Progettazione integrata con cambio di destinazione d'uso di un'aula universitaria per l'ottimizzazione del comfort acustico secondo i CAM

Alessia Nora[1 a*] | Luca Barbaresi[a] | Dario D'Orazio[a] | Giulia Fratoni[a]

[a] Dipartimento di Ingegneria Industriale, Università di Bologna, Viale del Risorgimento, 2, 40136 Bologna
* Autore di riferimento: alessia.nora3@unibo.it

Ricevuto: 27/2/2024
Accettato: 25/5/2024

DOI: 10.3280/ria1-2024oa17365
ISSNe: 2385-2615

Il presente lavoro riguarda la progettazione integrata acustica ed illuminotecnica di una sala universitaria, con la destinazione d'uso precedente di palestra, che a seguito di tale progetto verrà adibita ad aula magna del Campus universitario di Forlì. Il processo progettuale prevede l'utilizzo di formule analitiche previsionali e di simulazioni numeriche, focalizzandosi sui parametri acustici Tempo di riverberazione T_{20}, Indice di Chiarezza C_{50} and Speech Transmission Index STI. La geometria dell'ambiente e i vincoli progettuali non hanno permesso il raggiungimento dei requisiti di qualità acustica con soli trattamenti di acustica passiva. Nella sala è stata valutata necessaria l'introduzione di un sistema di amplificazione per soddisfare i requisiti della UNI 11532-2:2020, resa cogente dai CAM (Criteri Ambientali Minimi).
Parole chiave: sistema di amplificazione, progettazione integrata, acustica delle aule, CAM

Integrated design with change of use of a university lecture hall for optimization of acoustic comfort according to CAM
The present work concerns the integrated acoustic and lighting design of a university hall, previously used as a gymnasium, which will be used as a lecture hall on the Forlì University Campus. The design process involves using predictive analytical formulas and numerical simulations, focusing on the acoustic parameters Reverberation Time T_{20}, Clarity Index C_{50} and Speech Transmission Index STI. The room geometry and design constraints did not allow the acoustic quality requirements to be achieved with only passive acoustic treatments. In the room, an amplification system was necessary to meet the requirements of UNI 11532-2:2020, made mandatory by CAM.
Keywords: public address, integrated design, classroom acoustic, CAM

1 | Introduzione

L'entrata in vigore nel 2017 dei Criteri Ambienti Minimi (CAM) [1] per l'edilizia ha dato un forte impulso per la progettazione acustica degli ambienti pubblici e in particolare per gli edifici scolastici. Le scuole infatti devono soddisfare almeno i valori di riferimento di requisiti acustici passivi e comfort acustico interno indicati nella UNI 11532-2 [2].

Nelle aule a scopo didattico aspetto di fondamentale rilevanza è l'intelligibilità del parlato, ovvero la comprensibilità di un suono da parte di un ascoltatore in modo da incrementare la comunicazione di informazioni tra docenti e studenti. Diversi studi indicano che una buona comprensione migliora la capacità di concentrazione degli studenti e riduce i rischi per la salute degli insegnanti derivanti da un uso eccessivo della voce nel tempo [3,4]. Infatti, aumentando il rumore di fondo nell'aula, il docente tende inconsciamente ad alzare il tono della voce (effetto *Lombard*), aumentando così lo sforzo vocale. Inoltre, l'intelligibilità dipende dal rapporto segnale-rumore (SNR), ovvero la differenza tra il livello sonoro utile (la voce del docente) e il livello sonoro del rumore di fondo (rumore degli impianti, dalle infrastrutture adiacenti e brusio degli studenti). Una bassa intelligibilità comporta una scarsa comprensione delle informazioni da parte degli studenti, riducendo la loro concentrazione e aumentando la probabilità di interazioni fra studenti, aumentando così il rumore di fondo. Un adeguato comfort acustico è necessario per ridurre al minimo lo sforzo vocale dell'oratore e facilitare la comprensione del parlato per gli ascoltatori. In questo contesto, un sistema di diffusione sonora (*Public Address* PA) ben progettato permette di raggiungere un livello di pressione sonora adeguato su un'ampia porzione di pubblico, come richiesto da sale conferenze di grandi dimensioni. Nel caso della ristrutturazione di un'aula, la valutazione della qualità acustica si basa solitamente solo su criteri relativi all'ambiente, mentre la valutazione dovrebbe includere parametri dinamici oggettivi provenienti da coloro che vivono questi spazi: studenti e insegnanti. Infatti, è noto da letteratura [5] come parametri quali il rumore di fondo, il brusio degli studenti (*Student Acticity*) e il rapporto segnale-rumore varino a seguito di un trattamento acustico nelle aule.

