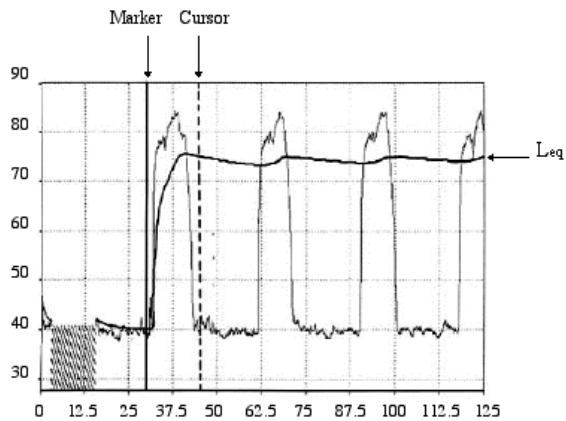
Ma allora come è possibile conciliare la caratteristica dello strumento di effettuare le misurazioni con costanti di tempo, con i termini di legge?

Consideriamo a proposito un segnale generico, misurato per un tempo T. Poiché la costante di tempo FAST di un circuito RC è $RC = 125 \text{ ms}$

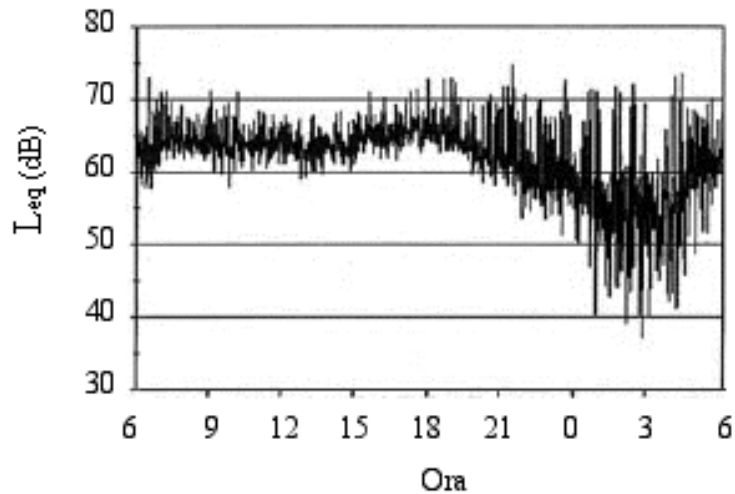
è necessario che lo strumento per costruire correttamente il diagramma nel tempo, campioni in valore FAST almeno 8 volte al secondo. In questo modo si ha la garanzia che il segnale mantenga la sua continuità nel dominio del tempo: con una misura ad esempio di 10 minuti lo strumento deve leggere $(600 \text{ s}) \times (8 \text{ numeri / s}) = 4800 \text{ numeri}$.

I dati con cui lavoriamo, però, sono valori di livello e non di pressione: allora la formula effettivamente utilizzata è la seguente, in cui compare come argomento del logaritmo il valor medio energetico

$$L_{eq} = 10 \lg \left[\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N 10^{\frac{L_i}{10}} \right]$$

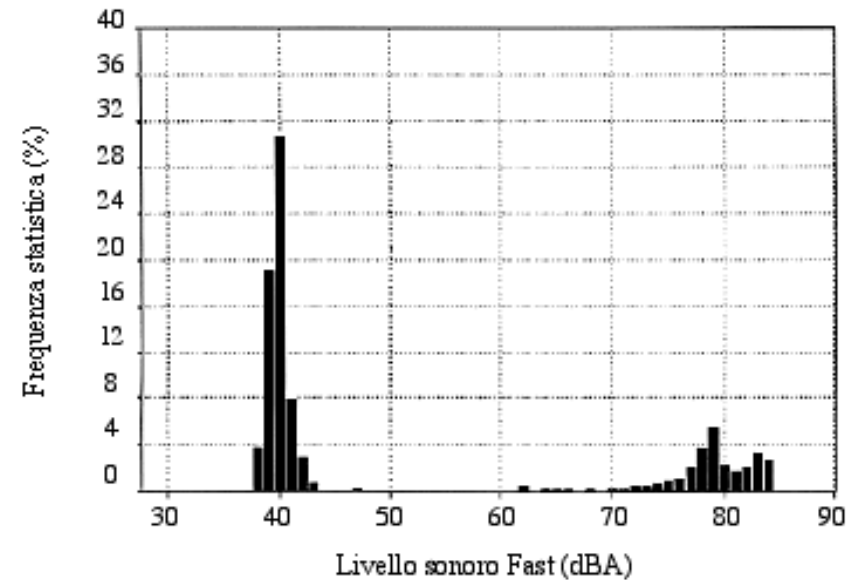


rappresenta il livello equivalente L_{eq} di un ventilatore che si accende e si spegne. In questo caso i livelli sono molto separati, per cui è semplice distinguere le fasi in cui il ventilatore è spento e quelle in cui è in funzione.



