



Correzione Acustica di Aule Scolastiche: Risultati di un Progetto Pilota

Domenico RUSSO

Responsabile scientifico del progetto: Alessandro RUGGIERO

Prefazione

Non è la prima volta che l'istituzione che mi pregio di presiedere si occupa di questioni infrastrutturali e di carattere materiale. Lo abbiamo fatto ai tempi in cui cominciavamo, nel nostro Paese, a concepire l'esigenza di rivisitare l'identità degli spazi urbani, immaginando la città come il luogo del confronto e dell'incontro che trovano senso anche nel dialogo con la bellezza dell'attorno; torniamo, ora, ad affrontare una tematica infrastrutturale, pur essendo Bimed un ente deputato a promuovere cultura, perché rimuovere precondizioni che non agevolano la relazione con l'apprendimento è, ad avviso del sottoscritto e degli organi di governo di Bimed, fare cultura. Questa prefazione introduce alla descrizione di un intervento che ritengo esemplare sotto ogni punto di vista e che affronta una problematica ritenuta ancora marginale dall'*establishment*: si tratta della correzione acustica di ambienti scolastici. Bimed ha finanziato la sperimentazione di un progetto in collaborazione con il Dipartimento di Ingegneria Industriale (DIIn) dell'Università degli Studi di Salerno, volto al superamento di questa problematica, che per gli studiosi del settore risulta essere una determinante negativa per il fare scuola, incombente su tutto il sistema scolastico, che in molti casi rischia di ingenerare patologie e, spesso, non permette di operare al meglio. Grazie all'impegno del Prof. Ing. Alessandro Ruggiero (Docente del corso di Controllo delle Vibrazioni e del Rumore presso il DIIn) e del Dottore di Ricerca Ing. Domenico Russo (Assegnista di

Ricerca presso il DIIn) e grazie, anche, alla volontà della Prof. ssa Giovanna Nazzaro, Dirigente Scolastico dell'Istituto Comprensivo di Pellezzano, è stato possibile progettare e realizzare un sistema di correzione acustica per un'aula tipo, presso il Plesso Scuola Primaria, sito in via della Quercia a Capezzano di Pellezzano (SA), dell'IC di Pellezzano e ci avviamo a una fase di monitoraggio, volta a verificare le ricadute, che auspichiamo positive, per il contesto della scuola in cui abbiamo organizzato questa sperimentazione. Obiettivo precipuo dell'intervento è quello di giungere a una proposta progettuale che limiti il più possibile la problematica e, nel contempo, speriamo di trovare un'adeguata sensibilità istituzionale che prenda in carico la questione, immaginando di affrontarla sull'intero piano nazionale. Ancora una volta riteniamo di aver fatto la nostra parte, prevedendo, nell'attesa che i dicasteri preposti affrontino la problematica per loro conto, di continuare a infrastrutturare le scuole insistenti nei comuni associati così da tracciare un solco di interventi, che vorremmo porti a determinare una migliore qualità degli spazi in cui quotidianamente accogliamo quel bene preziosissimo che sono le nostre nuove generazioni.

Andrea Iovino

Presidente Biennale delle Arti e delle Scienze del Mediterraneo

INDICE

Prefazione	1
Indice	3
Introduzione	5
Il ruolo dell'acustica nelle scuole	7
Progettazione acustica: indicazioni preliminari	9
Livello sonoro e sua distribuzione nell'ambiente.....	9
Difetti acustici.....	9
Principali descrittori acustici.....	10
Interventi progettuali per la correzione acustica di un'aula scolastica	15
Descrizione dell'aula scolastica	21
Misure fonometriche <i>ante operam</i>	27
Analisi dei risultati	29
Progettazione degli interventi e individuazione dei materiali con rispettive caratteristiche acustiche e tecnologiche	35
Correzione acustica dell'aula scolastica in esame	41
Misure fonometriche <i>post operam</i>	45
Analisi dei risultati e conclusioni	47
Bibliografia	55

Introduzione

L'attività di correzione acustica dell'aula scolastica dell'Istituto Comprensivo di Pellezzano - Plesso Scuola Primaria - sito in via della Quercia, Capezzano di Pellezzano (SA), rientra in un progetto più ampio, riguardante il tema dell'importanza dell'acustica nelle scuole, per il quale è stata sottoscritta una Convenzione di Ricerca tra il Dipartimento di Ingegneria Industriale dell'Università degli Studi di Salerno (DIIn- UniSa) e la Biennale delle Arti e delle Scienze del Mediterraneo (BIMED).

In questo opuscolo gli autori, Prof. Ing. Alessandro Ruggiero, docente di Controllo delle Vibrazioni e del Rumore presso il DIIn dell'Università degli Studi di Salerno (responsabile scientifico del progetto) e il Dottore di Ricerca Ing. Domenico Russo, assegnista di Ricerca presso il DIIn dell'Università degli Studi di Salerno (progettista), hanno illustrato sinteticamente l'idea dalla quale è nato questo filone di ricerca e hanno descritto le fasi salienti della progettazione e della realizzazione degli interventi di correzione acustica relativi all'aula pilota di cui sopra.

Al giorno d'oggi risulta particolarmente caldo e sentito il tema della qualità *in-door* degli ambienti scolastici e questo lavoro si prefigge di fornire una risposta concreta nell'ambito della riqualificazione acustica delle aule scolastiche esistenti attraverso un intervento *low-budget*. In particolare, gli ottimi risultati conseguiti e validati

dall'analisi strumentale *post operam* dimostrano che si può migliorare in modo significativo la qualità acustica di un ambiente scolastico con un basso rapporto costi-benefici. È stato possibile, infatti, portare a compimento quest'opera con una spesa contenuta grazie alla scelta progettuale di non apportare nessuna modifica strutturale all'aula, ma di individuare la disposizione adeguata sulle pareti e sul soffitto di pannelli fonoassorbenti, opportunamente selezionati e dimensionati per la bisogna.

Il ruolo dell'acustica nelle scuole

Il progetto di correzione acustica di un'aula scolastica nasce dall'esigenza di favorire la comunicazione tra docente e allievi, realizzando le condizioni ottimali per la trasmissione dei messaggi vocali e per l'apprendimento [1]. Il rumore e il riverbero non riducono soltanto l'intelligibilità del parlato, ma possono talvolta anche provocare malesseri negli insegnanti e negli alunni (mal di testa, calo della concentrazione, irritabilità). Gli insegnanti, per rendersi intelligibili, incorrono talvolta in un sovraccarico dell'apparato fonatorio, rischiando, dunque, patologie vocali anche gravi.

Purtroppo nel nostro Paese la maggior parte delle aule adibite alla didattica, di ogni grado e tipologia, non risponde ai requisiti minimi riportati nelle norme tecniche e nella letteratura internazionale [2], [3]. Esistono diversi lavori scientifici che approfondiscono la tematica inerente la qualità acustica degli ambienti scolastici, che può condizionare sia il livello di apprendimento degli alunni sia le disfunzioni vocali degli insegnanti. Per esempio, Kob *et al.* [4] evidenziano il legame esistente tra la riduzione del tempo di riverbero in un'aula e gli effetti positivi sull'uso della voce per gli insegnanti di scuola secondaria. Giordano *et al.* [5] studiano lo sforzo vocale di 29 insegnanti di scuola primaria, misurando i parametri vocali e le caratteristiche acustiche degli ambienti di lavoro e mettendo in correlazione i risultati alla valutazione clinica dei soggetti. Gli autori asseriscono che il tempo di fonazione percentuale degli insegnanti

risulta caratterizzato da valori molto più alti rispetto ad altri professionisti e che il 45% del campione analizzato riporta una patologia laringea associata ad un sovraccarico dovuto alle condizioni acustiche delle aule.

Anche i risultati scolastici degli studenti sono influenzati dalla qualità acustica delle aule scolastiche: la capacità di concentrarsi sul linguaggio in presenza di rumore è un'abilità che si evolve con la maturazione del cervello e la padronanza del linguaggio. Poiché l'apparato uditivo umano non matura completamente fino alla fascia di età compresa tra i 13 e i 15 anni, i giovani studenti sono particolarmente vulnerabili alle difficoltà percettive in presenza di interferenze acustiche e richiedono migliori ambienti acustici rispetto agli ascoltatori adulti per raggiungere medesimi risultati, in termini di riconoscimento delle parole equivalenti [6].

Le abilità dei bambini di identificazione delle consonanti con rumore elevato o riverberazione eccessiva raggiungono livelli simili a quelli degli adulti a circa 14 anni [7]. Quando le condizioni di rumore e di riverberazione sono combinate, le abilità di identificazione delle consonanti dei bambini non maturano fino alla tarda adolescenza.

In [8] Maxwell *et al.* evidenziano gli effetti negativi dell'esposizione al rumore presente in aula sulle capacità di attenzione e di concentrazione degli alunni. Altre pubblicazioni [9], [10] sottolineano il legame esistente tra il rumore di un ambiente scolastico, non corretto acusticamente, e l'acquisizione del linguaggio e delle successive abilità di lettura dei bambini nei primi anni dell'età scolare.

Progettazione acustica: indicazioni preliminari

Prima di entrare nel vivo del progetto, si ritiene utile riportare alcuni richiami concettuali in tema di ottimizzazione acustica di ambienti chiusi.

