

Analisi sperimentale della qualità acustica e del rumore impiantistico in due aule universitarie

Rachele Mondello^{a*} | Gianpiero Evola^a

^a Dipartimento di Ingegneria Elettrica
Elettronica e Informatica,
Università degli Studi di Catania,
Via Santa Sofia, 64, 95100 Catania

* Autore di riferimento:
mondellorachele@gmail.com

Ricevuto: 22/1/2026

Accettato: 27/3/2026

On line first: 8/4/2026

DOI: 10.3280/ria2026oa21917

ISSN: 2385-2615

Questo articolo riporta i risultati di uno studio sperimentale condotto presso due aule didattiche dell'Università degli Studi di Catania, finalizzato alla verifica della loro qualità acustica in accordo con la normativa tecnica e la letteratura di settore. Le due aule presentano un differente layout e sono caratterizzate da una diversa distribuzione dei materiali di tipo fonoassorbente, dando luogo a risposte acustiche significativamente diverse nonostante abbiano volume molto simile. Le misure hanno riguardato il tempo di riverberazione, la chiarezza del parlato (C50) ed il rumore prodotto dagli impianti di climatizzazione a funzionamento continuo. Il lavoro, oltre ad evidenziare nel dettaglio gli aspetti metodologici onde facilitare la riproducibilità delle indagini in altri edifici, anche di altri Atenei, dimostra che le aule investigate – pur caratterizzate da un buon tempo di riverberazione – soffrono di una carente chiarezza e di una eccessiva rumorosità degli impianti di climatizzazione, legata principalmente alla loro inadeguata equilibratura e conduzione.

Parole chiave: tempo di riverberazione, chiarezza, rumore impiantistico, aule universitarie

Experimental analysis of acoustic quality and air conditioning system in two university classrooms

This article reports the results of an experimental study conducted in two classrooms at the University of Catania, aimed at verifying their acoustic quality based on technical standards and relevant literature. The two classrooms have a different layout and are characterized by a different distribution of sound-absorbing materials, giving rise to significantly different acoustic responses despite having very similar volume. The measurements regarded the reverberation time, the speech clarity (C50) and the noise produced by the air conditioning systems. The work, in addition to highlighting in detail the methodological aspects in order to facilitate the reproducibility of the investigations in other buildings, including those of other universities, shows that the investigated classrooms – although characterized by good reverberation time – suffer from a lack of clarity and excessive noise of the air conditioning systems, mainly due to their inadequate balancing and conduction.

Keywords: reverberation time, speech clarity, noise from HVAC systems, university classrooms

1 | Introduzione

La corretta progettazione acustica degli ambienti didattici in ambito scolastico e universitario riveste, insieme agli aspetti funzionali ed architettonici, un ruolo fondamentale per garantire condizioni adeguate al processo di insegnamento e apprendimento. La qualità acustica degli spazi incide direttamente sulla comprensione del parlato, sul livello di attenzione degli studenti e sul comfort uditivo complessivo.

Condizioni acustiche non ottimali, quali ad esempio elevati tempi di riverberazione, presenza di rumore di fondo e scarso isolamento acustico tra ambienti adiacenti, possono aumentare lo sforzo legato all'ascolto e ridurre l'efficacia della comunicazione verbale [1, 2]. Inoltre, recenti studi hanno dimostrato che questi aspetti possono favorire il rumore prodotto dagli studenti durante le lezioni [3, 4] inducendo il docente a compiere un maggiore sforzo vocale [5, 6]. Per questo

motivo, la norma UNI 11532-2:2020 [7] fornisce criteri e requisiti prestazionali per la valutazione della qualità acustica degli ambienti scolastici e universitari. Tra i parametri da valutare sono da menzionare il tempo di riverberazione, la chiarezza del parlato (C_{50}), ed il rumore generato dagli impianti di climatizzazione a funzionamento continuo, per i quali la norma fornisce valori ottimali. La pubblicazione di questa norma ha dato impulso alla letteratura riguardante la qualità acustica delle aule scolastiche e universitarie, con numerosi progetti di ricerca e casi studio [8, 9] che hanno permesso di evidenziare l'esigenza di attenzionare anche le basse frequenze, disponendo in modo opportuno materiali fonoassorbenti e riflettenti [10, 11]. Per approfondire ulteriormente questa tematica ed arricchire la letteratura sul tema, il presente articolo riporta i risultati di una campagna di misure sperimentali condotta in due aule universitarie dell'Università di Catania. Le misure del tempo di riverberazione, della chiarezza del parlato e del ru-

more impiantistico hanno consentito di evidenziare criticità e anomalie legate alla distribuzione dei materiali e alla conduzione degli impianti di climatizzazione che – pur in presenza di un idoneo tempo di riverberazione – rendono poco confortevole la fruizione delle aule.

2 | Metodologia

2.1 | Descrizione degli ambienti

La prima aula universitaria, denominata T2, si trova nell'edificio "Tetti Verdi", situato presso la Cittadella Universitaria in via Santa Sofia (Catania). Ha una forma rettangolare con area di 152.1 m² (11.7 m × 13 m), altezza pari a 3.8 m e volume complessivo V = 578 m³; l'aula presenta una superficie finestrata di 20 m² disposta su tre pareti, ed un totale di 58 posti a sedere. Il plesso è situato in un'area relativamente decentrata della Cittadella Universitaria, distante circa 100 m in linea d'aria da un importante asse viario della città e sopraelevata rispetto ad esso. La struttura portante è realizzata in acciaio, e risulta essere costituita da pilastri, travature reticolari, e lamiera grecata posta a vista all'intradosso del solaio di copertura. Quest'ultima superficie presenta un basso coefficiente di assorbimento acustico, e contribuisce in maniera significativa alla riflessione delle onde sonore. Tuttavia, questo fenomeno è in parte attenuato dalla presenza di impianti aeraulici e dalle travi in acciaio a vista, che permettono di diffondere il suono evitandone la riflessione speculare. Un discreto fonoassorbimento è garantito dalle tamponature verticali, realizzate con blocchi in calcestruzzo di argilla espansa non intonacati, grazie alle irregolarità superficiali ed alla porosità che li caratterizza. Gli arredi sono costituiti da tavoli con piano rigido in laminato e struttura metallica, e da sedute mobili con struttura metallica e seduta in legno. I materiali impiegati negli arredi presentano bassa porosità e forniscono un trascurabile assorbimento acustico, con un comportamento prevalentemente riflettente alle medie e alte frequenze. La disposizione regolare degli arredi introduce una limitata diffusione del campo sonoro, senza incidere in modo significativo sul tempo di riverberazione (Figura 1).