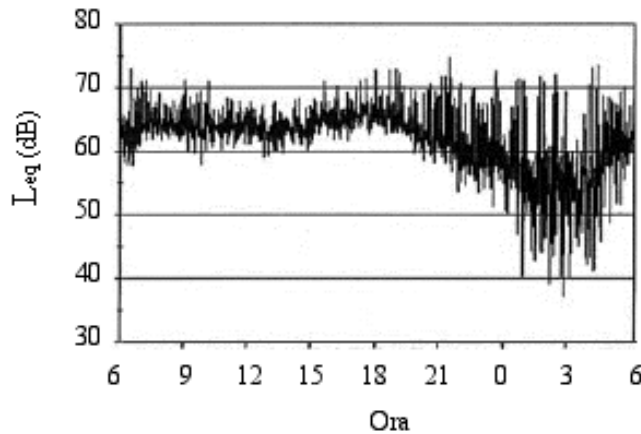
livello sonoro misurato nell'arco di un giorno nei pressi di una strada trafficata e di una ferrovia varia in maniera apparentemente caotica.

ANALISI statistica dell'evento, che risponde alla domanda: **qual è la percentuale di tempo in cui c'è stato un certo livello ?**. Applicando questo concetto al caso più semplice del ventilatore si ottiene una distribuzione statistica bimodale

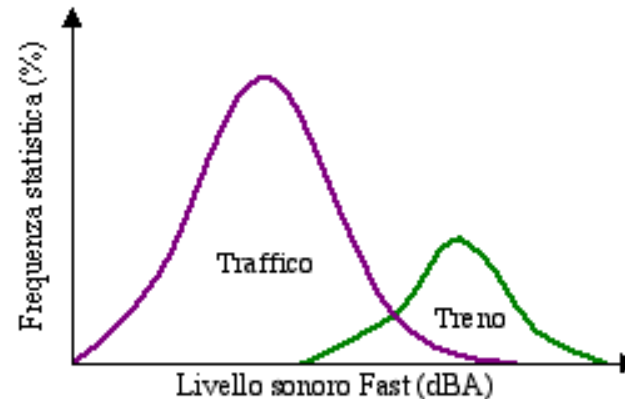


distribuzione in cui i due contributi sono molto separati

DATO IL SEGUENTE PROFILO TEMPORALE



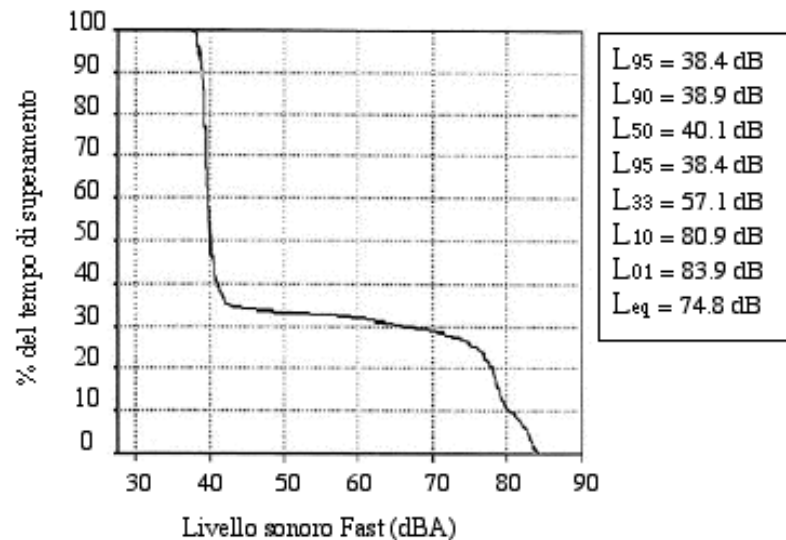
a cui distribuzione ha due picchi che si sovrappongono per un certo intervallo



Esiste un'ulteriore analisi statistica (di secondo livello o cumulativa), che consiste nel porsi la domanda: **per quanto tempo si è superato un certo livello?**

L'analisi statistica cumulativa si ottiene facendo l'integrale della curva della distribuzione statistica.

Distribuzione statistica cumulativa DEL VENTILATORE



**l'analisi statistica va
sempre fatta a partire
da dati FAST**