Nella progettazione della sala si è inoltre tenuto conto di quanto emerso da diversi studi, secondo cui anche le informazioni visive contribuiscano alla comprensione del parlato [6,7].

[1] Vincitrice del premio "Amedeo Giacomini" edizione 2024.

Copyright © FrancoAngeli This work is released under Creative Commons Attribution - Non-Commercial - NoDerivatives License. For terms and conditions of usage please see: http://creativecommons.org

Di conseguenza, in contesti educativi, la visibilità dell'oratore è un elemento cruciale per creare un ambiente confortevole per gli studenti o per migliorare l'ascolto in ambienti rumorosi [8,9].

Basandosi su una progettazione integrata, i lavori di miglioramento dell'acustica interna della sala hanno riguardato il trattamento acustico passivo, con l'introduzione di materiali nella sala e attivo, con la progettazione dell'impianto di amplificazione (PA).

1.1 | Descrittori T, C_{50} e STI

I criteri oggettivi e misurabili considerati secondo normativa UNI 11532-2 [2], resa cogente dai CAM [1], come descrittori della qualità della comunicazione verbale all'interno delle aule scolastiche sono il Tempo di riverberazione T, l'indice di Chiarezza C_{50} e *Speech Transmission Index* STI. I metodi di previsione per i descrittori sono indicati nella UNI 11532-1 [10]. Il tempo di riverberazione rappresenta il tempo necessario affinché il livello di pressione sonora in un punto diminuisca di 60 dB dopo lo spegnimento di una sorgente sonora in regime stazionario. Data la difficoltà tecnica nel registrare un decadimento completo di 60 dB, comunemente si valuta il tempo di riverberazione estrapolando il decadimento da −5 a −25 dB, (indicato con T_{20}). Secondo la norma UNI 11532-2 [2], i valori di Tempo di riverberazione considerano sempre lo stato arredato e occupato degli ambienti. Tuttavia, le misure sono effettuate nello stato arredato e non occupato dell'ambiente (T_{inocc}), quindi è necessario aggiungere l'assorbimento acustico delle persone (all'80% dell'occupazione totale) per ogni banda di ottava compresa tra 125 Hz e 4.000 Hz.

$$\mathrm{T\ occ} = \frac{Tinocc}{1+\frac{Tinocc \cdot \Delta Apersone}{0{,}16\,V}}\ (\boldsymbol{s}) \qquad (1)$$

Dove:

- T_{occ} è il tempo di riverberazione allo stato occupato della sala, in *s*;
- T_{inocc} è il tempo di riverberazione allo stato non occupato della sala, in *s*;
- V è il volume della sala, in m^3;
- $\Delta A_{persone}$ è la superficie fonoassorbente equivalente aggiuntiva per ogni persona, secondo l'appendice C della norma UN11532-2, in m^2 Sabine.

La sala oggetto di studio risulta appartenente alla categoria A2 di aule magne, secondo normativa UNI 11532-2 [2], e il tempo di riverberazione ottimale è espresso dalla formula seguente:

$$T_{ott} = 0.37 \log V - 0.14\ (s) \qquad (2)$$

Dove V è il volume della sala, in m^3.