Livello sonoro e sua distribuzione nell'ambiente

In ogni punto di un'aula il livello di pressione sonora deve essere sufficientemente alto, in modo che ogni ricettore possa percepire i suoni in maniera adeguata. La riverberazione del suono contribuisce in modo significativo a ciò, in quanto le prime riflessioni provenienti dalle superfici di contorno provvedono a rinforzare notevolmente il suono diretto. Si ricorda che, purché queste riflessioni pervengano con un ritardo contenuto entro 0.035 s dal suono diretto, l'apparato uditivo, oltre a percepire un unico suono rinforzato, ne attribuisce la provenienza direttamente dalla sorgente stessa (effetto Haas).

Difetti acustici

L'esame geometrico della sala e tecnologico dei materiali impiegati consentono di individuare possibili echi e concentrazioni sonore che sono considerati difetti gravi di un locale.

Riflessioni che giungono all'orecchio con ritardi eccessivi, superiori a 0.1 s, sono percepite come suoni distinti (eco) e, pertanto, devono essere accuratamente evitate. Anche fenomeni di *near-eco* (indesiderato prolungamento del suono diretto), che corrispondono a

riflessioni con ritardi compresi tra 0.05 s e 0.10 s, devono essere controllati.

Principali descrittori acustici

Tempo di riverbero

Il tempo di riverbero sintetizza l'effetto della riverberazione del suono in un ambiente, fornendo un'indicazione essenziale circa la qualità acustica del locale in esame. Se il tempo di riverberazione è elevato, l'apporto di energia delle onde riflesse è notevole, così come la densità energetica a regime. Il valore del tempo di riverberazione considerato ottimale $\tau_{\text{ott},500}$ alla frequenza di 500 Hz per le varie destinazioni è dedotto dall'esperienza e riportato in numerose tabelle presenti in letteratura scientifica.

Per tempo ottimale di riverbero si intende il valore del tempo di riverberazione più conveniente in relazione alla destinazione della sala.

Per frequenze diverse da 500 Hz il tempo di riverbero ottimale varia in funzione della frequenza in base ad andamenti noti.

In altri termini, la riverberazione è una condizione naturale della fruizione acustica di un ambiente chiuso, ma essa va, per così dire, opportunamente “dosata”, per evitare effetti indesiderati.

Per definizione, il termine riverbero indica la persistenza del suono in un ambiente chiuso dopo che la sorgente sonora ha cessato di irradiare, a causa della riflessione continuata dell'onda sonora sulle pareti.

Ogni volta che il suono colpisce una superficie nasce una riflessione, che inizia un suo percorso all'interno della stanza, generando a sua volta altre riflessioni e così via. Poiché il suono si propaga nell'aria ad una velocità convenzionale di circa 340 m/s e le aule hanno dimensioni di pochi metri, si può capire come nella frazione di pochi centesimi di secondo dall'uscita del suono dalla sorgente sonora la stanza sia letteralmente riempita dalle riflessioni che vanno ad aggiungersi e a modificare il suono diretto, quello originario. Questo insieme di riflessioni viene chiamato riverbero.

Valori di τ_{60} eccessivamente bassi rispetto al valore ottimale sono tipici di un locale "sordo", ovvero di una stanza in cui i singoli suoni vengono percepiti in modo staccato e in cui, essendo limitato l'apporto del campo riverberante, il livello di pressione sonora non è uniforme nei diversi punti. Valori eccessivamente alti determinano, invece, condizioni di ascolto poco "nitide": il nostro sistema nervoso riconduce ad un medesimo evento emissivo (e quindi ad uno stesso "significato") due segnali acustici percepiti in tempi diversi se il ritardo presente tra loro non è maggiore di alcune decine di millisecondi.

Riveste un ruolo di primaria importanza in questo campo lo studio che condusse nel 1898 il pioniere dell'acustica Wallace Clement Sabine, che propose una formula per il calcolo del tempo di decadimento del riverbero oltre la soglia dell'udibilità. Egli formulò una teoria della propagazione del suono in ambienti chiusi, in base alla quale le caratteristiche acustiche di ogni ambiente possono essere sintetizzate nel "tempo di riverbero τ_{60} ", definito come il tempo necessario

affinché la densità di energia acustica in un punto diminuisca di 10^6 volte rispetto al valore che aveva nell'istante in cui l'onda diretta ha cessato di raggiungere il punto (Fig. 1). Da tale definizione emerge che:

- maggiore è τ_{60} , maggiori sono la durata dei transitori di attacco e di estinzione, nonché il valore della densità acustica a regime;
- in un'ipotetica situazione limite, con coefficiente di assorbimento pari a 1, $\tau_{60}=0$ (assenza del campo riverberato);
- τ_{60} dipende dalla capacità complessiva di assorbire energia acustica da parte dell'ambiente; maggiore è l'assorbimento, minore risulta il tempo di riverberazione.

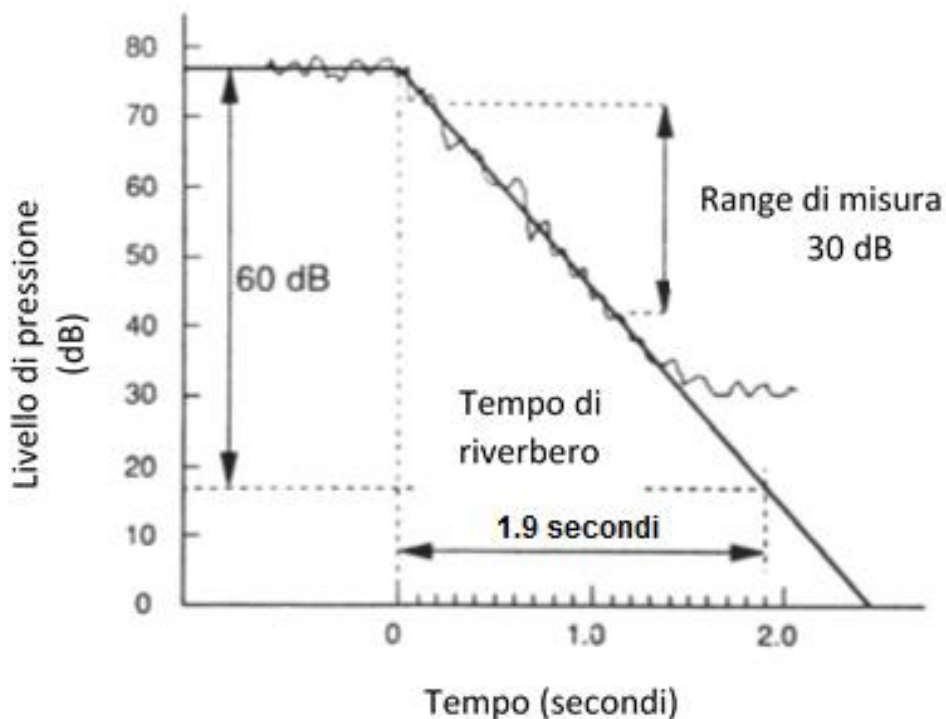


Fig. 1 Esempio di tempo impiegato dal livello di pressione sonora per ridursi di 60 dB dopo che è cessata l'emissione da parte della sorgente sonora

In simboli la formula di Sabine può essere così espressa:

$$\tau_{60} = 0,161 \frac{V}{A} \quad [\text{s}] \quad (1)$$

secondo la norma Pr EN 12354-6:

$$A = \sum_{i=1}^n \alpha_{s,i} S_i + \sum_{j=1}^o A_{ogg,j} + \sum_{k=1}^p \frac{S_k}{S_{config,k}} A_{config,k} + A_{air} \quad [\text{m}^2] \quad (2)$$

α_s = coefficiente di assorbimento della superficie i di area S ;

A_{ogg} = assorbimento equivalente dell'oggetto j ;

A_{config} = assorbimento equivalente della configurazione di oggetti k , che copre una superficie in pianta S nel caso reale e S_{config} nella prova in laboratorio;

A_{air} = assorbimento equivalente dell'aria.

Chiarezza della parola

La “Chiarezza della parola” (C_{50}) concerne la qualità della comunicazione tra due persone e la nitidezza del trasferimento di un discorso da un emittente a un ricevente. Questo parametro prende in esame l'intervallo di tempo che intercorre tra l'emissione del suono diretto e la comparsa delle prime riflessioni, che hanno la caratteristica di rinforzare l'intensità del suono, al contrario delle riflessioni successive che possono essere percepite come fastidiose.

Tale indice viene calcolato attraverso un bilancio energetico, confrontando l'energia sonora iniziale con quella successiva ad una soglia temporale definita in base al fine della misurazione. Nel caso di chiarezza del parlato, l'intervallo temporale considerato è di 50 millisecondi e la formula utilizzata è la seguente:

$$C_{50} = \frac{\int_0^{50 \text{ ms}} p^2(t) dt}{\int_{50 \text{ ms}}^{\infty} p^2(t) dt} \quad (3)$$

Indice di trasmissione del parlato

Lo *Speech Transmission Index* (STI) o “indice di trasmissione del parlato” è nato in Olanda nei primi anni ‘70 ed è stato approfondito successivamente per essere utilizzato in varie applicazioni; l'ultima revisione da parte della Commissione Internazionale di Elettronica risale al 2011, norma europea IEC60268-16. Tale parametro quantifica l'effetto combinato dell'interferenza del rumore di fondo e della riverberazione sull'intelligibilità del parlato, ossia rappresenta l'effetto del sistema di trasmissione, in questo caso l'ambiente, sull'intelligibilità del parlato. Si calcola come valore medio del rapporto segnale/disturbo apparente (S/N) in un campo di frequenze che sono ritenute importanti per la modulazione di inviluppo del segnale vocale.