La seconda aula universitaria, denominata IE, ha pianta quadrata di 136.9 m² (11.7 m × 11.7 m), altezza media di 4 m, superficie finestrata di 21 m² posta su un'unica parete che si affaccia su un cortile interno poco praticato, e volume V = 519.4 m³ calcolato al netto della gradinata che caratterizza l'aula. I posti a sedere sono 156. La struttura è intelaiata in cemento armato, le pareti intonacate e di conseguenza molto riflettenti; la pavimentazione in materiale plastico contribuisce alla riflessione delle onde sonore. Il compito di attenuare il campo sonoro riverberato è demandato al controsoffitto, interamente costituito da pannelli in lana di legno con ottime qualità fonoassorbenti. Gli arredi sono costituiti da banchi e sedute fisse disposte su gradinata, con struttura portante in metallo e seduta e schienale in legno. I materiali impiegati sono caratterizzati da bassa porosità e determinano un comportamento prevalentemente riflettente alle medie e alte frequenze (Figura 2).



Fig. 1 – Foto dell'aula T2
Picture of room T2

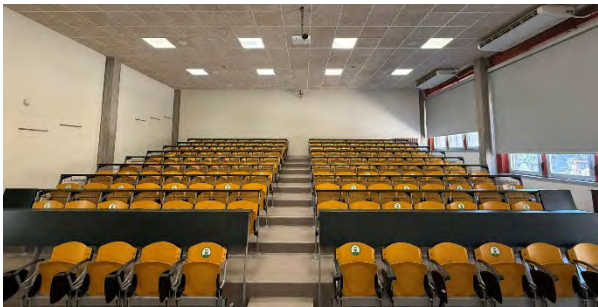


Fig. 2 – Foto dell'aula IE
Picture of room IE

La configurazione a gradinata, unitamente all'elevato numero di sedute, introduce nell'aula IE una maggiore articolazione geometrica dell'ambiente, favorendo una diffusione più efficace del campo sonoro rispetto a una disposizione planare. Tuttavia, il contributo degli arredi all'assorbimento complessivo dell'aula rimane secondario, risultando nettamente inferiore a quello fornito dagli elementi edilizi e, in particolare, dal controsoffitto fonoassorbente. In conclusione, la Tabella 1 riassume le principali caratteristiche delle aule.

Tab. 1 – Principali caratteristiche delle aule oggetto di studio
Main features of the two university classrooms

	Aula T2	Aula IE
Area di calpestio	152.1 m ²	136.9 m ²
Altezza media	3.8 m	4.0 m
Volume	578.0 m ³	519.4 m ³
Area finestre	20.0 m ²	21.0 m ²
Posti a sedere	58	156

2.2 | Descrizione degli impianti termici

Le due aule sono caratterizzate dalla presenza di impianti a funzionamento continuo per la climatizzazione estiva e invernale, ma con caratteristiche diverse.

In particolare, l'aula T2 è servita da un impianto a tutt'aria con ricircolo, le cui canalizzazioni a sezione rettangolare installate a vista in sospensione sono realizzate con pannelli di poliuretano rivestiti in alluminio (Figura 1). I due canali di man-

data sono dotati ciascuno di 6 diffusori circolari a cono fissi in alluminio, montati nella parte inferiore tramite collari DN 315 mm con serranda di regolazione. La ripresa dell'aria interna avviene tramite 6 griglie (dimensione 300 × 800 mm) situate nei due canali rettangolari che corrono lungo le pareti laterali. La velocità dell'aria, misurata nelle normali condizioni di funzionamento, è di circa 4 m/s nei pressi dei diffusori di mandata e di circa 0.3 m/s di fronte alle griglie di ripresa.

L'aula IE, invece, è dotata di 2 unità split a volume di refrigerante variabile (VRF) installate a soffitto nei pressi della parete esterna, con le rispettive unità esterne (modello LG ARUN50GS2A) poste su una pensilina sopra l'unica porta di collegamento con l'ambiente esterno. Ciascuna unità ha una potenza termica nominale di 14 kW in raffreddamento e di 16 kW in riscaldamento. Le unità interne hanno dimensioni 1600 × 690 × 235 mm, con una portata d'aria di 1740 m³/h alla massima velocità dei ventilatori. Il livello di potenza sonora dichiarato nella scheda tecnica delle unità interne è di 68 dB(A), con livello di pressione sonora di 49 dB(A) misurato in camera anecoica ai sensi della UNI EN ISO 3745:2017 [12].

2.3 | Metodologia di misura e calcolo degli indicatori

2.3.1 | Tempo di riverberazione

I rilievi acustici sono stati effettuati utilizzando il fonometro di Classe 1 "Solo 01 dB" ed il software di misura ed elaborazione dati "01dB Environment Suite - dBBA1 32".

Il tempo di riverberazione, determinato secondo la norma UNI EN ISO 3382-2:2008 [13], è stato misurato considerando una dinamica di 20 dB (T20), in bande di terzi d'ottava nell'intervallo di frequenza da 100 Hz a 5000 Hz. Il segnale è stato generato tramite sorgente impulsiva (clappatore), ed è stato adottato il metodo della risposta integrata all'impulso con integrazione inversa di Schroeder. Per ogni banda di terzi di ottava è stata così generata la curva di decadimento con un passo temporale di 20 ms.

In accordo con UNI EN ISO 3382-2:2008, e tenuto conto delle dimensioni delle aule oggetto di studio, sono state adottate due diverse posizioni della sorgente sonora, collocate in punti differenti in prossimità della cattedra e a una quota adeguata rispetto al piano di calpestio, così da garantire una corretta eccitazione del campo acustico. Per ciascuna posizione sorgente sono state individuate dodici postazioni microfoniche fisse, distribuite uniformemente all'interno del volume dell'aula, per un totale di 24 combinazioni sorgente-microfono in ciascuna aula (Figura 3). Tale valore supera il numero minimo richiesto dalla UNI EN ISO 3382-2:2008 per il metodo di precisione, che prevede almeno 12 combinazioni indipendenti con non meno di due posizioni della sorgente sonora. I due valori di tempo di riverberazioni ottenuti per ciascuna posizione di misura sono stati quindi mediati aritmeticamente.

Le postazioni microfoniche sono state definite evitando configurazioni simmetriche e garantendo il rispetto delle distanze minime prescritte dalla norma. In particolare, il micro-

fono è stato sempre collocato a una distanza superiore a 1.0 m dalle superfici (pareti, pavimento e soffitto), così da limitare l'influenza delle riflessioni precoci sul segnale misurato.



