



POLITECNICO DI TORINO  
Repository ISTITUZIONALE

Acustica delle aule scolastiche: un esempio di intervento di miglioramento innovativo e integrato

*Original*

Acustica delle aule scolastiche: un esempio di intervento di miglioramento innovativo e integrato / Astolfi, Arianna; Puglisi, Giuseppina Emma; Shtrepi, Louena. - In: INGENIO. - ISSN 2307-891X. - ELETTRONICO. - (2020), pp. 1-6.

*Availability:*

This version is available at: 11583/2837507 since: 2020-06-27T15:34:54Z

*Publisher:*

Galazzano : Imready arl

*Published*

DOI:

*Terms of use:*

openAccess

This article is made available under terms and conditions as specified in the corresponding bibliographic description in the repository

*Publisher copyright*

(Article begins on next page)

# Acustica delle aule scolastiche

## *Un intervento di miglioramento innovativo e integrato*

Arianna Astolfi, Giuseppina Emma Puglisi, Louena Shtrepi, Dipartimento Energia, Politecnico di Torino

### INTRODUZIONE

Garantire le condizioni acustiche ottimali per la trasmissione di messaggi vocali nelle aule scolastiche di qualsiasi ordine e grado deve essere l'obiettivo primario della buona pratica progettuale. La cattiva acustica nelle aule scolastiche, in termini di eccessivi livelli di rumore e elevati tempi di riverberazione, ricade negativamente sui docenti e sui discenti. In tali condizioni, ai primi sono richiesti uno sforzo e carico vocale eccessivi che possono provocare patologie anche gravi all'apparato fonatorio<sup>1</sup>. Ai secondi è richiesto uno sforzo di ascolto elevato ed è stato evidenziato come tali condizioni peggiorino di circa il 10% l'intelligibilità del parlato nei bambini dei primi anni di scuola, con possibili ricadute negative sulle capacità uditive, fonologiche e di lettura<sup>2</sup>.

In Italia la maggior parte delle aule adibite alla didattica, di ogni grado e tipologia, non risponde ai requisiti minimi riportati da norme tecniche e letteratura internazionale<sup>3</sup>. La messa a norma di questi ambienti richiede ingenti fondi e tempo dedicato ai rilievi strumentali, allo studio del progetto e alla sua realizzazione. Inoltre, su tutto il territorio nazionale sono esigui gli interventi di costruzione *ex-novo* di edifici scolastici, dunque la pratica comune è principalmente volta all'adeguamento delle condizioni esistenti. Le indicazioni progettuali prettamente acustiche non possono dunque prescindere dalle verifiche strutturali ai fini di garantire la sicurezza degli utenti, e tali necessità complicano il processo allungando i tempi di approvazione dei progetti ovvero rimodulandoli per evitare di trattare porzioni a rischio delle aule, che tipicamente corrispondono al soffitto. Un ottimo progetto acustico destinato ad ambienti scolastici, infatti, dovrebbe mirare a trattare opportunamente con materiali fonoassorbenti e anche fonodiffondenti sia le pareti laterali sia il soffitto così da sostenere il parlato dell'insegnante e l'energia utile a garantire elevata intelligibilità per il discente. Laddove però non siano verificate

<sup>1</sup> A. Astolfi et al., "Relationship between vocal doses and voice disorders on primary school teachers," Proc. of 9th European Conference on Noise Control EURONOISE 2012 (2012)

G. E. Puglisi et al., "Four-day-follow-up study on the voice monitoring of primary school teachers: Relationships with conversational task and classroom acoustics," J. Ac. Soc. Am. 141(1), 441-452 (2017).

<sup>2</sup> A. Astolfi et al., "Subjective and objective speech intelligibility investigations in primary school classrooms," J. Ac. Soc. Am. 131(1), 247-257 (2012).

G. E. Puglisi et al., "Influence of classroom acoustics on the reading speed: A case study on Italian second-graders," J. Ac. Soc. Am. EL 144(2), EL144-EL149 (2018).

N. Prodi et al., "Investigating listening effort in classrooms for 5- and 7-year-old children," Language, Speech, and Hearing Services in Schools 50, 196-210 (2019).

<sup>3</sup> S. Secchi et al., "Effect of outdoor noise and façade sound insulation on indoor acoustic environment of Italian schools," Appl. Acoust. 126, 120-130 (2017).

le opportune resistenze del controsoffitto ai carichi di caduta, non è possibile intervenire con pannelli e/o specchi acustici a soffitto.