Interventi progettuali per la correzione acustica di un'aula scolastica

Negli ambienti scolastici la comprensione della parola deve avvenire in condizioni di minimo affaticamento [11]. Come già anticipato, la limitazione del rumore rappresenta il presupposto necessario affinché un segnale vocale sia più energetico del rumore e, quindi, non sia da esso mascherato. In aggiunta, tuttavia, a questa condizione di bassa rumorosità, è indispensabile il controllo delle caratteristiche acustiche dell'ambiente ed in particolare della riverberazione del suono o coda sonora. Questo attributo percettivo è funzione essenzialmente dei volumi in gioco e delle finiture interne e condiziona la buona trasmissione del messaggio vocale. Quando, infatti, un segnale vocale viene trasmesso in una sala in cui è presente un eccesso di riverbero, i fonemi, di cui le sillabe sono composte, acquistano una propria coda riverberante, che interferisce sulla ricezione dei fonemi seguenti e causa il loro mascheramento. In tali condizioni, pertanto, anche in assenza di specifici rumori interni o esterni, la comprensione della parola è scarsa e pregiudica l'efficace fruizione dello spazio scolastico. Per ciascun volume dell'aula è definito un requisito opportuno per la coda sonora, che si esprime con il tempo di riverberazione, che è più contenuto per l'uso esclusivamente didattico tradizionale e che cresce nel caso di utilizzo musicale [12]. I valori

idonei sono riportati in [2] (Fig. 2), [11] e [13]. In questo riferimento, nel caso di aule non occupate e con un volume $V < 250 \text{ m}^3$, si prevedono tempi di riverberazione compresi nell'intervallo $0.5 \text{ s} - 0.8 \text{ s}$. A parità di volume, i valori garantiti per le aule dei primi gradi di istruzione devono essere cautelativamente più bassi, a causa della maggiore vulnerabilità degli occupanti.

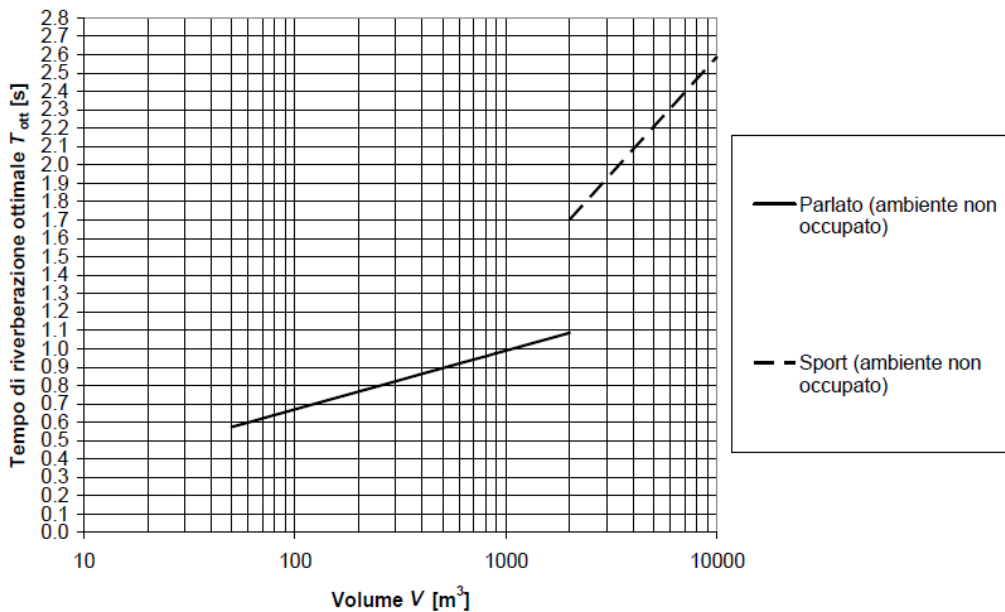


Fig. 2 UNI 11367: APPENDICE C

Valori ottimali del tempo di riverberazione medio tra 500 e 1000 Hz, in ambienti adibiti al parlato e ad attività sportiva

Sono disponibili in letteratura numerosi risultati, frutto di studi sperimentali, che forniscono i valori ottimali del tempo di riverberazione per le tipiche destinazioni d'uso delle sale; il valore $\tau_{60,ott}$ è generalmente indicato per una frequenza di riferimento (tipicamente pari a 500 Hz) e grazie ad alcuni fattori moltiplicativi è possibile ricavare il valore massimo ammissibile (*upper limit*) e

minimo ammissibile (*lower limit*) del tempo di riverberazione alle altre frequenze di interesse (Fig. 3).

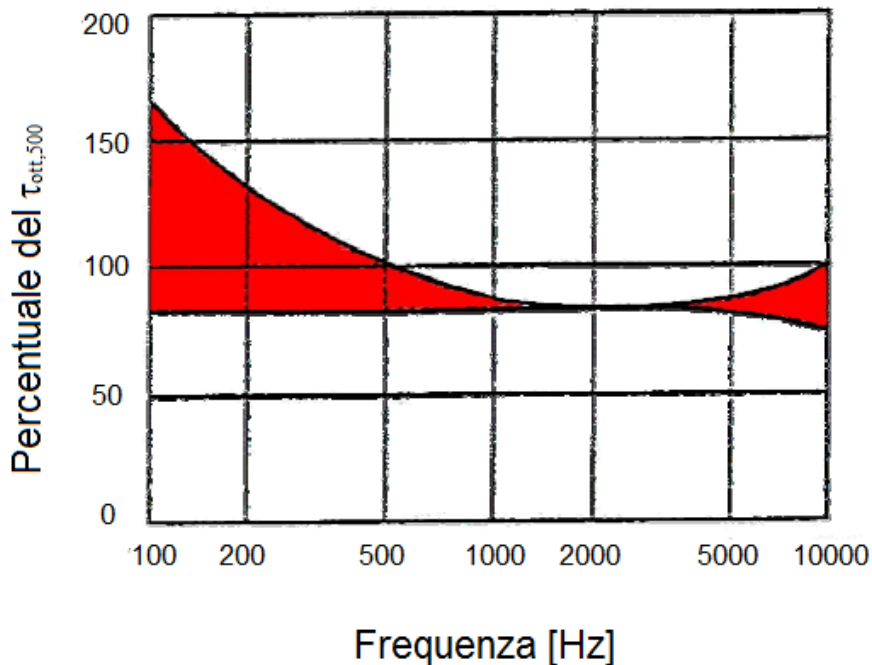


Fig. 3 Variazione del $\tau_{60,\text{ott}}$ con la frequenza

In particolare, quindi, in base alla destinazione d'uso di una sala, è opportuno che la curva del tempo di riverbero sia contenuta nella fascia relativa al tempo di riverbero ottimale delimitata dagli *upper limit* e dai *lower limit* alle varie frequenze.

La riverberazione interna all'ambiente è importante anche per il controllo del rumore generato dagli occupanti. Questa componente del campo acustico arreca, generalmente, il maggior disturbo nelle aule e dipende in maniera significativa dalla progettazione e dalla successiva correzione del tempo di riverberazione. È noto infatti che, a causa

dell'Effetto Lombard¹, le condizioni diventano critiche sia per l'insegnante, che per vincere il rumore deve elevare lo sforzo vocale, sia per gli studenti, poiché ancora una volta il brusio amplificato dalla riverberazione maschera ciò che l'insegnante sta dicendo, specialmente nelle posizioni d'ascolto più lontane. Per garantire una trasmissione efficace della parola, il riverbero deve essere, quindi, contenuto in termini assoluti, ma anche molto ben equilibrato alle diverse frequenze. In particolare si deve fare in modo che tale parametro non sia eccessivo nell'intervallo delle frequenze gravi, per evitare che, a causa del mascheramento uditivo, questo squilibrio renda poco comprensibile la parte del segnale vocale che occupa le frequenze medie ed acute. In base alla natura del segnale vocale, infatti, questa parte rappresenta la più utile all'ascoltatore, per non confondere tra loro le sillabe simili.

Oltre alla giusta riverberazione che evita il mascheramento, la buona ricezione del segnale parlato necessita di riflessioni efficaci del suono che mettano in maggior risalto il suono diretto proveniente dalla bocca dell'insegnante, rendendolo più nitido e quindi più comprensibile. Questi contributi, chiamati "prime riflessioni", possono arrivare dalle pareti laterali e dal soffitto e devono raggiungere tutte le posizioni d'ascolto subito dopo il suono diretto. Questi contributi sono verificati con un'analisi geometrica su pianta e sezione dell'aula, costruendo le

¹ L'Effetto Lombard, descritto già nel 1910 dal medico francese Etienne Lombard, consiste nel legame tra il livello di emissione vocale del parlatore ed il livello di rumore presente nell'ambiente. Con l'aumento del livello di rumore ambientale il parlatore aumenta il livello di emissione e ciò determina, in presenza di molti parlatori, una rumorosità molto elevata nell'ambiente.

riflessioni speculari del suono sulle diverse superfici (soffitto, pareti laterali, parete di fondo) e verificando che il ritardo temporale rispetto all'arrivo del suono diretto sia contenuto nel limite convenzionale di 50 ms.

La mancanza di riflessioni di questo tipo o il loro ritardo eccessivo peggiora la trasmissione della parola ed aumenta lo sforzo vocale dell'insegnante. Inoltre, si può verificare il fenomeno dell'eco, ossia di una copia esatta del messaggio vocale troppo ritardata nel tempo, che è particolarmente deleterio per la comprensione della parola, allorquando una riflessione provenga da una superficie molto distante. Infine, è necessario che le riflessioni successive a quelle iniziali siano distribuite per direzione di provenienza e non siano concentrate, come ad esempio succede nel caso si abbiano riflessioni ripetute solo tra coppie di superfici (ad es. tra pareti laterali o tra soffitto e pavimento). Per effetto degli echi ripetuti (*flutter echo*) il suono presenta una distorsione del timbro che lo rende innaturale e meno comprensibile. L'apporto delle prime riflessioni e del riverbero alla ricezione del parlato viene qualificato tramite specifici indicatori acustici che possono essere oggetto di calcolo previsionale e di successiva misurazione.