Mentre il tempo di riverberazione è una proprietà della sala, la chiarezza del suono dipende dalla posizione delle sorgenti sonore e dei ricevitori, quindi deve essere considerata una proprietà del punto di ascolto. Le direttive della UNI 11532-2 definiscono, infatti, delle posizioni obbligatorie distribuite spazialmente nell'aula di sorgenti sonore e ricevitori durante le misurazioni *ante operam* e *post operam*. L'indice di Chiarezza C_{50} è definito come segue:

$$C50 = \frac{\int_0^{50} \mathrm{p(t)^2 dt}}{\int_{50}^{\infty} \mathrm{p(t)^2 dt}}\ \mathrm{(dB)} \qquad (3)$$

Dove 50 ms è il riferimento temporale che divide il suono diretto e prime riflessioni (utili per il parlato), dalle successive riflessioni (dannose per il parlato). Mentre si indica come $p(t)$ la pressione sonora istantanea della risposta all'impulso. Lo *Speech Transmission Index* STI, definito nella norma IEC 60268-16 [11], quantifica l'effetto combinato dell'interferenza del rumore di fondo e della riverberazione sulla riduzione di intelligibilità del parlato. I valori di STI variano da 0 a 1, dove il valore 0 indica nessuna intelligibilità ed il valore 1 un'intelligibilità ideale. La norma IEC 60268-16 [11] e la normativa nazionale UNI 11532-1 [10] identificano come "buono" un valore di STI compreso tra 0.6 e 0.75, "eccellente" un valore maggiore di 0.75.

2 | Metodo

2.1 | Caso studio

Il caso studio è la Palestra Campostrino, immobile di interesse storico-artistico del Campus Universitario di Forlì, che al termine dell'intervento di riqualificazione verrà adibito ad aula Magna. L'edificio è situato nel centro storico di Forlì e ha un importante excursus storico in quanto la prima palestra fu realizzata nel 1888. Recenti ricerche archivistiche attribuiscono il progetto dell'elegante prospetto al grande architetto della Forlì del Duce Enrico Del Debbio. La sala (vedi Fig. 1) ha una pianta regolare (20 m × 11,5 m) e un volume di 1850 m^3 ed è caratterizzata da una copertura a falde. Le 3 pareti laterali sono in cartongesso, mentre quella di fondo è una parete rigida intonacata. La presenza di questi materiali di rivestimento nella sala è dovuta al fatto che l'edificio, prima di essere ceduto dal Comune di Forlì all'Università, è stato oggetto di un intervento di ristrutturazione volto al ripristino degli ambienti, all'adeguamento impiantistico e al miglioramento delle prestazioni energetiche dell'involucro. Tuttavia, le opere realizzate non erano state pensate per una destinazione d'uso prettamente didattica della sala. Nella progettazione, inoltre si è dovuto tener conto di alcuni vincoli dati dallo stato di fatto e in particolare imposti dalla Soprintendenza per il valore storico-artistico dell'edificio e dai vigili del fuoco per assicurare le vie di fuga interne all'aula.

2.2 | Misure ante operam

La campagna di misura, in linea con le normative vigenti, ha permesso di acquisire i parametri per la corretta caratterizzazione dell'aula. Il 13 ottobre 2022 è stata eseguita

Copyright © FrancoAngeli This work is released under Creative Commons Attribution - Non-Commercial - NoDerivatives License. For terms and conditions of usage please see: http://creativecommons.org

una campagna di misure acustiche a sala priva di arredamento – come si trovava allo stato di fatto – e in stato di non occupazione secondo la norma ISO 3382 [12,13]. Un dodecaedro omnidirezionale è stato utilizzato come sorgente sonora e un microfono monoaurale come ricevitore. Le risposte all'impulso sono state acquisite lanciando un segnale *Exponential Sine Sweep* di 512 K e campionato a 48 kHz. Secondo la norma ISO 3382-2 [13], sono state scelte due posizioni di sorgente sonora: una nella possibile posizione dell'oratore, l'altra decentrata e più vicina agli ascoltatori e 14 ricevitori (vedi Fig. 1). Un'analisi accurata è stata effettuata sui parametri T_{20}, C_{50} (nell'intervallo 125 Hz-4000 Hz) e STI. Con un tempo di riverberazione T_{20} di 1.94 s e un valore di C_{50} di –0.6 dB, i risultati delle misure dimostrano l'inadeguatezza delle condizioni acustiche della sala rispetto ai requisiti minimi dei criteri di intelligibilità (UNI 11532-2). Il livello di rumore di fondo L_{eq} è stato misurato all'interno dell'ambiente utilizzando un fonometro di classe 1 ed effettuando, dato il carattere fortemente stazionario del rumore, un'acquisizione di 30 secondi per ogni misura. Durante le misure, il sistema HVAC è rimasto in funzione e non è stato rilevato un significativo rumore da traffico durante la campagna di misure. Il livello di rumore di fondo è un parametro che definisce il comfort interno degli ambienti ed è stato anche necessario per definire il parametro STI nella successiva progettazione tramite simulazione numerica e metodo analitico previsionale.