Fig. 3 – Posizioni di sorgente (S) e microfono (X) per la misura del tempo di riverberazione in aula T2 (in alto) e in aula IE (in basso)
Positions of source (S) and microphone (X) for the measurement of reverberation time in room T2 (top) and room IE (bottom)

La distanza reciproca tra le postazioni microfoniche è mantenuta sotto i 2.0 m, al fine di assicurare l'indipendenza spaziale delle misure ed evitare fenomeni di correlazione del campo acustico. La quota di misura è pari a 1.2 m dal piano di calpestio, come indicato dalla norma per ambienti destinati all'ascolto di parlato. È stata inoltre verificata la distanza minima da garantire tra la sorgente sonora e la postazione microfonica più vicina, calcolata secondo la relazione tratta da UNI EN ISO 3382-2:2008 [13]:

$$d_{min} = 2 \cdot \sqrt{V/(c \cdot T)} \quad (m) \quad (1)$$

Nell'equazione (1), V è il volume dell'ambiente, c la velocità del suono pari a 343 m/s e T il tempo di riverberazione stimato in prima approssimazione. In base ai volumi delle aule analizzate e assumendo in prima battuta $T = 1$ s, si ottiene una

distanza minima pari a $d_{min} = 2.5$ m, condizione soddisfatta in tutte le configurazioni di misura adottate.

Infine, la UNI 11532-2:2020, in accordo con la UNI 11367:2023 [14], definisce per le aule di Categoria A3 (aule destinate alla didattica, anche con più oratori e con persone affette da deficit uditivi) un tempo di riverberazione ottimale funzione del volume dell'ambiente:

$$T_{ott} = 0.32 \cdot \log(V) - 0.17 \quad (s) \quad (2)$$

Il valore ottimale risultante, pari in entrambe le aule a circa 0.7 s, garantisce un elevato grado di intelligibilità del parlato. Esso però non è assoluto, ma viene utilizzato per definire un intervallo di conformità con ampiezza del 20% tra i 250 Hz e i 2000 Hz, ed ampiezza maggiore alle altre frequenze: ciò consente una valutazione più realistica delle prestazioni acustiche in relazione all'intelligibilità del parlato. Inoltre, poiché le misure sperimentali del tempo di riverberazione sono effettuate in ambiente non occupato, la normativa richiede che la verifica di conformità sia riferita a una condizione di occupazione convenzionale pari all'80% della capienza dell'aula. A tal fine, i valori misurati ad aula vuota (T) vengono corretti mediante una relazione che tiene conto dell'incremento di assorbimento acustico dovuto alle persone, consentendo di stimare il tempo di riverberazione in condizioni di aula occupata:

$$T_{occ} = T \cdot [1 + (N_p \cdot \Delta A_p / T) / (0.16 \cdot V)]^{-1} \quad (s) \quad (3)$$

In questo studio, si è considerato il contributo di $N_p = 46$ studenti (aula T2) e $N_p = 125$ studenti (aula IE), con valori di superficie aggiuntiva equivalente di assorbimento acustico (ΔA_p) tratti dall'Appendice C della UNI 11532-2:2020 (persona seduta su sedia non imbottita).

2.3.2 | Chiarezza del parlato (C_{50})

Per quanto riguarda la chiarezza del parlato, si ricorda che l'indice C_{50} rappresenta il rapporto tra l'energia sonora che giunge al ricevitore nei primi 50 ms dopo l'emissione del segnale, e quella che giunge successivamente. Esso si misura in dB ed evidenzia il contenuto energetico delle prime riflessioni, il cui ruolo nel migliorare la comprensione del segnale vocale è ormai consolidato in letteratura [15]. Il C_{50} è influenzato dalla distribuzione dei materiali fonoassorbenti o diffondenti; un valore maggiore di 1.5 dB, e fino a 6.5 dB, è considerato conveniente per garantire una buona intelligibilità in sale destinate al parlato, quali le aule scolastiche [16].

Anche per la misura del C_{50} è stata utilizzata una sorgente impulsiva (clappatore), collocata in prossimità della cattedra nella posizione normalmente occupata dal docente (Figura 4). Per quanto riguarda le postazioni microfoniche, esse sono definite dalla UNI 11532-2:2020: per aule con volume superiore a 250 m³ e prive di sistemi di amplificazione sonora, sono previste quattro posizioni microfoniche rappresentative dell'area effettivamente occupata durante le normali attività didattiche

(Figura 4). Le misure sono state effettuate a una quota di 1.2 m dal piano di calpestio, corrispondente all'altezza della testa di una persona seduta. Tre postazioni (P1, P2 e P3) sono state disposte lungo l'asse longitudinale dell'aula, in allineamento con la sorgente sonora, rispettivamente in posizione prossima, centrale e distante, mentre la quarta postazione (P4) è stata individuata in una zona decentrata rappresentativa della condizione di ascolto più sfavorevole, ovvero nei pressi delle sorgenti sonore o delle finestre. Le misure, in bande di ottava ad impianti spenti, sono state ripetute due volte per ogni postazione microfonica, e mediate.



Fig. 4 – Posizioni microfoniche per la misura del C_{50} e del rumore impiantistico - Aula T2 (in alto) ed aula IE (in basso)
Positions of the microphone for the measurement of C_{50} and noise from the thermal systems – Room T2 (top) and room IE (bottom)

Infine, si è calcolata la media tra i valori relativi alle bande dei 500 Hz, 1000 Hz e 2000 Hz. La UNI 11532-2:2020 raccomanda che, in aule scolastiche e universitarie, tale media sia non inferiore a 2 dB, includendo l'incertezza estesa di misura ($U = 1$ dB), quale condizione minima per un'adeguata

intelligibilità del parlato. Tale requisito deve essere verificato in ambienti di volume inferiore a 250 m³, e in questo lavoro viene richiamato come mero termine di paragone.

2.3.3 | Rumore impiantistico

Le misure del rumore impiantistico sono state effettuate, in accordo con la UNI 11532-2:2020, utilizzando le stesse postazioni microfoniche adottate per la misura del C₅₀ (Figura 4). Nel caso del rumore impiantistico, la sorgente sonora è però rappresentata dagli stessi impianti di climatizzazione a funzionamento continuo presenti nelle aule, nelle normali condizioni operative.