In particolare, la UNI 11367 aggiorna i parametri di comfort acustico, in merito ai quali la letteratura scientifica ha fatto notevoli progressi rispetto alla legge del '97, dando indicazioni per gli ambienti dove l'intelligibilità del parlato rivesta importanza e/o l'assorbimento acustico risulti essere critico. I descrittori riportati dalla presente norma nell'Appendice C, per stimare l'intelligibilità del parlato in ambienti scolastici, sono, in aggiunta al tempo di riverberazione,

l'indice di chiarezza della parola C_{50} e lo $STI = \textit{Speech Transmission Index}$.

Negli ambienti dedicati alla parola, deve essere verificata la condizione $C_{50} \geq 0$ dB [2], [11], [13], [14]. Tuttavia, tale parametro non tiene in considerazione il livello di rumore di fondo, per cui in ambienti come quelli scolastici è essenziale analizzare la situazione anche con dei criteri di intelligibilità come lo STI .

In ambienti adibiti al parlato, la condizione ottimale si verifica per $STI \geq 0,60$ [2], [11], [13].

Nelle aule di dimensioni più contenute e di forma regolare, la presenza degli echi ripetuti è meno critica poiché gli incavi delle finestre, le librerie e scaffalature di adeguata altezza e la cattedra, i banchi e le sedie, che si trovano nell'ambiente arredato, provvedono ad una utile diffusione delle onde sonore incidenti. Perciò il rischio degli echi ripetuti diminuisce molto nell'aula arredata rispetto alla condizione di aula spoglia.

Descrizione dell'aula scolastica

L'aula scolastica oggetto dell'indagine si trova al primo piano dell'Istituto Comprensivo di Pellezzano - Plesso Scuola Primaria (Fig. 4) sito in via della Quercia a Capezzano (Pellezzano – SA).



Fig. 4 Vista esterna dell'Istituto Comprensivo di Pellezzano - Plesso Scuola Primaria - sito in via della Quercia a Capezzano (Pellezzano – SA).

Il locale ha un'altezza media di 3.80 m e un volume di circa 180 m³ (Fig. 5), una porta d'ingresso a due battenti in legno (1.10 m x 2.20 m), una finestra sopra luce (1.10 m x 0.86 m) affacciata sul corridoio e posizionata ad un'altezza di 2.20 m dal pavimento.

Sul lato opposto alla porta d'ingresso è presente una superficie vetrata, costituita da tre finestre adiacenti a due battenti, con infissi in alluminio, larga complessivamente 5.20 m ed alta 2.15 m, posta ad un'altezza di 1 m dal pavimento.

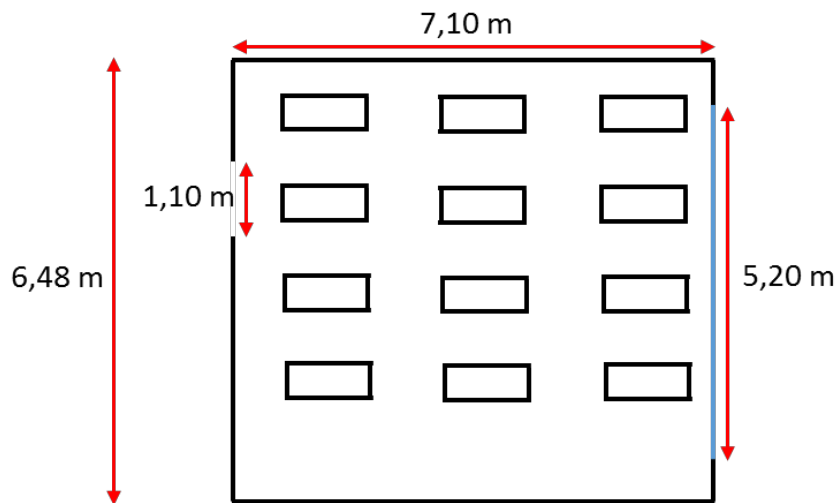


Fig. 5 Schema planimetrico dell'aula al primo piano dell'IC di Pellezzano - Plesso Scuola Primaria sito in via della Quercia a Capezzano (Pellezzano – SA)

Gli arredi sono costituiti da 12 banchi e sedie, una cattedra e tre scaffalature in legno di altezza pari a 1.5 m e larghezza pari ad 1 m (Figg. 6-8).



Fig. 6 Particolare dell'aula al primo piano dell'IC di Pellezzano - Plesso Scuola Primaria sito in via della Quercia a Capezzano (Pellezzano – SA)



Fig. 7 Particolare dell'aula al primo piano dell'IC di Pellezzano - Plesso Scuola Primaria sito in via della Quercia a Capezzano (Pellezzano – SA)



Fig. 8 Particolare dell'aula al primo piano dell'IC di Pellezzano - Plesso Scuola Primaria sito in via della Quercia a Capezzano (Pellezzano – SA)

Misure fonometriche *ante operam*

Per la caratterizzazione acustica dell'aula in oggetto, è stata effettuata, in ottemperanza alle normative tecniche vigenti, la progettazione e la conduzione di una campagna di misure fonometriche al fine di valutare i seguenti descrittori acustici: C_{50} , τ_{60} e STI.

Le modalità di misurazione e di valutazione sono descritte nella ISO 3382 [14], per quanto riguarda C_{50} e τ_{60} , e nella CEI EN 60268-16 [15] per lo STI.

Per conseguire un'adeguata copertura dell'ambiente, sono state individuate nove posizioni di misura, uniformemente distribuite sull'intera area adibita agli alunni, poste poco più di 2 m l'una dall'altra e non troppo vicine alla sorgente, posizionata in corrispondenza della cattedra, per evitare un'influenza eccessiva da parte del suono diretto (Fig. 9).

Il microfono è stato posizionato ad una distanza minima di circa 1 m dalle pareti e ad 1.2 m dal pavimento, in modo che fosse rappresentativo dell'altezza dell'orecchio di ogni allievo seduto.

Sono state eseguite 3 acquisizioni per ogni posizione, utilizzando il "metodo della risposta integrata all'impulso" (ISO 3382), con spari di pistola a salve come sorgenti acustiche. Tale metodo consente di analizzare il decadimento del livello della pressione sonora in funzione del tempo in un punto di un ambiente dopo la cessazione della sorgente sonora, mediante integrazione inversa delle risposte all'impulso quadro. La risposta all'impulso è il diagramma, nel

dominio del tempo, della pressione sonora ricevuta in un ambiente quale risultato di un eccitamento dell'ambiente stesso da parte di una funzione delta di Dirac.

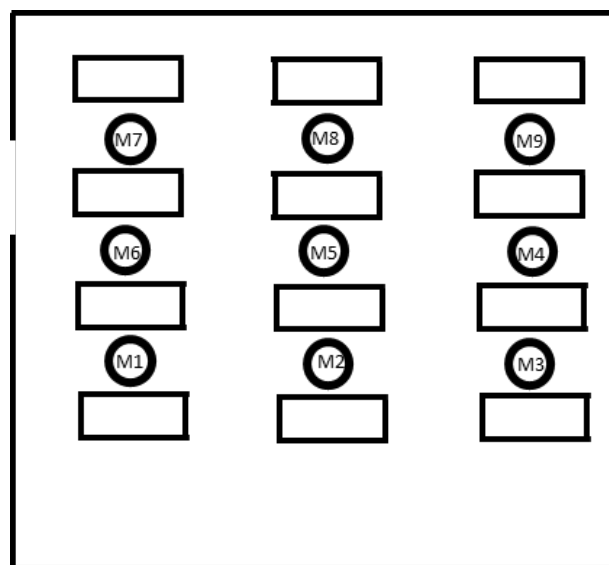


Fig. 9 Postazioni microfoniche (M1-M9)

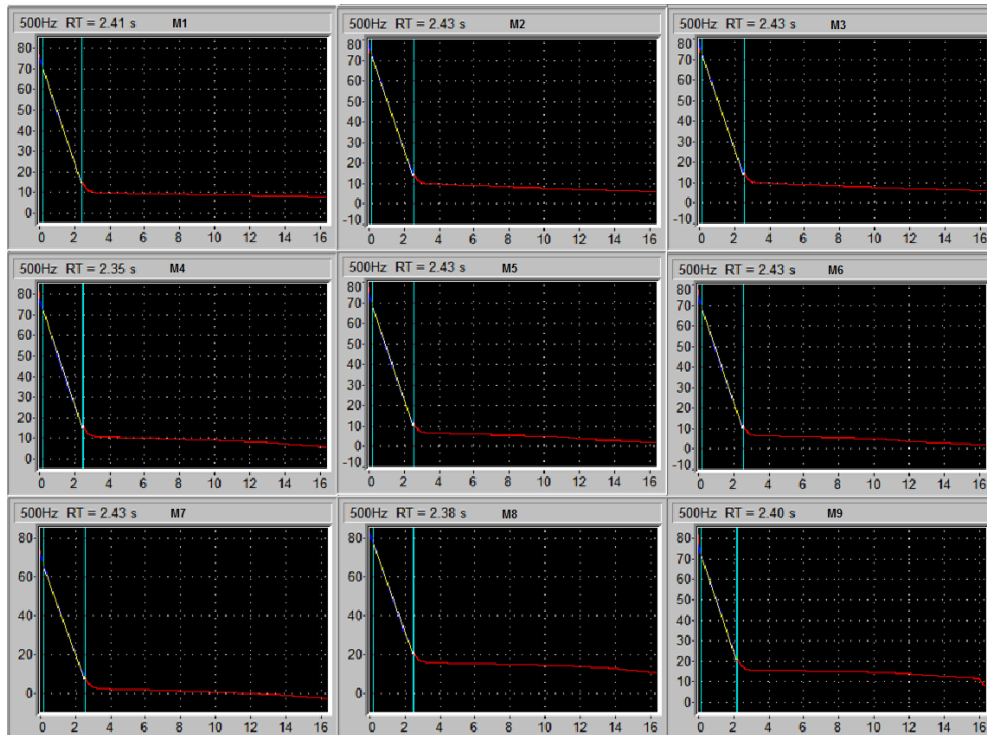


Fig. 10 Tempo medio di riverbero misurato a 500 Hz
in corrispondenza delle nove postazioni di misura
ante operam

Analisi dei risultati

I dati registrati sono stati mediati in fase di post-elaborazione e nelle figure 11 e 12 sono riportati rispettivamente i diagrammi del tempo medio di riverbero e dell'indice medio di chiarezza rilevati alle varie frequenze di interesse in condizioni di aula vuota.