A partire da queste conoscenze, è nato un importante progetto collaborativo che ha interessato il panorama scolastico torinese a partire dal 2015, ossia il progetto “Io Ascolto”. Si tratta di un progetto finanziato dalla Fondazione CRT, nato dalla collaborazione tra il Politecnico di Torino, l’Università degli Studi di Torino, l’Istituto Nazionale di Ricerca Metrologica (INRiM) e la Direzione Didattica Roberto D’Azeglio. L’obiettivo generale è stato quello di migliorare le capacità di apprendimento dei bambini a scuola, al fine di contrastare disturbi specifici dell’apprendimento come la dislessia che è riscontrabile in 4-8 studenti su 100. Dai primi risultati acquisiti sul campo, la presenza di una buona acustica delle aule è risultata un elemento cardine, e in particolare è stata evidenziata l’importanza della **chiarezza del parlato (C50)** nei processi di apprendimento poiché significativamente correlata alle abilità cognitive legate alla lettura<sup>4</sup>. Poiché la maggior parte delle classi coinvolte in Io Ascolto è risultata carente in termini acustici e dunque inadeguata a supportare i processi di apprendimento introdotti ai punti precedenti, è nata un’ulteriore collaborazione di ricerca applicata con Ecophon Saint-Gobain Italia che ha interamente sponsorizzato l’intervento di correzione acustica di due classi, e i cui risultati di progetto innovativo sono qui presentati.

## METODOLOGIA

### Il caso studio

Il plesso scolastico cui appartengono le aule oggetto della correzione acustica è situato in un’area urbana mista, in cui sono presenti edifici residenziali e terziari, e che non è distante da un ospedale. Il traffico nelle vie circostanti l’edificio è sostenuto, essendo tutte arterie che collegano la città nelle direzioni nord-sud ed est-ovest. Le due aule considerate sono analoghe in termini di dimensioni, geometria e finiture interne. La pianta è rettangolare e pari a circa 60 m<sup>2</sup>, l’altezza del soffitto piano è di circa 4,7 m e sono presenti tre grandi aperture finestrate. Entrambe le aule presentano un pavimento in graniglia e pareti intonacate. La Figura 1 rappresenta la condizione delle aule *ante-operam*.



**Figura 1** – Aule non trattate, *ante-operam*.

<sup>4</sup> G. E. Puglisi et al., “Influence of classroom acoustics on the reading speed: A case study on Italian second-graders,” J. Ac. Soc. Am. EL 144(2), EL144-EL149 (2018).

## L'intervento di correzione acustica

Basando il progetto di correzione acustica su criteri di massimizzazione della chiarezza del parlato e riduzione del tempo di riverberazione, sono stati impiegati i seguenti materiali:

- Per le pareti laterali, sistemi fonoassorbenti a parete Akusto™ Wall A Texona in pannelli 2700x1200x40 mm, con assorbimento medio a 500-1000 Hz ( $\alpha_{0.5-1\text{kHz}}$ ) di 1,00,
- Per il soffitto, sistema fonoassorbente Ecophon Master™ F in pannelli 600x600x40 mm, con  $\alpha_{0.5-1\text{kHz}}$  di 0,95.

### Misurazioni acustiche ante-operam

Le misurazioni sono state eseguite in una sola delle due aule poiché tra loro equivalenti in termini di dimensioni e finiture. La caratterizzazione della qualità acustica nella condizione *ante-operam* è stata eseguita ad aula vuota ma arredata ed è stata basata sulla misurazione del **tempo di riverberazione (T20, s)**, che si determina in base alla curva di decadimento del livello di pressione sonora in funzione del tempo a partire dall'istante di spegnimento di una sorgente sonora. Utilizzando un **clappatore** come sorgente sonora, ossia una sorgente impulsiva costituita da due braccia di legno con interposta gommapiuma che se sollecitate generano un rumore di breve durata ed elevata intensità, e di un **fonometro calibrato di classe-1** (modello XL2 di NTi Audio and Acoustic Analyser) come ricevitore del segnale, è stato dunque misurato il T20 dell'aula.