Ai sensi della UNI 11532-2:2020, il livello di pressione sonora ponderato in scala A rilevato in ciascuna posizione microfonica (L_{Aeq}) è stato corretto per tenere conto del rumore di fondo (K1) e del tempo di riverberazione delle aule (K2), conducendo in ogni posizione microfonica alla determinazione del livello di rumore corretto e normalizzato indotto dagli impianti a funzionamento continuo ($L_{pu,c}$):

$$L_{pu,c} = L_{Aeq} - K1 + K2 \quad (dB) \quad (4)$$

Nell'equazione (4), K1 = 0 se il rumore di fondo, ad impianto disattivato, è di oltre 10 dB(A) più basso del livello di pressione sonora ponderato in scala A rilevato con impianto in funzione. Il termine K2 è invece determinato secondo l'equazione (5) in funzione del rapporto tra il tempo di riverberazione medio dell'aula (T) ed il tempo di riverberazione di riferimento (T₀); quest'ultimo, se il volume V è compreso fra 100 m³ e 2500 m³, si determina secondo l'equazione (6).

$$K2 = -10 \cdot \log(T/T_0) \quad (dB) \quad (5)$$

$$T_0 = 0.05 \cdot V^{0.5} \quad (s) \quad (6)$$

In conclusione, è stato determinato il descrittore $L_{ic,int}$ ottenuto dalla media energetica spaziale dei valori di $L_{pu,c}$ per le varie postazioni microfoniche. Ai fini delle verifiche di conformità, tale descrittore viene maggiorato per tenere conto dell'incertezza estesa di misura U:

$$U = k \cdot s_m \quad (dB) \quad (7)$$

Nell'equazione (7), secondo UNI 12999-1:2021 lo scarto tipo è $s_m = 1.1$ dB(A) per gli impianti a funzionamento continuo, mentre si assume un fattore di copertura $k = 1$ per un livello di fiducia pari all'84% [17].

3 | Risultati e discussione

3.1 | Tempo di riverberazione

La Figura 5 mostra gli spettri medi del tempo di riverberazione in terzi di ottava rilevati nelle due aule universitarie; per ciascuna aula sono presenti due curve, una per ciascuna posizione della sorgente. I valori misurati non necessitano di

correzioni per tenere conto dell'accuratezza di misura, come suggerito in Appendice A della UNI 11532-2:2020 in caso di risposta integrata all'impulso. È immediato osservare come l'aula T2, pur avendo un volume netto superiore di circa il 10% rispetto all'aula IE, presenti un tempo di riverberazione di circa 0.2-0.3 s inferiore a tutte le frequenze; in particolare, nell'aula T2 si ha $T = 0.8 - 0.9$ s, mentre nell'aula IE le misure hanno restituito $T = 1.0 - 1.2$ s. Lo spettro del tempo di riverberazione è in entrambi i casi abbastanza uniforme, con un leggero incremento osservabile tra gli 800 Hz e i 1250 Hz nell'aula T2, e tra i 1600 Hz e i 3150 Hz nell'aula IE.

In Figura 6 sono diagrammati i valori della deviazione standard (STD) dei tempi di riverberazione misurati per le 24 combinazioni sorgente-ricevitore in ciascuna banda di ottava. A tal fine, il tempo di riverberazione è stato preventivamente rappresentato in bande di ottava mediando aritmeticamente i valori nelle rispettive bande di terzi di ottava.

I valori di STD posso essere utilmente paragonati alla *Differenza Appena Percepibile (Just Noticeable Difference, JND)*: essa costituisce un riferimento di tipo percettivo, utile per valutare la reale significatività delle differenze riscontrate tra diverse posizioni di ascolto. Infatti, variazioni del tempo di riverberazione inferiori alla JND non vengono percepite dall'uditore medio: qualora risultasse $STD < JND$, il tempo di riverberazione si potrebbe quindi ritenere pressoché costante al variare della posizione di sorgente e ricevitore, indicando una marcata uniformità del campo sonoro all'interno dell'aula. La UNI EN ISO 3382-1:2009 [18] non riporta un valore di JND per il tempo di riverberazione,

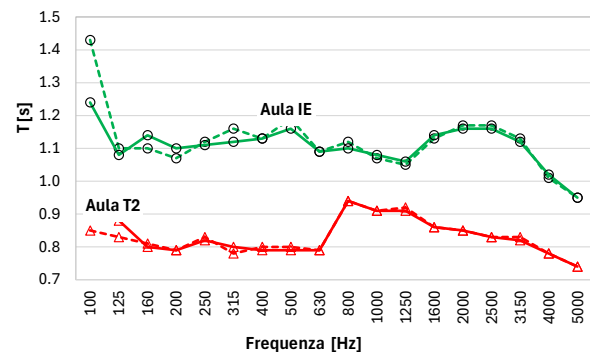


Fig. 5 – Spettri del tempo di riverberazione nelle due aule (ogni curva rappresenta i valori medi per una stessa posizione sorgente)
Spectra of reverberation time in the two classrooms (each curve shows the mean values for a given source position)

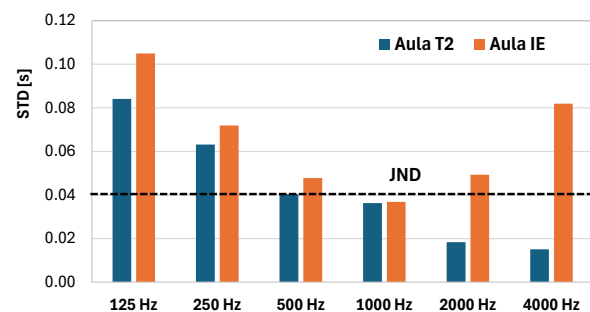


Fig. 6 – Deviazione standard per il tempo di riverberazione
Standard deviation for the reverberation time

ma facendo riferimento all'*Early Decay Time* (EDT), parametro ritenuto comunque rappresentativo del riverbero percepito, essa suggerisce una JND pari al 5% del valore misurato. Altri studi sperimentali hanno dimostrato un valore di JND di circa il 4% per il tempo di riverberazione [19, 20]. Nella due aule analizzate è dunque ragionevole assumere $JND = 0.04$ s.

Alla luce di queste considerazioni e dei valori di STD riportati in Figura 6, le due aule hanno comportamento diverso: l'aula T2 presenta infatti valori inferiori rispetto all'aula IE in quasi tutte le bande. La differenza più evidente è alle frequenze oltre i 250 Hz, per le quali l'aula T2 ha $STD \leq JND$, mentre nell'aula IE si ottengono valori ben superiori. La deviazione standard alle basse frequenze (125 Hz e 250 Hz) è invece più elevata in entrambe le aule ed è compresa tra 0.06 e 0.1 s, valore non irrilevante se paragonato al tempo di riverberazione misurato e alla JND. Questi risultati sono coerenti con i valori della frequenza di Schroeder (80 Hz per l'aula T2 e 100 Hz per l'aula IE): per frequenze prossime o inferiori vengono meno le condizioni di campo sonoro perfettamente diffuso ed emergono in modo evidente i modi propri, generando una più marcata disuniformità nella distribuzione dell'energia sonora.