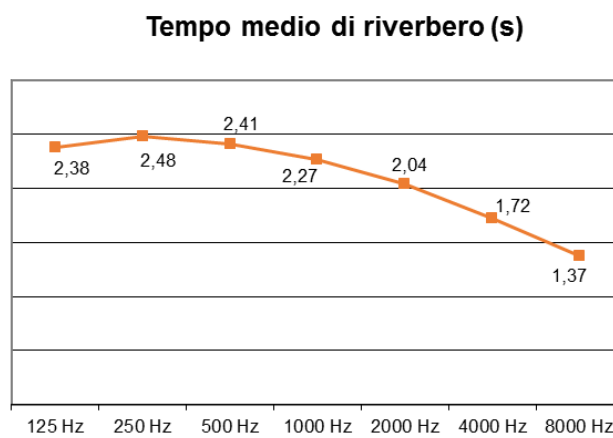


Fig. 11 Variazione in frequenza dei tempi medi di riverbero misurati

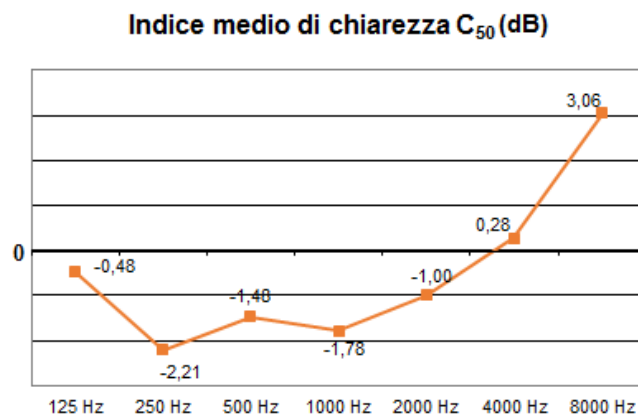


Fig. 12 Variazione in frequenza degli indici medi di chiarezza misurati

In Tab. 1 e in Fig. 13 sono riportati i tempi medi di riverbero misurati e quelli ottimali (*lower limit* e *upper limit*) ricavati dal diagramma in Figura 3.

Tabella 1 – Valori di τ_{60} medio misurato in condizioni di aula vuota e limiti inferiori e superiori di τ_{60} teorico alle varie frequenze

	125 Hz	250 Hz	500 Hz	1 KHz	2 KHz	4 KHz	8 KHz
τ_{medio}	2,38	2,48	2,41	2,27	2,04	1,72	1,37
$\tau_{\text{teor-Upp lim}}$	1,24	1,10	0,80	0,70	0,66	0,68	0,66
$\tau_{\text{teor-Low lim}}$	0,66	0,66	0,66	0,66	0,66	0,66	0,66

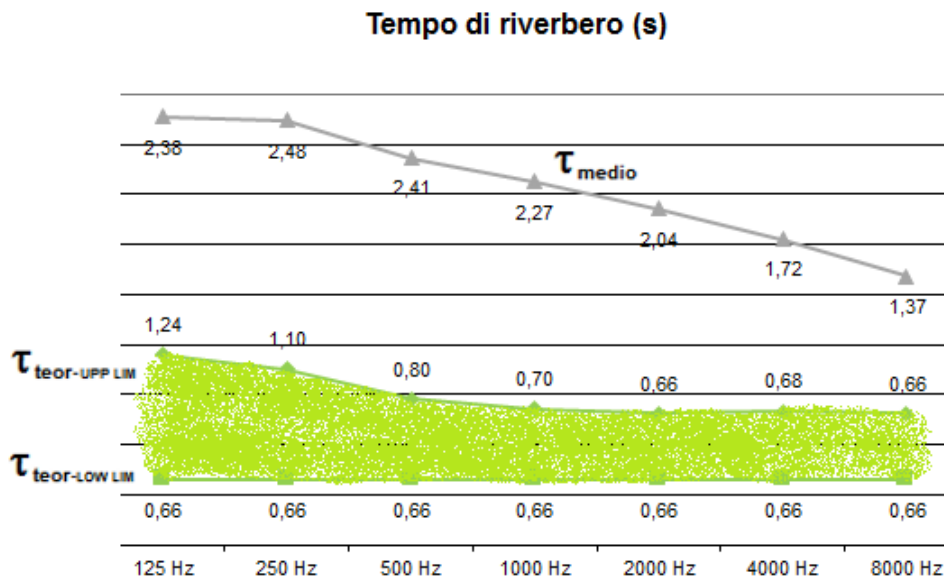


Fig. 13 – Diagramma dei tempi di riverbero medi misurati e dei limiti inferiori e superiori di τ_{60} ottimale teorico alle varie frequenze

L'indice di trasmissione del parlato (STI) misurato è risultato pari a 0,47 (aula vuota).

Trattandosi, inoltre, di una sala di modeste dimensioni, particolare attenzione è stata dedicata alla verifica delle possibili risonanze in bassa frequenza. Esse hanno luogo quando un qualsiasi tragitto chiuso del locale è un multiplo di una delle lunghezze d'onda che formano il suono, e, come noto, sono presenti in modo cospicuo in presenza di pareti parallele, spoglie e ben riflettenti.

In una stanza è presente un numero infinito di modi normali di vibrazione, chiamati anche naturali [16]. Ogni locale può essere schematizzato come un risonatore acustico complesso, caratterizzato da un numero infinito di modi di vibrazione, ognuno con una precisa frequenza di risonanza: quando una di queste frequenze è prodotta all'interno dell'ambiente, c'è una corrispondente onda permanente. In questo contesto assume una particolare importanza il concetto della frequenza limite o della frequenza di Schroeder, cioè il limite inferiore delle frequenze in corrispondenza del quale il campo sonoro ha proprietà statistiche: in relazione alle frequenze che sono inferiori a quella della frequenza Schroeder predominano le caratteristiche modali legate all'ambiente. Nel caso in esame, approssimando la geometria dell'aula a quella di un parallelepipedo, la frequenza di Schroeder può essere determinata in buona approssimazione con la seguente relazione:

$$f_{lim} = \frac{5000}{(Vk_{n,mod})^{1/2}} \cong 2000 \left(\frac{T}{V}\right)^{1/2} \quad (4)$$

dove $k_{n,mod}$ rappresenta il valore medio della costante di smorzamento, T è il tempo di riverberazione e V è il volume della stanza.

Nel caso in esame, la frequenza limite o frequenza di Schroeder è pari a circa 140 Hz.

La determinazione delle prime tre possibili frequenze di risonanza è stata effettuata usando la seguente espressione:

$$f_{123} = \frac{v}{2} \sqrt{\left(\frac{n_1}{a}\right)^2 + \left(\frac{n_2}{b}\right)^2 + \left(\frac{n_3}{c}\right)^2} \quad (5)$$

dove a , b , c sono le tre dimensioni della stanza, $v = 343$ m/s è la velocità del suono convenzionale, n_1 , n_2 e n_3 sono numeri interi qualsiasi, anche nulli. Quando due di questi sono nulli si parla di modo assiale, quando solo uno dei tre è nullo si parla di modo tangenziale e quando nessuno dei tre è nullo si parla di modo obliquo. In Tab.2 sono riportate le prime risonanze assiali dell'aula scolastica:

Tabella 2 – Prime risonanze assiali dell'aula scolastica in esame

Ordine modale nelle tre coordinate			Freq. naturale (Hz)	Ordine modale nelle tre coordinate			Freq. naturale (Hz)	Ordine modale nelle tre coordinate			Freq. naturale (Hz)
n_1	n_2	n_3	f_{123}	n_1	n_2	n_3	f_{123}	n_1	n_2	n_3	f_{123}
1	0	0	24	2	0	0	48	3	0	0	72
0	1	0	33	0	2	0	65	0	3	0	99
0	0	1	45	0	0	2	90	0	0	3	135

Nell'ambito di questa progettazione, avendo determinato che per valori di frequenze inferiori a 140 Hz predominano le caratteristiche modali legate all'ambiente e sapendo che il locale ha una destinazione d'uso per la quale rivestono un ruolo di primaria importanza da un punto di vista acustico le frequenze comprese nel range 500 Hz – 1000 Hz, è stato deciso di trascurare i fenomeni di risonanza alle basse frequenze.