### Misurazioni acustiche post-operam

A seguito dell'intervento di correzione acustica sono state eseguite le misurazioni *post-operam* per valutare l'efficacia del progetto. In conformità alla norma **UNI EN 11532-2:2020** "Acustica in edilizia – Caratteristiche acustiche interne di ambienti confinati – Metodi di progettazione e tecniche di valutazione – Parte 2: Settore scolastico", è stato nuovamente misurato il tempo di riverberazione e in più anche il parametro della chiarezza del parlato (C50, dB), che è un indice legato all'intelligibilità della parola dipendente dalla distanza tra sorgente e ricevitore. Per tali misure *post-operam* è stata considerata una condizione occupata delle aule, simulando la presenza degli alunni per mezzo di pannelli fonoassorbenti in fibra 100% poliestere<sup>5</sup>. La strumentazione utilizzata è consistita in una **sorgente direttiva** (modello Talkbox di NTi Audio) per la misurazione della C50, in modo da replicare il diagramma di emissione del segnale vocale, in un **dodecaedro omnidirezionale** (modello 4292-L di Brüel&Kjær) per la misurazione del T20, e in un **fonometro calibrato di classe-1** (modello XL2 della NTi Audio) come ricevitore in entrambi i casi. La Talkbox è stata collocata, in corrispondenza della posizione tipicamente assunta dall'insegnante e ad una altezza dal pavimento pari a 1,5 m, mentre il fonometro è stato posizionato in asse con la sorgente in corrispondenza della prima fila di banchi, poi della fila centrale e infine dell'ultima fila. Il tempo di riverberazione è stato misurato in accordo con la procedura descritta nella norma **UNI EN ISO 3382-1:2009** "Acustica – Misurazione dei parametri acustici degli ambienti – Parte 1: Sale da spettacolo". Le sorgenti

<sup>5</sup> A. Astolfi et al., "Comparison between measured and calculated parameters for the acoustical characterization of small classrooms," Appl. Acoust. 69, 966–976(2008).

sono state impostate al fine di emettere un segnale *sweep* esponenziale di intensità adeguata ad assicurare il corretto rapporto segnale-rumore per tutte le bande di frequenza da 50 Hz a 22000 Hz<sup>6</sup>. Ogni *sweep* acquisita per ciascuna sorgente e in ciascun punto di misura è stata convoluta con il suo filtro inverso al fine di ottenere la risposta all'impulso da cui è stato possibile estrarre i parametri acustici di interesse<sup>7</sup>.

## L'intervento di messa in sicurezza del controsoffitto

Gli interventi di correzione acustica, in quanto interventi di manutenzione straordinaria sull'esistente nella maggior parte dei casi, devono prevedere necessariamente le adeguate verifiche di fattibilità strutturale al fine di garantire la sicurezza degli utenti una volta completati. Nel caso di inserimento di controsoffitti acustici, dunque, è essenziale verificare la resistenza dei solai esistenti e la pratica che nei tempi più recenti si sta mirando a mettere in atto è quella di integrare l'intervento acustico con l'inserimento di uno strato **antisfondellamento**. Le prestazioni acustiche del nuovo pacchetto con prestazioni strutturali ed acustiche, però, non sono note con facilità e accuratezza metrologica, dunque la previsione delle prestazioni in opera sono incognite in fase progettuale. La collaborazione con Ecophon Saint-Gobain Italia nel progetto Io Ascolto ha permesso di raggiungere un duplice obiettivo: da un lato quello di esecuzione di un progetto acustico a regola d'arte, dall'altro quello di certificazione di un innovativo sistema di controsoffitto con elevate prestazioni antisfondellamento ai carichi di caduta e acustiche che può garantire i requisiti di sicurezza occupazionale degli utenti. Nello specifico, i pannelli Ecophon Master™ F adottati per il trattamento superficiale del soffitto sono stati accoppiati ad un sistema antisfondellamento Gyproc Fireline di dimensioni nominali standard 1200×3000×15 mm e peso nominale 12,7 kg/m<sup>2</sup>, formate da nucleo in gesso, fibra di vetro e vermiculite con rivestimento esterno in carta (Figura 2). Gli esiti della certificazione del sistema innovativo di controsoffitto, che hanno soddisfatto i requisiti di sicurezza ai carichi di caduta, sono stati approvati all'Istituto Giordano (Gatteo, FC) e sono contenuti in un rapporto di prova ufficiale.



**Figura 2** – Installazione tramite pendinatura e sottostruttura metallica del controsoffitto antisfondellamento Gyproc Fireline e, nell'ultima immagine a destra, dei pannelli fonoassorbenti Ecophon Master™ F in aderenza.

<sup>6</sup> D. D'Orazio et al., "Room acoustic measurements using a high-SPL dodecahedron," Convention Paper of the 140th Audio Engineering Society Convention, 2-7 (2016).

<sup>7</sup> A. Farina, "L'acustica dei piccolo ambienti di ascolto," AES Italian Section, Milano (2001).

## RISULTATI

In Figura 3 è riportata una carrellata di immagini delle aule a seguito del trattamento acustico.