Infine, la Figura 7 mostra il confronto tra i tempi di riverberazione riferiti alle due aule occupate all'80% e gli intervalli di conformità definiti dalla UNI 11532-2:2020. L'aula T2 presenta una situazione ideale, con tempo di riverberazione a sala occupata uniforme alle varie frequenze, interamente all'interno del range di riferimento e molto prossimo al valore ottimale. L'aula IE, nonostante il maggiore tempo di riverberazione a sala vuota, grazie alla maggiore capienza risulta ad aula occupata leggermente più sorda, soprattutto oltre i 500 Hz; il tempo di riverberazione ad aula occupata rientra nel range di conformità della norma.

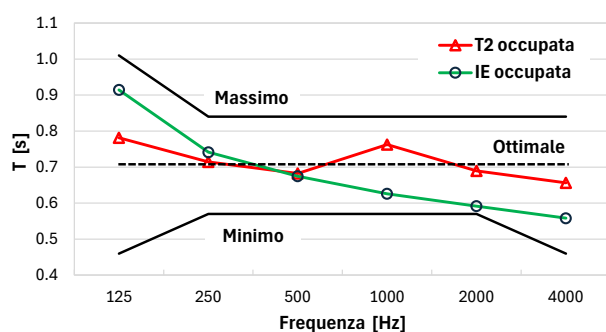


Fig. 7 – Confronto tra valori reali ed ottimali del tempo di riverberazione a sala occupata
Comparison between real and optimum reverberation time

3.2 | Chiarezza del parlato (C_{50})

Per l'aula T2, i risultati di Tabella 2 mostrano una condizione complessivamente migliore rispetto all'aula IE (Tabella 3), ma comunque non ottimale. In prossimità della sorgente (postazione P1) si registrano nell'aula T2 valori elevati, anche superiori a 2 dB, indicativi di una buona chiarezza del parlato. Tuttavia, all'aumentare della distanza dalla cattedra il parametro decresce sensibilmente, assumendo valori prossimi allo zero

o addirittura negativi nelle postazioni più distanti (P3, P4). Tale andamento evidenzia una marcata disomogeneità spaziale della chiarezza, con differenze tra le postazioni superiori al valore di *Just Noticeable Difference* definito dalla UNI EN ISO 3382-1:2009 per il C_{50} ($JND = 1$ dB). Il valore medio globale di C_{50} risulta pari a 0.7 dB, a cui bisogna sottrarre l'incertezza di misura ($U = 1$ dB): esso è dunque sensibilmente inferiore ai valori ritenuti adeguati (almeno 1.5 dB, secondo i riferimenti già commentati al paragrafo 2.3.2).

L'analisi dell'aula IE mette in evidenza una situazione ancora più critica (Tabella 3). In questo ambiente i valori di C_{50} ad aula vuota risultano insoddisfacenti in tutte le postazioni considerate, con una media globale pari a -1.1 dB (ovvero -2.1 dB considerando l'incertezza estesa di misura). Solo la postazione più vicina alla sorgente presenta un valore positivo (0.7 dB), comunque insufficiente, mentre le postazioni centrali e distanti evidenziano valori negativi. Rispetto all'aula T2, l'aula IE mostra quindi una perdita più marcata nella chiarezza del parlato e una maggiore penalizzazione delle postazioni lontane dalla sorgente, indicando condizioni di ascolto complessivamente meno favorevoli. Nel complesso, si evidenzia come, pur in presenza di tempi di riverberazione prossimi ai valori ottimali, la chiarezza del parlato non risulti garantita in modo uniforme sull'intera area occupata.

Infine, è interessante sottolineare come i valori di C_{50} possano essere profondamente diversi in caso di aula occupata. Utilizzando le note relazioni introdotte da Barron e Lee [21] e riportate nella UNI 11532-1:2018 [22], ed applicandole alle condizioni medie riscontrate ad aula occupata ($T = 0.7$ s per l'aula T2 e $T = 0.65$ s per l'aula IE), si ottengono valori di C_{50} prossimi rispettivamente a 2.2 dB (aula T2) e 2.7 dB (aula IE). Pur con le dovute cautele, legate al fatto che le relazioni utilizzate ipotizzano un decadimento perfettamente esponenziale, è dunque possibile affermare che nelle normali condizioni di fruizione la chiarezza del parlato possa essere ritenuta sufficiente, seppur non eccellente.

Tab. 2 – Valori medi del C_{50} rilevati nell'aula T2 (sala vuota)
Average C_{50} values measured in room T2 (unoccupied conditions)

Aula T2	500 Hz (dB)	1000 Hz (dB)	2000 Hz (dB)	Media (dB)
P1	4.7	2.1	2.6	3.1
P2	2.7	-0.4	1.7	1.3
P3	0.5	-0.9	-1.7	-0.7
P4	-0.4	-0.8	-1.5	-0.9
Media	1.9	0	0.3	0.7

Tab. 3 – Valori medi del C_{50} rilevati nell'aula IE (sala vuota)
Average C_{50} values measured in room IE (unoccupied conditions)

Aula IE	500 Hz (dB)	1000 Hz (dB)	2000 Hz (dB)	Media (dB)
P1	-0.5	1.2	1.5	0.7
P2	-1.7	-1.5	-1.8	-1.6
P3	-0.9	-1.8	-1.4	-1.4
P4	-3.4	-2.3	-0.2	-1.9
Media	-1.6	-1.1	-0.5	-1.1

3.3 | Rumore impiantistico

Per quanto riguarda il rumore degli impianti a funzionamento continuo, in Figura 8 si riportano gli spettri medi del livello di pressione sonora misurato nelle due aule, oltre al range di variazione spaziale per ogni banda in terzi di ottava.

Nell'aula T2 lo spettro medio per il sistema di distribuzione dell'aria presenta un maggiore contenuto energetico alle basse frequenze, con una componente tonale nella banda dei 200 Hz. La distribuzione spaziale dei livelli sonori è omogenea, con variazioni trascurabili tra le quattro postazioni di misura al di sopra dei 200 Hz: ciò è legato alla presenza di dodici sorgenti sonore (i diffusori dell'impianto HVAC) distribuite in modo abbastanza uniforme (Figura 4).