Progettazione degli interventi e individuazione dei materiali con rispettive caratteristiche acustiche e tecnologiche

Al fine di riportare i valori dei descrittori acustici considerati (τ_{60} , C_{50} e STI) ai target stabiliti (Tab. 3) per un locale adibito ad aula scolastica [2], [11], [13] e considerando che l'ambiente in esame è caratterizzato da estese pareti piane, parallele e riflettenti, in cui possono essere presenti echi ripetuti, si è previsto di ricorrere ad un trattamento fonoassorbente.

**Tabella 3 – Valori ottimali dei descrittori acustici C_{50} , τ_{60} e STI
per l'aula scolastica in esame**

Descrittore acustico	Range ottimali
$\tau_{60,medio}$	0,5 s ÷ 0,8 s
C_{50}	≥ 0 dB
STI	≥ 0,60

Oltre al rischio degli echi ripetuti, in ambienti con parete di fondo riflettente si determina anche un eco singolo disturbante per gli ascoltatori delle prime file. Per evitare l'eco, la parete di fondo deve essere oggetto di trattamento fonoassorbente oppure deve essere inclinata verso l'uditorio in modo da riflettere il suono incidente

prevalentemente sulle ultime file, determinando, per queste ultime, una vantaggiosa amplificazione sonora (Fig. 14).

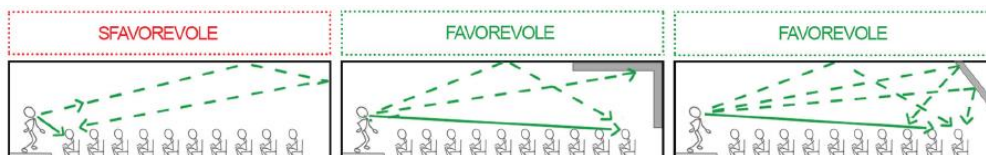


Fig. 14 Immagine adattata da DIN 18041

Nell'ambiente in esame vi è una buona visibilità dell'insegnante da tutte le posizioni d'ascolto e ciò garantisce una buona trasmissione diretta della voce; inoltre, essendo le distanze in gioco piuttosto brevi, sono sempre potenzialmente disponibili alcune prime riflessioni efficaci sia dal soffitto sia dalle parte laterali. Ciò comporta che il livello sonoro dell'oratore, con pochi accorgimenti aggiuntivi, sia adeguato anche nelle posizioni verso il fondo dell'aula e non sia necessario prevedere superfici di riflessione aggiuntive a supporto della propagazione del suono.

Per l'effettiva rispondenza ai requisiti è necessario che il materiale fonoassorbente non sia concentrato su un'unica superficie. In particolare nelle aule scolastiche è preferibile una distribuzione omogenea dei materiali fonoassorbenti sulle superfici del locale, considerando che essi debbano essere applicati ad un'adeguata altezza da terra, per evitare danneggiamenti. In ordine di priorità, le prime superfici da trattare sono la parete di fondo e la parte posteriore del soffitto, per poi intervenire, se necessario, sulla parte alta delle

superfici laterali, sempre a partire dal fondo dell'aula. Di norma non è consigliabile posizionare i materiali fonoassorbenti nei pressi della sorgente sonora poiché si riduce considerevolmente il livello sonoro nelle posizioni d'ascolto. È buona prassi mantenere una zona centrale del soffitto acusticamente riflettente per aggiungere una prima riflessione efficace al suono dell'oratore. Seguendo questi criteri risultano particolarmente indicate le configurazioni (b) e (c) rappresentate in Figura 15.

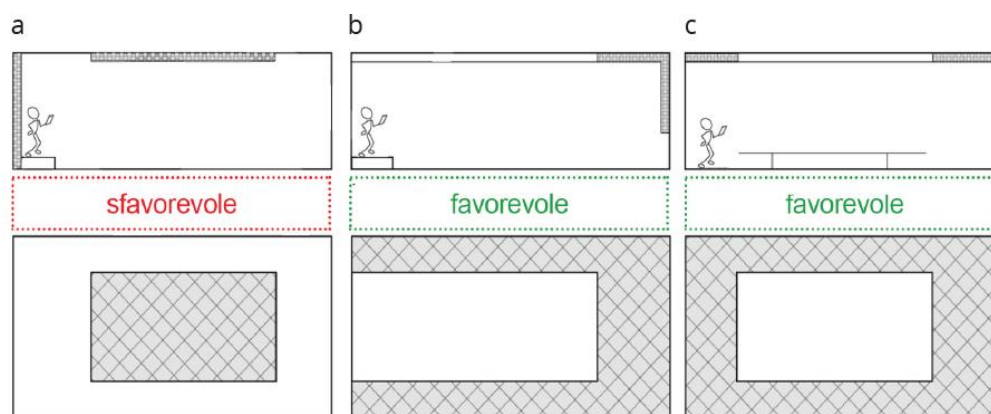


Fig.15 Distribuzione delle superfici fonoassorbenti in ambienti scolastici di piccole e medie dimensioni (sopra: sezioni verticali, sotto: viste dal basso della superficie del soffitto). Immagine adattata da DIN 18041

Per la disposizione ottimale delle superfici fonoassorbenti scelte all'interno della sala è stato utilizzato un software previsionale di propagazione dei livelli di pressione sonora negli ambienti chiusi.

A valle di un'analisi comparativa in termini di valori di assorbimento medio nel range di frequenze 125 - 3150 Hz relativamente ai materiali fonoassorbenti più diffusi (Fig. 16), la scelta è ricaduta su pannelli fonoassorbenti innovativi nel campo della correzione acustica (Stratocell[®] Whisper[®]) di spessore pari a 30 mm.

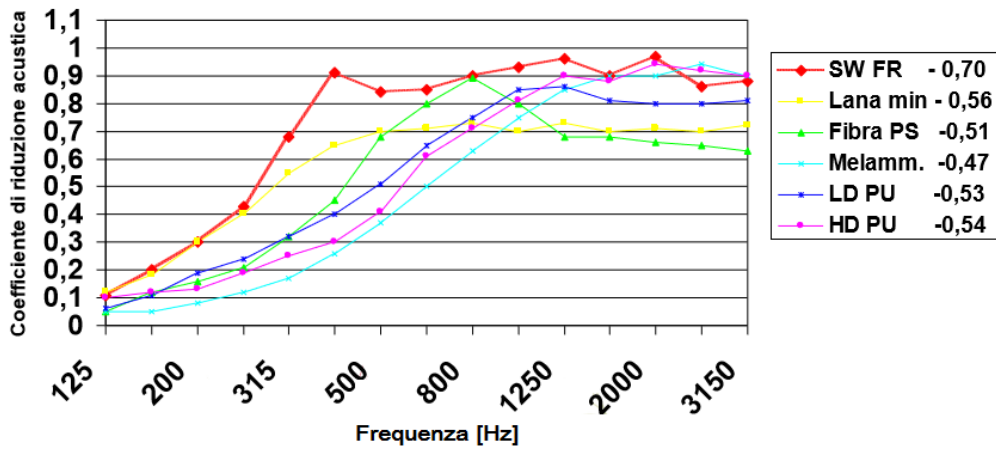


Fig. 16 Coefficiente di riduzione acustica alle varie frequenze per sei diversi materiali fonoassorbenti

Tali pannelli, semirigidi ed autoportanti, sono caratterizzati da coefficienti di assorbimento acustico compresi nei seguenti range:

125 Hz	250 Hz	500 Hz	1000 Hz	2000 Hz	4000 Hz
0,05 - 0,09	0,30 - 0,40	0,75 - 0,85	0,9 - 1,1	1,00 - 1,10	0,75 - 0,85

Sono realizzati in polietilene espanso a bassa densità ed hanno una struttura a cellule calibrate chiuse che li rende particolarmente adatti agli ambienti scolastici, in quanto lavabili, non soggetti a sfibramento, a basso peso specifico, di semplice installazione, resistenti ad acqua e ad umidità, e, quindi, di semplice pulizia. Inoltre, sono certificati secondo le norme di reazione al fuoco, fumi, proliferazione batterica.

Le pannellature devono essere applicate direttamente sulle superfici del *ceiling* e delle pareti come ampiamente documentato in precedenza, secondo una disposizione ottimale sia da un punto di vista acustico sia architettonico. Grazie all'algoritmo numerico sviluppato per la bisogna, è stato possibile determinare la tipologia d'intervento per l'ambiente in esame volto al raggiungimento dei parametri acustici ottimali presi in considerazione.

Inoltre, l'algoritmo ha consentito di pervenire ad un risultato dettagliato della tipologia (coefficienti di assorbimento acustico per frequenza) delle pannellature da utilizzare, nonché dei quantitativi necessari in termini di estensione superficiale.

Correzione acustica dell'aula scolastica in esame

Gli interventi di correzione acustica, basati sull'analisi dei correttori acustici (tempo di riverbero, indice di chiarezza della parola e indice di trasmissione del parlato) riportati nella UNI 11367, consistono nell'installazione sia al soffitto sia sulla parete che si oppone alla sorgente acustica principale (cattedra) di pannelli fonoassorbenti Stratocell[®] Whisper[®]) in numero pari ad una superficie equivalente di circa 30 m².