**Figura 3** – Aule trattate, *post-operam*.

L'esito delle misurazioni *ante-operam* ha restituito un tempo di riverberazione ( $T_{20}$ , s) in condizione di aula vuota pari a  $2,1 \pm 0,4$  s nel range di frequenza 125-4000 Hz. Per stimare il valore in condizione di aula occupata sono stati eseguiti i seguenti passaggi (vedi anche tabella 1), per ogni banda di ottava da 0.125 kHz a 8 kHz:

- Calcolo della differenza di assorbimento equivalente ( $\Delta A_{tot}$ ,  $m^2$ ) dovuto all'occupazione dell'aula da parte di 20 alunni di scuola primaria (corrispondenti all'80% degli occupanti, come richiesto dalla **UNI EN 11532-2:2020**),
- Calcolo dell'assorbimento equivalente dell'aula occupata ( $A_{tot,occ}$ ,  $m^2$ ), come somma dell'assorbimento equivalente dell'aula vuota ( $A_{tot,vuo}$ ,  $m^2$ ) ottenuto dall'inverso della formula di Sabine (equazione 1) e del  $\Delta A_{tot}$ ,
- Calcolo del tempo di riverberazione in condizione di aula occupata ( $T_{occ}$ , s) in funzione del  $A_{tot,occ}$ , a partire dalla equazione 1.

$$T = 0,16 \cdot \frac{V}{A_{tot}} (s) \quad (1)$$

Dove  $V$  è il volume dell'ambiente ( $m^3$ ) e  $A_{tot}$  è l'assorbimento acustico equivalente ( $m^2$ ).

Secondo tale calcolo, il tempo di riverberazione *ante-operam* in condizione di aula occupata è risultato pari a  $1,6 \pm 0,3$  s range di frequenza 125-4000 Hz.

**Tabella 1** – Parametri acustici dell'aula nella condizione *ante-operam*, in bande di ottava.

	Frequenza (Hz)						
	125	250	500	1000	2000	4000	8000
$\alpha$ di un alunno di scuola primaria (-) <sup>8</sup>	0,17	0,21	0,26	0,30	0,33	0,37	0,40
$\Delta A_{tot}$ dell'aula occupata ( $m^2$ )	3,40	4,20	5,20	6,00	6,60	7,40	8,00
$A_{tot,vuo}$ dell'aula vuota ( $m^2$ )	14,0	19,4	19,8	18,8	20,0	25,3	27,0
$A_{tot,occ}$ dell'aula occupata ( $m^2$ )	17,4	23,6	25,0	24,8	26,6	32,7	35,0
$T_{occ}$ dell'aula occupata (s)	2,2	1,7	1,6	1,6	1,5	1,2	1,1

La **UNI EN 11532-2:2020** individua il valore ottimale del tempo di riverberazione in funzione della destinazione d'uso dell'aula e del volume. Per le aule didattiche in cui è richiesto elevato

<sup>8</sup> L. L. Beranek, "Acoustics," McGraw-Hill, 1993.

grado di intelligibilità del parlato anche per persone con deficit uditivi o non madrelingua, ovvero in cui è prevista la presenza di più oratori, la norma identifica la seguente formula per la previsione del valore ottimale del tempo di riverberazione nel range 125-4000 Hz ( $T_{ott}$ , s):

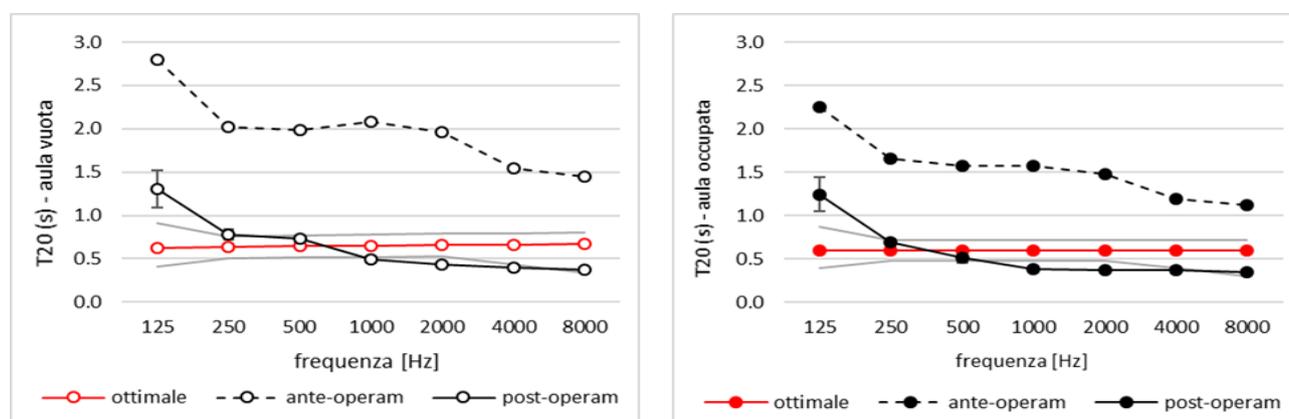
$$T_{ott} = [0,32 \cdot (10 \log_{10} V) - 0,17](s) \quad (2)$$

Dove  $V$  è il volume dell'ambiente ( $m^3$ ).