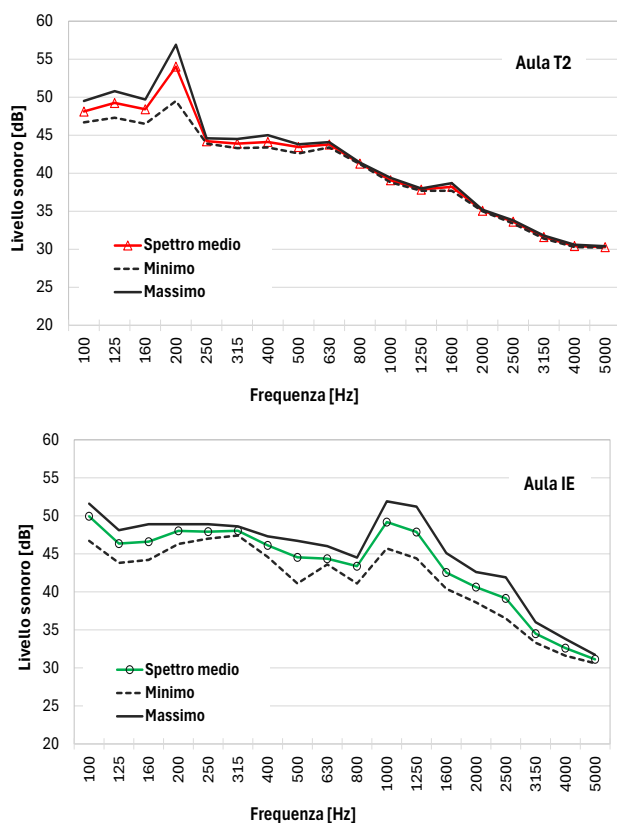


Fig. 8 – Spettri del rumore impiantistico in terzi di ottava
Spectra of noise from thermal systems in 1/3-octave bands

Nell'aula IE, invece, lo spettro medio del livello di pressione sonora indotto dalle due unità interne di tipo VRF presenta un picco tra i 1000 Hz e i 1250 Hz, e la variazione spaziale osservata nelle quattro posizioni di misura è significativa in quasi tutte le bande. In quest'aula, infatti, le due sorgenti si trovano in posizione ravvicinata sullo stesso lato del locale, generando una sensibile disuniformità e un maggiore disturbo nella postazione P4 (Figura 4).

Le elaborazioni condotte dimostrano che il rumore impiantistico sovrasta nettamente il rumore di fondo, essendo quest'ultimo compreso tra i 36 e i 39 dB(A): non è quindi necessario applicare la correzione K1 nell'equazione (4).

I livelli di pressione sonora ponderati, normalizzati e corretti per l'aula T2 (Tabella 4) sono compresi tra 51.9 dB(A) e

53.0 dB(A), mentre nell'aula IE (Tabella 5) i valori si attestano in un range compreso tra 52.6 dB(A) e 57.3 dB(A), quest'ultimo valore essendo riferito alla postazione P4. Le medie energetiche valgono rispettivamente $L_{ic,int} = 52.3$ dB(A) nell'aula T2 e $L_{ic,int} = 54.9$ dB(A) nell'aula IE. In tal senso, la UNI 11532-2:2020 raccomanda, per aule e biblioteche di volume non inferiore a 250 m³ e con riferimento al rumore prodotto dagli impianti a funzionamento continuo presenti nel medesimo ambiente, che l'indicatore $L_{ic,int}$ maggiorato per tenere conto dell'incertezza estesa di misura $U = 1.1$ dB(A), non superi il valore limite di 38 dB(A). I valori riscontrati sono notevolmente superiori, dimostrando che gli impianti termici a servizio di queste aule sono oltremodo rumorosi. Tale conclusione è supportata dalla determinazione del criterio NC (Figura 9): i valori ottenuti (NC = 50 per l'aula IE e NC = 45 per l'aula T2), sono ben lontani dal limite fissato dalla UNI 11532-2:2020 (NC ≤ 30).

Tab. 4 – Elaborazioni per il rumore impiantistico in aula T2
Calculations regarding noise from thermal systems in room T2

	P1	P2	P3	P4
L_{Aeq} (dBA)	50.7	50.3	51.4	50.2
L_f (dBA)	36.1	37.0	37.8	39.8
ΔL (dBA)	14.6	13.3	13.6	10.4
K1 (dBA)	0	0	0	0
T (s)	0.83	0.83	0.83	0.83
K2 (dBA)	1.6	1.6	1.6	1.6
$L_{pu,c}$ (dBA)	52.3	51.9	53.0	51.8
$L_{ic,int}$ (dBA)	52.3			

Tab. 5 – Elaborazioni per il rumore impiantistico in aula IE
Calculations regarding noise from thermal systems in room IE

	P1	P2	P3	P4
L_{Aeq} (dBA)	52.5	53.8	54.3	57.2
L_f (dBA)	36.4	36.8	37.2	39.0
ΔL (dBA)	16.1	17.0	17.0	18.2
K1 (dBA)	0	0	0	0
T (s)	1.12	1.12	1.12	1.12
K2 (dBA)	0.1	0.1	0.1	0.1
$L_{pu,c}$ (dBA)	52.6	53.9	54.4	57.3
$L_{ic,int}$ (dBA)	54.9			

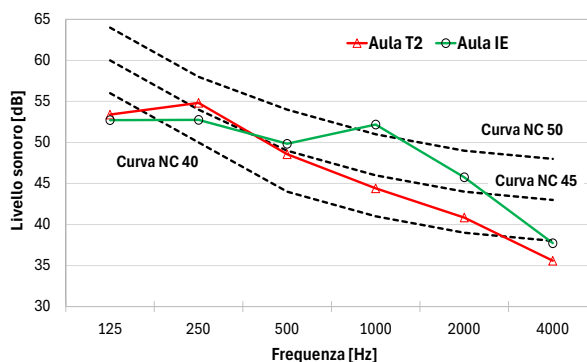


Fig. 9 – Livello di pressione sonora del rumore impiantistico: spettri in terzi di ottava e confronto con le curve NC [7]
Sound pressure level generated by thermal systems: spectra in 1/3-octave bands and comparison with NC curves

3.4 | Limitazioni dello studio

Bisogna innanzitutto osservare che, seppur non espressamente richiesto dalla normativa tecnica [18, 22], nella misura dei parametri legati all'intelligibilità del parlato sarebbe opportuno utilizzare una sorgente che simuli la direttività della voce umana. In assenza di questo tipo di sorgente sonora, l'utilizzo di una comune sorgente impulsiva può comunque fornire una prima utile indicazione in merito alla chiarezza del parlato, come sottolineato da precedenti studi [8, 15]. Il clappatore, utilizzato in questo lavoro, consente di generare impulsi di livello sufficiente su tutte le bande rilevanti (dai 125 Hz agli 8 KHz), in locali di volume fino a 2000 m³ e con ridotto rumore residuo [23, 24], condizioni che si possono ritenere soddisfatte in questo studio. Inoltre, l'uso del clappatore garantisce un'elevata ripetibilità del segnale generato ed una curva di decadimento caratterizzata da elevata correlazione, anche alle basse frequenze [25].