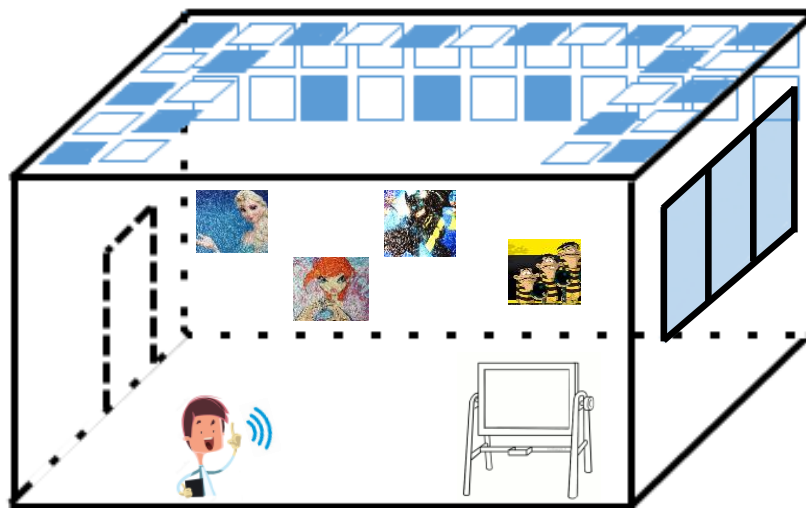


Fig. 17 Distribuzione dei pannelli fonoassorbenti

Per quanto attiene la disposizione dei pannelli fonoassorbenti al soffitto, al fine di lasciare la zona centrale del *ceiling* acusticamente riflettente, si prevede di disporre il materiale come riportato in Fig. 17,

mentre per quanto concerne l'applicazione delle superfici fonoassorbenti sulla parete opposta alla posizione della cattedra, si è pensato di disporre alcune pannellature sulla parte sommitale della parete e di collocare in modo gradevole dal punto di vista estetico altri pannelli fonoassorbenti che ritraggono anche personaggi di cartoni animati (Figg.18-22).



Fig. 18 Particolare dell'aula al primo piano dell'IC di Pellezzano - Plesso Scuola Primaria sito in via della Quercia a Capezzano (Pellezzano – SA) a valle dell'intervento



Fig. 19 Particolare dell'aula al primo piano dell'IC di Pellezzano - Plesso Scuola Primaria sito in via della Quercia a Capezzano (Pellezzano – SA) a valle dell'intervento



Fig. 20 Particolare dell'aula al primo piano dell'IC di Pellezzano - Plesso Scuola Primaria sito in via della Quercia a Capezzano (Pellezzano – SA) a valle dell'intervento



Fig. 21 Particolare dell'aula al primo piano dell'IC di Pellezzano - Plesso Scuola Primaria sito in via della Quercia a Capezzano (Pellezzano – SA) a valle dell'intervento



Fig. 22 Particolare dell'aula al primo piano dell'IC di Pellezzano - Plesso Scuola Primaria sito in via della Quercia a Capezzano (Pellezzano – SA) a valle dell'intervento

Misure fonometriche *post operam*

Per la valutazione dei descrittori acustici C_{50} , τ_{60} e STI a valle dell'intervento e per la comparazione di questi valori con quelli degli stessi determinati *ante operam* nonché con quelli riportati in letteratura, è stata effettuata, in ottemperanza alle normative tecniche vigenti, una campagna di misure fonometriche *post operam*.

Le modalità di misurazione e di valutazione sono descritte nella ISO 3382 [14], per quanto riguarda C_{50} e τ_{60} , e nella CEI EN 60268-16 [15] per lo STI.

Sono state considerate le stesse nove posizioni di misura scelte precedentemente, uniformemente distribuite sull'intera area adibita agli alunni, poste poco più di 2 m l'una dall'altra e non troppo vicine alla sorgente, posizionata in corrispondenza della cattedra, per evitare un'influenza eccessiva da parte del suono diretto (Fig. 9).

Il microfono è stato posizionato ad una distanza minima di circa 1 m dalle pareti e ad 1.2 m dal pavimento, in modo che fosse rappresentativo dell'altezza dell'orecchio di ogni allievo seduto.

Sono state eseguite 3 acquisizioni per ogni posizione, in condizioni di aula vuota, utilizzando il “metodo della risposta integrata all'impulso” (ISO 3382), con spari di pistola a salve come sorgenti acustiche

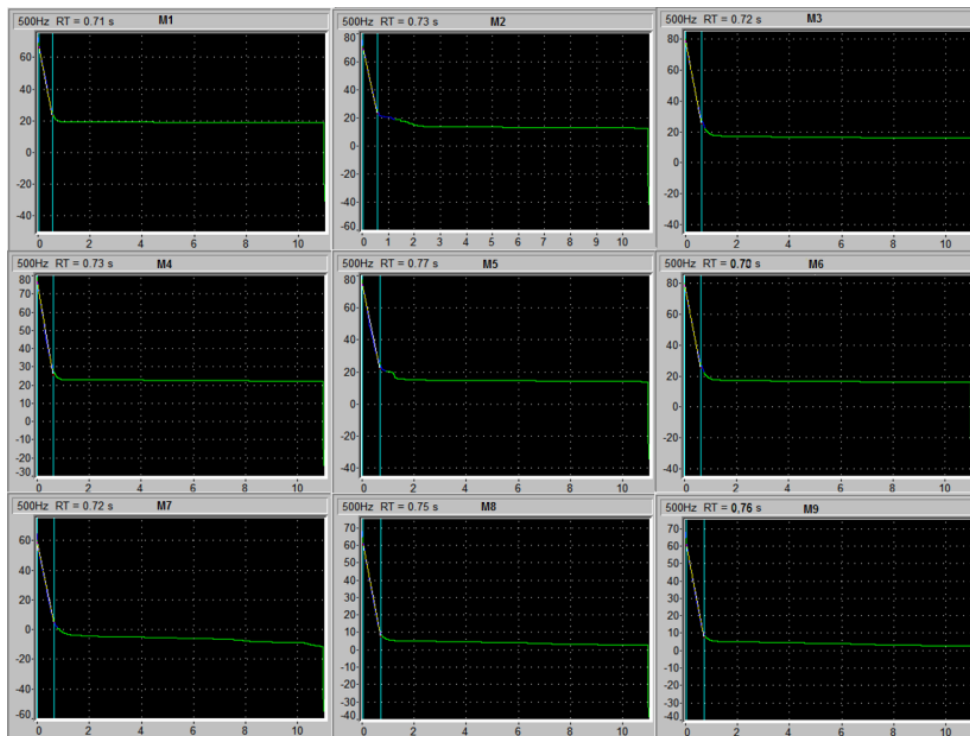


Fig. 23 Tempo medio di riverbero misurato a 500 Hz
in corrispondenza delle nove postazioni di misura
post operam

Analisi dei risultati e conclusioni

In Fig. 24 è riportato il confronto tra i tempi di riverbero misurati alle varie frequenze in corrispondenza delle nove postazioni microfoniche a monte e a valle dell'intervento di correzione acustica.



Fig. 24 Confronto tra i tempi di riverbero misurati alle varie frequenze prima e dopo la correzione acustica

I dati acquisiti sono stati mediati in fase di post-elaborazione: in Fig. 25 sono riportati gli andamenti, al variare della frequenza, del tempo di riverbero medio misurato *post operam* (aula vuota) e dei limiti,

superiore e inferiore, dell'intervallo dei tempi di riverbero teorici ottimali per l'aula scolastica in esame

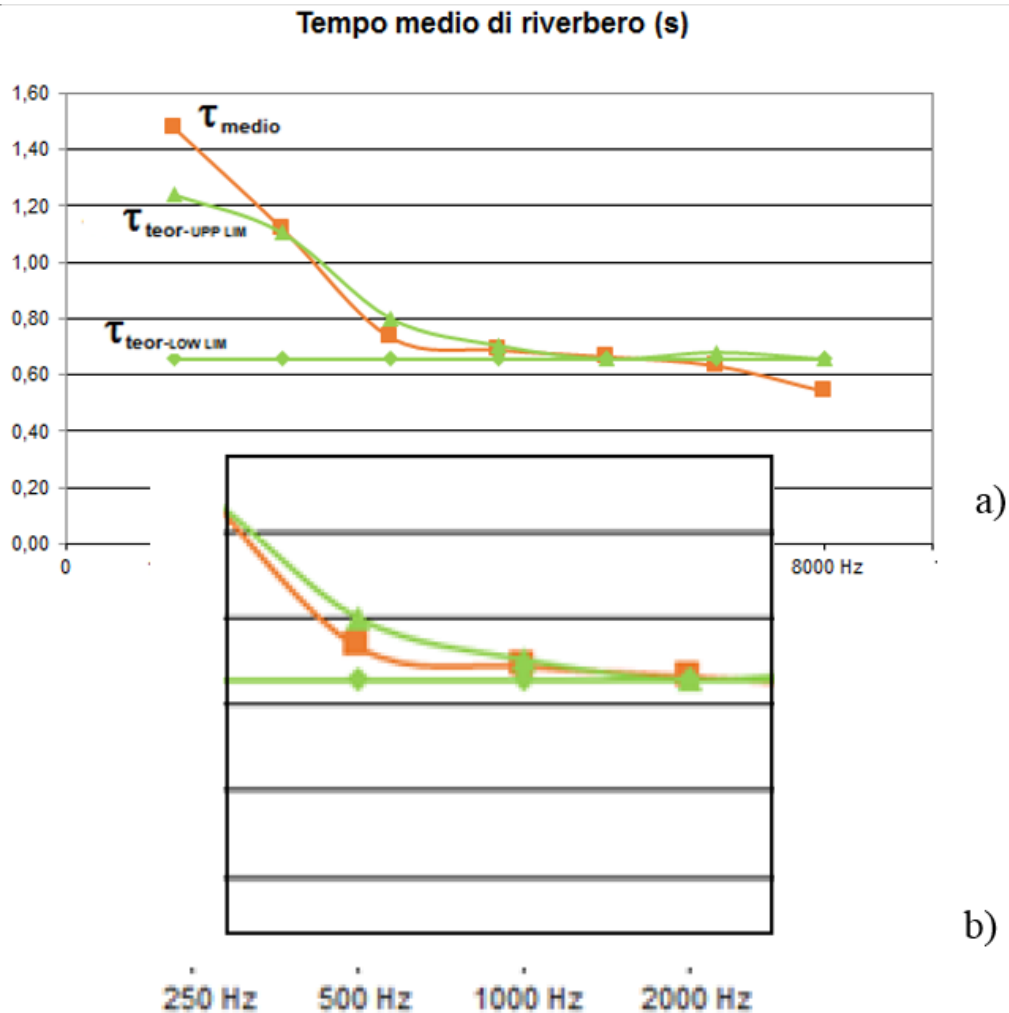


Fig. 25 Tempi di riverbero medi misurati e limiti, inferiore e superiore, di τ_{60} teorico: a) alle varie frequenze
b) in un intorno delle frequenze tipiche del parlato (zoom)

Per poter, poi, prendere in considerazione anche il valore medio del tempo di riverbero in condizioni di aula completamente occupata (100% degli studenti presenti), è stata effettuata una simulazione con un algoritmo numerico calibrato sulle misure effettuate.