I risultati ottenuti in entrambe le condizioni di occupazione dell'aula sono superiori a quelli calcolati come ottimali in base all'equazione 2. Per queste aule, il valore ottimale e nel range di frequenza 125-4000 Hz, è pari a 0,60 s nel caso di aula occupata e 0,65  $\pm$ 0,01 s nel caso di aula vuota. Con l'intervento di correzione acustica che ha previsto il trattamento delle pareti laterali e anche del soffitto delle aule, il T20 misurato *post-operam* nelle medesime condizioni di aula vuota è risultato pari a 0,69 s  $\pm$ 0,34 s. Considerando la condizione simulata occupata, il T20 misurato *post-operam* è risultato pari a 0,60 s  $\pm$ 0,34 s. La Figura 4 riporta la sintesi di tali risultati relativi al T20, che adeguati sia in condizione di aula vuota sia in condizione di aula occupata.

Per quanto riguarda la misurazione della chiarezza del parlato, non è stato possibile effettuare un confronto tra le condizioni *ante-* e *post-operam*. Tuttavia, la letteratura scientifica mostra che questo parametro risulti correlato negativamente e significativamente al tempo di riverberazione (ossia all'aumentare del tempo di riverberazione, la chiarezza diminuisce) e che dunque nella condizione *ante-operam* ci si potesse aspettare un valore di C50 inferiore al limite indicato come ottimale dalla **UNI EN 11532-2:2020**, che è pari a 2 dB al fine di garantire le ottime condizioni di ascolto finalizzato all'apprendimento in aula.

Considerando la condizione di aula simulata occupata, i risultati mostrano che nel range 500-2000 Hz la C50 è sempre superiore a quella richiesta dalla norma. In particolare, la tabella 2 riassume i valori misurati di C50 in bande di ottava e poi mediati nel range 500-2000 Hz, separatamente per ciascun ricevitore e poi come media spaziale.



**Figura 4** - Confronto tra *ante-operam* e *post-operam* del tempo di riverberazione ( $T_{20}$ , s) in condizione di aula vuota (a sinistra) e di aula occupata (a destra).

**Tabella 2** – Chiarezza del parlato (C50, dB) misurata post-operam nella condizione di aula simulata occupata.

	Frequenza (Hz)							Media (500-2000 Hz)
	125	250	500	1000	2000	4000	8000	
<i>Ricevitore 1 (prima fila)</i>	2,3	5,4	11,2	14,7	16,4	17,6	19,7	<b>14,1</b>
<i>Ricevitore 2 (fila centrale)</i>	0,6	3,5	6,6	11,5	10,5	13,1	15,1	<b>9,5</b>
<i>Ricevitore 3 (ultima fila)</i>	0,8	7,4	6,5	12,9	10,4	11,6	12,9	<b>10,0</b>
<b>Media spaziale</b>								<b>11,2 ±2,5</b>

## CONCLUSIONI

In questo lavoro è stata riportata l'esperienza pratica di progettazione e realizzazione di un intervento di correzione acustica innovativo che ha coinvolto due aule di scuola primaria. Date le esigenze acustiche e di sicurezza strutturale da garantire, legate alla destinazione d'uso e alla fruizione degli ambienti, l'intervento è stato volto ad impiegare sistemi a parete e a soffitto dalle elevate prestazioni tecniche. Per tutti i sistemi sono stati garantiti coefficienti di assorbimento acustico che hanno permesso l'abbassamento del tempo di riverberazione e l'incremento della chiarezza del parlato. Per il sistema installato a soffitto è stata inoltre certificata ufficialmente, unica nel panorama attuale, una soluzione integrata di controsoffitto antisfondellamento ai carichi di caduta e acustico. Gli esiti di questa esperienza mostrano che **l'adeguamento di strutture scolastiche esistenti al fine di garantire elevati requisiti di comfort acustico agli occupanti, i quali comprendono sia i docenti sia i discenti, sono possibili e realizzabili nel rispetto delle più stringenti richieste di sicurezza strutturale.**