Un'altra limitazione del presente studio è rappresentata dall'uso del C_{50} in ambienti che presentano volume maggiore di 250 m³, caso per il quale la norma UNI 11532-2:2020 raccomanda la verifica dello *Speech Transmission Index* (STI). Secondo la letteratura, comunque, può essere accettabile usare il C_{50} al posto dello STI alla luce della marcata correlazione lineare tra i due parametri: in particolare, Bradley e Bistafa hanno svolto numerosi studi in merito [2, 26-27], derivando espressioni analitiche per esprimere lo STI in funzione di C_{50} , e viceversa. Le loro correlazioni sono state successivamente supportate e integrate da ulteriori e più recenti studi sperimentali [16, 28]. Adottando tali correlazioni, è possibile stimare per le due aule in media uno STI compreso tra 0.5 e 0.53 ad aula vuota, e STI = 0.6 ad aula occupata per l'80%.

4 | Conclusioni

L'analisi condotta in questo articolo evidenzia come la qualità acustica di un'aula didattica dipenda dal complesso equilibrio tra propagazione del segnale vocale e rumore di fondo. Anche in ambienti che presentano valori conformi del tempo di riverberazione, infatti, la comprensione del messaggio verbale può risultare compromessa, soprattutto nelle postazioni più distanti dall'oratore.

In tal senso, il parametro C_{50} restituisce una misura diretta dell'energia sonora che giunge all'uditore entro un tempo limitato dall'emissione del segnale, contribuendo positivamente alla comprensione del parlato. Le variazioni spaziali osservate ad aula vuota evidenziano come le condizioni di ascolto non siano uniformi e come la qualità dell'esperienza didattica possa variare sensibilmente in funzione della posizione occupata, con ricadute sulla concentrazione e sull'efficacia dell'apprendimento. In questo caso, al fine di rafforzare il segnale sonoro e migliorare la chiarezza nelle file più lontane dalla cattedra potrebbe essere utile inserire, in posizione idonea, elementi di diffusione sonora in grado di ridistribuire l'energia sonora in modo più uniforme [15, 29]. Il fatto che nell'aula T2 – in cui

sono presenti a soffitto elementi in grado di svolgere questo ruolo (canali di distribuzione, travi in acciaio) – si rilevi una migliore chiarezza del parlato e una minore deviazione standard nella misura del tempo di riverberazione alle medio-alte frequenze, dimostra concretamente la validità di questa asserzione. È opportuno però osservare che le condizioni di occupazione delle aule influiscono in modo determinante, e dinamico, sulla chiarezza del parlato: ipotizzando che le due aule siano occupate all'80%, l'utilizzo di formule previsionali ha permesso di stimare valori medi spaziali del C_{50} di circa 2.5 dB, che possono essere ritenuti sufficienti seppur non eccellenti.

Un ulteriore aspetto di rilievo riguarda il rumore impiantistico. I risultati mostrano che i limiti normativi sono ampiamente superati in entrambe le aule, sia in termini di livello globale ponderato, sia guardando al criterio NC. Ciò sottolinea l'importanza di una progettazione accurata degli impianti, mirata alla corretta distribuzione delle sorgenti sonore ed al contenimento delle emissioni acustiche, al fine di evitare interferenze con il segnale vocale. Il livello sonoro generato dagli impianti supera ampiamente il rumore di fondo, che si attesta su livelli medi compresi tra 37 e 38 dB(A) in entrambe le aule in esame. Al fine di evitare il superamento dei limiti, sarebbe quindi necessario avere impianti di climatizzazione estremamente silenziosi. Nel confronto tra le due aule analizzate emergono differenze nelle prestazioni acustiche, ma entrambe evidenziano come un buon tempo di riverberazione non garantisce automaticamente condizioni ottimali di ascolto. La qualità acustica dell'ambiente didattico richiede un approccio progettuale integrato, capace di considerare congiuntamente architettura, acustica e impiantistica, con l'obiettivo di assicurare comfort, intelligibilità e pari condizioni di ascolto per tutti gli utenti.

Conclusions

The analysis conducted in this paper shows that the acoustic quality of a classroom depends on the complex balance between propagation of the voice signal and background noise. Indeed, even in environments that have good reverberation time, the comprehension of the verbal message can be strongly compromised, especially in those positions that are furthest from the speaker.

In this direction, the C_{50} parameter provides a direct measure of the sound energy reaching the listener within a short time after the signal is emitted, positively contributing to the speech intelligibility. The spatial variations observed in the empty classrooms highlight how listening conditions are not uniform, and that the quality of the teaching experience can vary significantly depending on the position occupied, with repercussions on concentration and effectiveness of learning. In this case, to strengthen the signal perceived and improve speech clarity in the rows furthest from the desk, it could be useful to introduce, in a suitable position, sound diffusion elements capable of redistributing the sound energy in a more uniform way [15, 29]. The fact that in classroom T2 – where there are ceiling elements that can play this role (distribution channels, steel beams) – better speech clarity is observed as well as lower standard deviation in the reverberation time at medium-high frequencies, concretely demonstrates the validity of this assertion.

It should be noted, however, that the occupancy conditions have a decisive and dynamic influence on speech clarity in a classroom: assuming that the two classrooms are 80% occupied, the use of forecast formulas has made it possible to estimate average spatial values of C_{50} around 2.5 dB, which can be considered sufficient although not excellent.

A further important aspect concerns the noise of the thermal systems. The results show that the regulatory limits are largely exceeded in both classrooms, both in terms of the weighted global pressure level and by looking at the NC criterion. This underlines the importance of accurate system design, aiming at both the correct distribution of sound sources and the containment of noise emission, to avoid interference with the voice signal. The noise of thermal systems largely exceeds the background noise, whose average global sound pressure level ranges between 37 and 38 dB(A) in both classrooms: to comply with the regulatory limits, it would therefore be necessary to use extremely quiet thermal systems. In the comparison between the two classrooms, differences in acoustic performance emerge, but both highlight how a good reverberation time does not automatically ensure optimal listening conditions. The acoustic quality of the teaching environment requires an integrated design approach, capable of considering architecture, acoustics and plant engineering together, with the aim of ensuring comfort, intelligibility and equal listening conditions for all users.