In Tab.4 è riportato un quadro sinottico del valore medio dei tre descrittori acustici considerati in condizioni di aula vuota alle tipiche frequenze del parlato ($\tau_{60, 0,5-1 \text{ kHz}}$, $C_{50, 0,5-1 \text{ kHz}}$, STI), del tempo di riverbero simulato in condizioni di aula completamente occupata e dei range ottimali dei descrittori acustici.

Tabella 4 – Quadro sinottico dei descrittori acustici $\tau_{60, 0,5-1 \text{ kHz}}$, $C_{50, 0,5-1 \text{ kHz}}$, STI per l'aula scolastica in esame ante-operam e post-operam

Descrittori acustici	Condizioni	ante-operam	post-operam	Range ottimali
$\tau_{60, 0,5-1 \text{ kHz}}$	aula vuota	2,34 s	0,73 s	0,6 s ÷ 0,8 s
	aula completamente occupata (simulazione)	1,23 s	0,6 s	
$C_{50, 0,5-1 \text{ kHz}}$	aula vuota	- 1,59 dB	7,14 dB	≥ 0 dB
STI	aula vuota	0,47	0,67	≥ 0,60

Come si può evincere, i tre descrittori acustici presi in esame, a valle dell'intervento di correzione acustica dell'aula scolastica dell'IC di Pellezzano, ricadono nei range ottimali stabiliti [2], [11], [13]. In particolare, come si evince dalla Fig. 25b, la curva del tempo medio di riverbero misurato rientra all'interno della fascia dei tempi di riverbero teorici ottimali per quanto concerne le frequenze di interesse, infatti la maggior parte dell'energia sonora prodotta dal "parlato" è determinata dalle vocali, presenti soprattutto nell'intervallo di frequenza compreso tra 250 Hz e 500 Hz, mentre l'intelligibilità del messaggio vocale è fornita dalle consonanti, che interessano principalmente la gamma di frequenze che va da 2000 Hz a 4000 Hz. Per frequenze inferiori a 200 Hz il tempo di riverbero misurato risulta essere maggiore *dell'upper limit* in quanto, come già precedentemente evidenziato, ci si trova in un intorno della frequenza di Schroeder e, quindi, predominano le caratteristiche modali legate all'ambiente, non oggetto del presente intervento. In sintesi, le attività di progettazione degli interventi previsti si sono articolate secondo le seguenti fasi principali:

- caratterizzazione dello stato di fatto dell'aula in esame (*ante-operam*) mediante una campagna di misure dei principali descrittori acustici della sala (tempo di riverberazione, indice di chiarezza, STI);
- analisi dettagliata e studio delle caratteristiche acustiche dell'ambiente oggetto dell'intervento;

- individuazione dei parametri acustici ottimali per l'aula in esame e relativo calcolo degli assorbimenti ottimali;
- progettazione degli interventi, individuazione dei materiali con rispettive caratteristiche acustiche e tecnologiche;
- simulazioni dello stato di progetto al fine di prevedere lo stato acustico dopo la realizzazione delle correzioni acustiche;
- misure di verifica dei principali descrittori acustici della sala (tempo di riverberazione, indice di chiarezza, STI) dopo la realizzazione dell'opera (*post-operam*)

I risultati conseguiti sono stati molto apprezzati anche dai docenti. Si riporta, a dimostrazione di ciò, il commento di uno di essi:

“Dal giorno in cui è stata completata l'attività di correzione acustica, il clima della classe è cambiato totalmente. Qualsiasi segnale acustico risulta “ovattato”, i rumori fastidiosi sono più attutiti e sopportabili, non c'è nessun eco o rimbombo di sorta: queste situazioni rendono l'ambiente della classe molto più rilassante e la comunicazione più agevole. A parte la gradevole estetica generata dai disegni coinvolgenti e dal colore rilassante dei pannelli fonoassorbenti applicati al soffitto e alle pareti dell'aula, nella nuova situazione si percepisce un maggior controllo dei toni della voce, sicuramente più morbidi e piacevoli all'ascolto. Durante le spiegazioni e le conversazioni è possibile mantenere toni di voce più bassi e modulati, in quanto l'acustica risulta nettamente migliorata. Il clima della classe è sicuramente meno stressante, con una ricaduta positiva sull'andamento generale apprenditivo e relazionale.”

Gli autori, al termine della realizzazione dell'intervento di correzione acustica dell'aula scolastica in esame, finanziato dalla Biennale delle Arti e delle Scienze del Mediterraneo, hanno deciso, di comune accordo con il Presidente della BIMED dott. Andrea Iovino, di pubblicare questo lavoro, al fine di rendere edotta l'intera Comunità Scolastica, ed in particolare le Istituzioni che la rappresentano, sulla possibilità di migliorare notevolmente il comfort acustico degli ambienti scolastici a costi veramente contenuti e senza la necessità di realizzare modifiche strutturali, con benefici oggettivi e significativi sia per i docenti sia per i discenti.

Bibliografia

- [1] Astolfi, A., Carullo, A., Puglisi, G. E., & Pavese, L. (2014). *Effetti della correzione acustica in aule di scuola elementare sui parametri vocali delle insegnanti*, in Atti del 41 Convegno Nazionale AIA, pp. 1-8.
- [2] UNI 11367, 2010, Acustica in edilizia, Classificazione acustica delle unità immobiliari. Procedura di valutazione e verifica in opera.
- [3] Picard M., Bradley J. S., 2001, *Revisiting Speech Interference in Classrooms*, *Audiology*, 40, pp. 221-244.
- [4] Kob M., Behlery G., Kamprolfz A., Goldschmidt O., Neuschaefer-Rube C., *Experimental investigations of the influence of room acoustics on the teacher's voice*, *Acoust. Sci. & Tech.* 29 (1) (2008), pp. 86-94.
- [5] Giordano C., Nadalin J., Raimondo L., Astolfi A., Bottalico P., Riva G., Garzaro M., Pecorari G., *Valutazione clinico-strumentale della voce degli insegnanti ai fini della diagnosi precoce e della prevenzione delle patologie vocali*, in Atti del Seminario AIA "Acustica e ambienti scolastici", Merano, 18 marzo 2013, pp. 1-10.
- [6] Anderson, K. (2004, May). The problem of classroom acoustics: The typical classroom soundscape is a barrier to learning. In *Seminars in Hearing* (Vol. 25, No. 02, pp. 117-129). Copyright© 2004 by Thieme Medical Publishers, Inc., 333 Seventh Avenue, New York, NY 10001, USA.

- [7] Johnson C E. Children's phoneme identification in reverberation and noise. *J Speech Lang Hear Res.* 2000; 43 144-157.
- [8] Maxwell, L. E., & Evans, G. W. (2000). *The effects of noise on pre-school children's pre-reading skills.* *Journal of environmental Psychology*, 20(1), 91-97.
- [9] Evans, G. W., & Lepore, S. J. (1993). *Nonauditory effects of noise on children: A critical review.* *Children's environments*, 31-51.
- [10] Evans, G. W., & Maxwell, L. (1997). *Chronic noise exposure and reading deficits: The mediating effects of language acquisition.* *Environment and behavior*, 29(5), 638-656.
- [11] Astolfi A., Garai M., *Linee Guida per una corretta progettazione acustica di ambienti scolastici*, Associazione Italiana di Acustica, 2017.
- [12] Ruggiero, A., Russo, D. (2016). *Acoustical design and experimental verification of school music rooms: A case study.* *Applied Acoustics*, 107, pp. 1-9.
- [13] DIN 18041 Hörsamkeit in Räumen — Anforderungen, Empfehlungen und Hinweise für die Planung (Acoustic quality in rooms – Specifications and instructions for the room acoustic design), 2016.
- [14] ISO 3382, Acoustics – Measurement of the reverberation time – Part 1: Performance rooms (2005); Acoustics — Measurement of room acoustic parameters — Part 2: Reverberation time in ordinary rooms (2008).

- [15] CEI EN 60268-16:2011, Sound System equipment – Part 16: Objective rating of speech intelligibility by speech transmission index.
- [16] Ruggiero, A., Russo, D. *Ottimizzazione acustica di sale da concerto: il caso studio di una scuola statale*, in Atti del 42 Convegno Nazionale AIA.