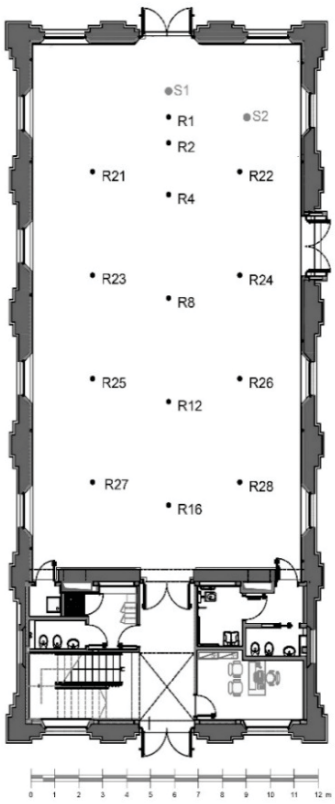

Fig. 1 – Planimetria della sala: posizioni delle sorgenti sonore (S1, S2) e dei ricevitori (14) durante le misurazioni
Plan of the hall: sound sources (S1, S2) and receivers positions (14) used in measurements campaign

2.3 | Il modello numerico e la sua calibrazione

A seguito delle misure, è stato creato anche un modello digitale per la simulazione degli interventi migliorativi da apportare alla sala. La calibrazione del modello digitale ha permesso di ottenere dal modello previsionale gli stessi risultati delle misure in situ. Il modello, oltre che essere uno strumento utile per svolgere ulteriori analisi sullo stato di fatto, è necessario per progettare interventi migliorativi. Il modello numerico è stato creato su SketchUp e poi con un plug in è stato importato su Odeon Room Acoustics, software di simulazione via *ray-tracing* (vedi Fig. 2). Il processo di modellazione è stato eseguito secondo le linee guida del manuale di Odeon [14] e secondo lo stato dell'arte della letteratura scientifica [16]. Nel modello si sono collocati sorgenti, ricevitori e sono stati attribuiti i materiali alle superfici. Per simulare la condizione iniziale dell'aula sono stati utilizzati materiali con differenti proprietà acustiche: superfici riflettenti (pareti, soffitti, pavimenti, vetri) ed elementi più assorbenti (Topakustik), come riportati in Tab. 1. Per la calibrazione del modello sono stati presi in considerazione come descrittori fondamentali del comportamento acustico dell'aula il Tempo di Riverberazione T_{20}, la Chiarezza C_{50} e *Speech Transmission Index* STI. La calibrazione è stata una fase iterativa, considerata effettuata quando la differenza tra i valori misurati e quelli simulati era inferiore all'intervallo della *Just Noticeable Difference* (JND), secondo normativa ISO 3382-1 [12].