Bibliografia

- [1] M. Hodgson, Experimental investigation of the acoustical characteristics of university classrooms, *J. Acoust. Soc. Am.* 106(4) (1999) 1810-1819. <https://doi.org/10.1121/1.427931>.
- [2] S.R. Bistafa, J.S. Bradley, Reverberation time and maximum background-noise level for classrooms from a comparative study of speech intelligibility metrics, *J. Acoust. Soc. Am.* 107(2) (2000) 861-875. <https://doi.org/10.1121/1.428268>.
- [3] D. De Salvio, D. D'Orazio, Effectiveness of acoustic treatments and PA redesign by means of student activity and speech levels, *Appl. Acoust.* 194 (2022) 108783. <https://doi.org/10.1016/j.apacoust.2022.108783>.
- [4] M. Spinelli, L. Barbaresi, A. Nora, V. Tardini, Protocollo sperimentale per la valutazione dell'intelligibilità del parlato nelle aule, dotate di impianto elettroacustico, del patrimonio edilizio dell'Università di Bologna, *RIA* 49(2) (2025) 45-54. <https://doi.org/10.3280/riaof-2025oa19516>.
- [5] D. Pelegrin-García, B. Rasmussen, J. Brunskog, Classroom acoustics design for speakers' comfort and speech intelligibility: a European perspective. In: *Proceedings of Forum Acusticum*, 2014.
- [6] D. Pelegrin-García, J. Brunskog, V. Lyberg-Åhlander, A. Löfqvist, Measurement and prediction of voice support and room gain in school classrooms. *J. Acoust. Soc. Am.* 131(1) (2012) 194-204. <https://doi.org/10.1121/1.3665987>.
- [7] Ente Italiano di Normazione, UNI 11532-2:2020, Caratteristiche acustiche interne di ambienti confinati – Metodi di progettazione e tecniche di valutazione – Parte 2: Settore scolastico. 2020.
- [8] F. Asdrubali, L. Busa, C. Carrus, S. Luzzi, P. Pulella, Un'applicazione di design acustico all'interno di ambienti scolastici, *RIA* 49(2) (2025) 55-59. <https://doi.org/10.3280/ria2-2025oa18517>.
- [9] F. Cotana, F. Asdrubali, G. Arcangeli, S. Luzzi, G. Ricci, L. Busa, M. Goretti, A.A.V. Tortorella, P. Pulella, P. Domenighini, V. Gambacorta, C. Guattari, F. Cirimbilli, A. Nicolini, P. Nataletti, D. Annesi, F. Sanjust, L. Cerini, Extra-Auditory Effects from Noise Exposure in Schools: Results of Nine Italian Case Studies, *Acoustics* 5 (2023) 216-241. <https://doi.org/10.3390/acoustics5010013>.
- [10] D. D'Orazio, G. Fratoni, L. Barbaresi, M. Garai, L. Cappellini, L'importanza dei 250 Hz. strategie per la progettazione acustica degli ambienti scolastici secondo UNI 11532-2:2020, *Atti del 48° Convegno Nazionale AIA*, Matera, 25-27 maggio 2022.
- [11] D. D'Orazio, G. Fratoni, V. Tardini, The Italian standard on classroom acoustics UNI 11532-2:2020 explained through case studies, *Appl. Acoust.* 231 (2025) 110498. <https://doi.org/10.1016/j.apacoust.2024.110498>.
- [12] Ente Italiano di Normazione, UNI EN ISO 3745:2017, Acustica – Determinazione dei livelli di potenza sonora e dei livelli di energia sonora delle sorgenti di rumore mediante misurazione della pressione sonora – Metodi di laboratorio in camere anecoica e semi-anecoica. 2017.
- [13] Ente Italiano di Normazione, UNI EN ISO 3382-2:2008, Acustica – Misurazione dei parametri acustici degli ambienti – Parte 2: Tempo di riverberazione negli ambienti ordinari. 2008.
- [14] Ente Italiano di Normazione, UNI EN ISO 11367:2023, Acustica in edilizia – Classificazione acustica delle unità immobiliari – Procedura di valutazione e verifica in opera. 2023.
- [15] E. Arvidsson, E. Nilsson, D.B. Hagberg, O.J.I. Karlsson, The effect on room acoustical parameters using a combination of absorbers and diffusers – an experimental study in a classroom, *Acoustics* 2 (2020) 502-523. <https://doi.org/10.3390/acoustics2030027>.
- [16] L. Nijs, M. Rychtáriková, Calculating the optimum reverberation time and absorption coefficient for good speech intelligibility in classroom design using U50, *Acta Acustica*, 97(1) (2011) 93-102. <https://doi.org/10.3813/AAA.918390>.
- [17] Ente Italiano di Normazione, UNI EN ISO 12999-1:2021, Acustica – Determinazione e applicazione dell'incertezza di misurazione nell'acustica in edilizia – Parte 1: Isolamento. 2021.
- [18] Ente Italiano di Normazione, UNI EN ISO 3382-1:2009, Acustica – Misurazione dei parametri acustici degli ambienti – Parte 1: Sale da spettacolo. 2009.
- [19] F. Martellotta, The just noticeable difference of center time and clarity index in large reverberant spaces, *J. Acoust. Soc. Am.* 128(2) (2010) 654-663. <https://doi.org/10.1121/1.3455837>.
- [20] L. Cremer, H.A. Muller, *Principles and Applications of Room Acoustics*, Applied Science, London, 1982, Vol. 1, pp. 503-509.
- [21] M. Barron, L.J. Lee, Energy relations in concert auditoriums. *J. Acoust. Soc. Am.* 84(2) (1988) 618-628.
- [22] Ente Italiano di Normazione, UNI 11532-1:2018, Caratteristiche acustiche interne di ambienti confinati – Metodi di progettazione e tecniche di valutazione – Parte 1: Requisiti generali. 2018.
- [23] D. Sumarac-Pavlovic, M. Mijic, H. Kurtovic, A simple impulse sound source for measurements in room acoustics, *Appl. Acoust.* 69 (2008) 378-383. <https://doi.org/10.1016/j.apacoust.2006.11.003>.
- [24] G. Cervantes-Madrid, R. Peral-Orts, N. Campillo-Davó, H. Campello-Vicente, Clapper as a simple impulse sound source for acoustics assessments in enclosed spaces, *Acoust. Pract.*, AIP-2020-01, 2020.
- [25] M.F. Infantone, G. Evola, A. Gagliano, Utilizzo del clappatore come sorgente sonora impulsiva per la misura del tempo di riverberazione negli ambienti confinati. In: *Proceedings del*

50° Convegno Nazionale dell'Associazione Italiana di Acustica. 2024.

- [26] J. S. Bradley, Speech-intelligibility studies in classrooms, *J. Acoust. Soc. Am.* 80 (1986) 846–854. <https://doi.org/10.1121/1.393908>.
- [27] J.S. Bradley, S.R. Bistafa, Relating speech intelligibility to useful-to-detrimental sound ratios. *J. Acoust. Soc. Am.* 112 (2002) 27–29. <https://doi.org/10.1121/1.1481508>.

- [28] Y.-J. Choi, Comparison of two types of combined measures, STI and U50, for predicting speech intelligibility in classrooms, *Arch. Acoust.* 42(3) (2017) 527–532. <https://doi.org/10.1515/aoa-2017-0056>.
- [29] J. Cucharero, T. Hänninen, T. Lokki, Influence of Sound-Absorbing Material Placement on Room Acoustical Parameters, *Acoustics* 1(3) (2019) 644–660. <https://doi.org/10.3390/acoustics1030038>.