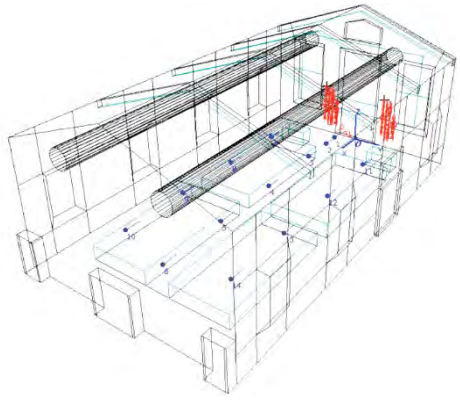

Fig. 2 – Modello numerico realizzato con il software Odeon [14]
Digital twin created with Odeon software [14]

2.4 | Simulazioni numeriche ed analitiche

La fase di simulazione numerica, combinata con i metodi previsionali analitici, ha permesso di effettuare una stima previsionale del comportamento dell'ambiente con l'introduzione di trattamenti acustici. Il modello numerico è stato simulato con il software Odeon [14]. La simulazione previsionale analitica si avvale, invece, della formula del tempo di riverberazione di Sabine (riportata nella formula 5) tenendo conto dell'area equivalente di persone che occupano l'80% dell'ambiente, come specificato dalla normativa UNI 11532-2 [2].

Copyright © FrancoAngeli This work is released under Creative Commons Attribution - Non-Commercial - NoDerivatives License. For terms and conditions of usage please see: http://creativecommons.org

$$Tocc = 0.16 \frac{V}{\sum \alpha jSj + Aobj + 0{,}8N\,\Delta Apersone} \ (s) \qquad (4)$$

Dove:

- V è il volume della sala, in m^3;
- α_j è il coefficiente di assorbimento acustico della superfice j-esima;
- S_j è la superfice j-esima delle superfici dell'involucro, in m^2;
- A_{obj} e la j-esima area di assorbimento equivalente degli elementi di arredo dell'ambiente, in m^2 Sabine;
- N è il numero di persone considerando l'80% dell'occupazione;
- $\Delta A_{persone}$ è la superficie fonoassorbente equivalente aggiuntiva per ogni persona, secondo l'appendice C della norma UN11532-2, in m^2 Sabine.

Nella corrispondenza tra formule previsionali [2, 21, 22], i risultati delle simulazioni numeriche mediante *ray-tracing* e misurazioni, bisogna tener conto di alcuni aspetti:

- le superfici equivalenti, o contigue, sono spesso trattate in modo omogeneo nella modellazione, a differenza di quanto accade nella realtà. Questo porta, in genere, a sottostimare l'assorbimento acustico di materiali ad alta frequenza;
- la diffusione del campo sonoro dovuta a superfici scatteranti o bordi di diffrazione.

L'introduzione di sedute nella sala, anche nell'ipotesi di assenza di assorbimento acustico delle superfici delle medesime, ha come conseguenza un decremento del tempo di riverberazione e l'aumento della diffusione del campo sonoro per effetti di diffrazione di bordo delle poltrone [15]. Simulazioni numeriche (e misure acustiche) mettono in evidenza questo decremento, che invece le formule previsionali [2, 21, 22], non riescono a considerare. Tale effetto in generale cresce con la frequenza. Le ragioni evidenziate giustificano la differenza tra le curve in nella Fig. 3 alle medio alte frequenze.

Tab. 1 – Coefficienti di scattering (s) e di assorbimento (α) utilizzati per le simulazioni numeriche ed analitiche

Scattering (s) and absorption (α) coefficients used for numerical and analytical simulations

	Ref.	s	α					
			125 Hz	250 Hz	500 Hz	1000 Hz	2000 Hz	4000 Hz
Topakustik	[17]	0.10	0.27	0.30	0.40	0.33	0.29	0.20
Pareti in cartongesso	[2]	0.05	0.15	0.19	0.07	0.07	0.06	0.05
Pareti in muratura	[16]	0.05	0.05	0.04	0.03	0.04	0.05	0.05
Finestre	[2]	0.05	0.18	0.06	0.04	0.03	0.02	0.02
Pavimento	[16]	0.05	0.01	0.02	0.02	0.02	0.02	0.02
Sedute	[18]	0.70	0.41	0.56	0.71	0.62	0.65	0.63

Nel presente lavoro i parametri di intelligibilità del parlato (C_{50} e STI) sono stati simulati avvalendosi del modello numerico comprensivo del rumore di fondo ed è stato considerato come parametro significativo per la caratterizzazione acustica dell'aula la Chiarezza C_{50}, sebbene non sia obbligatoria per aule di grandi dimensioni (V>250m^3) secondo normativa UNI11532-2 [2].

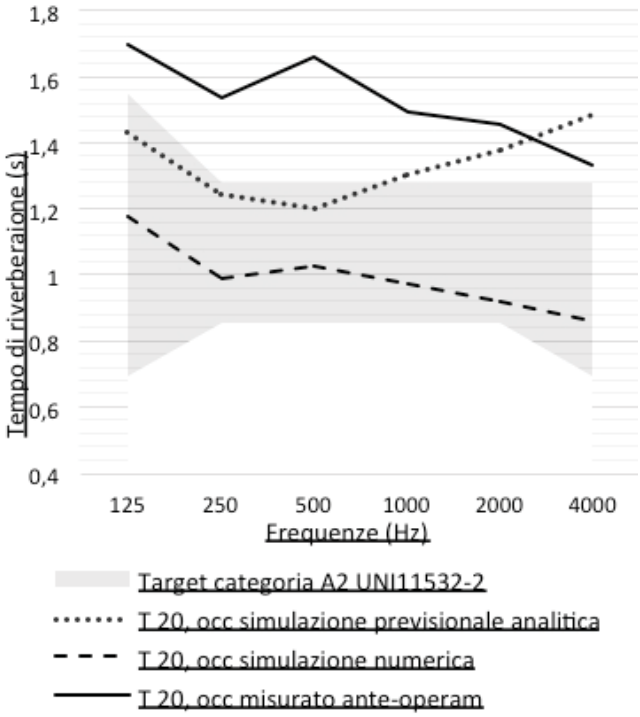

Fig. 3 – Tempo di riverberazione in funzione della banda di ottava della frequenza in condizioni occupate (all'80% come da normativa UNI11532-2) della sala in condizioni di stato di fatto ante operam, a confronto con le simulazioni analitiche e numeriche della sala con trattamenti acustici passivi

Reverberation time as a function of octave band of the frequency in occupied conditions (at 80% as per UNI11532-2) of the ante operam hall, compared with analytical and numerical simulations of the hall with passive acoustic treatments

3 | Design

La proposta progettuale di intervento acustico nella sala si compone di due tipologie di trattamento, in prima istanza si è considerato un trattamento di tipo passivo, con l'introduzione di sedute con proprietà acustiche assorbenti e in seconda istanza è risultata necessaria l'installazione di un sistema di amplificazione (PA). I risultati delle simulazioni, effettuate tendendo conto del rumore di fondo, dimostrano che i trattamenti acustici passivi non sono sufficienti a raggiungere il valore target di STI. La soluzione progettuale ottimale analizzata nelle simulazioni, poi successivamente confermata dalle misure *post operam*, è stata l'introduzione nella sala di un sistema di amplificazione.

Copyright © FrancoAngeli This work is released under Creative Commons Attribution - Non-Commercial - NoDerivatives License. For terms and conditions of usage please see: http://creativecommons.org

3.1 | Trattamenti acustici passivi

La sala, allo stato di fatto, presenta già un'implementazione acustica del soffitto, che è rivestito di Topakustik (vedi Tab. 1). Il materiale sfrutta le proprietà assorbenti dei risonatori di Helmholtz e delle membrane vibranti. Questo tipo di pannello ha un elevato potere assorbente alle medie e alte frequenze. Inoltre, il precedente progetto di recupero prevedeva anche l'installazione di diffusori acustici alle pareti negli spazi tra le finestre (mai realizzati) e l'isolamento termico interno con rivestimenti in cartongesso. Alla luce dei precedenti trattamenti acustici della sala, non era più possibile gestire altre applicazioni sulle superfici interne (pannelli fonoassorbenti e/o diffondenti), pertanto è stato necessario intervenire solo attraverso una idonea scelta di sedute in tessuto. Le simulazioni hanno preso in considerazione due scelte principali: sedute in stoffa o in pelle. Le prime hanno soddisfatto ampiamente lo standard richiesto grazie al loro elevato fonoassorbimento. Tuttavia, la scelta finale è ricaduta sulle sedute in pelle, che adempiono ai requisiti acustici ma al contempo garantiscono i requisiti igienici richiesti dal committente.

I trattamenti acustici passivi nell'aula sono volti a raggiungere i requisiti previsti dalla norma UNI 11532-2 e con evidenze dalla letteratura scientifica che descrivono come ottenere un buon posizionamento del materiale. Pertanto, il tempo di riverberazione in stato di occupazione T_{occ} è stato calcolato con la formula della UNI 11532-2, come si vede nel paragrafo 6.3 della normativa e riportato nella formula 1. Con la formula previsionale del tempo di riverberazione ottimale T_{ott}, è stato possibile verificare i target normativi dei valori del tempo di riverberazione in modo che rientrassero della finestra di valori richiesti dalla normativa (vedi Fig. 3). Questo ha permesso, insieme al confronto con le simulazioni numeriche, di avere una rapida valutazione della correttezza delle proposte progettuali. Per il rispetto degli standard normativi sono stati considerati i parametri acustici T_{20} e di intelligibilità del parlato, C_{50} e STI, riferimento fondamentale per valutare il comportamento complessivo del fenomeno sonoro nell'ambiente.

Fig. 4 – Foto della sala al termine del trattamento acustico passivo (sedute) ed attivo (impianto PA)

Photos of the hall at the end of passive (seating) and active (PA system) acoustic treatment

3.2 | Sistema line array

All'interno di grandi spazi universitari è buona norma progettare e installare dei sistemi audio con altoparlanti line array. Un sistema line array è un insieme di altoparlanti allineati in senso verticale in modo da costituire una fonte sonora cilindrica. Aumentando il numero di elementi, e quindi la lunghezza della sorgente, si ottiene un livello di pressione sonora più elevato e uniforme. La distanza tra gli altoparlanti adiacenti è calcolata in modo da creare interferenze costruttive, consentendo l'invio di onde sonore con un minor decadimento in funzione della distanza rispetto ai tradizionali sistemi di altoparlanti (schematizzabili come sorgenti puntiformi). Una "linea pulsante", quale è un line array, ha direttività Q>1 e un'attenuazione spaziale proporzionale alla distanza, con una perdita di 3 dB al raddoppio della distanza. Mentre una "sferetta pulsante", con direttività Q=1, ha un'attenuazione spaziale che aumenta con il quadrato della distanza, con una perdita di 6 dB al raddoppio della distanza. L'attenuazione di un line array di 3 dB è valida solo all'interno delle zone di Fresnel, che sono le regioni comprese tra il campo vicino effettivo (2-3 metri dalla sorgente) e le zone di Fraunhofer, o campo lontano. Le zone di Fresnel possono essere calcolate utilizzando l'equazione:

$$Zone\ di\ Frensel < \frac{2L^2}{\lambda}$$

Dove:

- L rappresenta la lunghezza del line array, in metri;
- λ indica la lunghezza d'onda del suono, in metri.

In un'aula magna la disposizione del sistema di diffusione sonora (PA) è un punto critico per l'intelligibilità del parlato: ha lo scopo di aumentare il valore di STI e di renderlo il più omogeneo in tutta la sala. Per ottenere un buon risultato è necessario un posizionamento accurato, perché una posizione errata del sistema PA potrebbe diminuire il valore di STI, invece di aumentarlo. Infatti, con il supporto del sistema di diffusione sonora, diminuisce l'effetto *Lombard* e l'insegnante tende a raggiungere il livello minimo di segnale-rumore per avere la massima intelligibilità del parlato possibile, come dimostrato in letteratura scientifica [3,4]. Nella progettazione l'utilizzo della direttività vocale è stato necessario per essere

Copyright © FrancoAngeli This work is released under Creative Commons Attribution - Non-Commercial - NoDerivatives License. For terms and conditions of usage please see: http://creativecommons.org

coerenti tra la qualificazione *ante operam*, la calibrazione del modello numerico e le misure *post operam*. Questo perché la direttività della voce produce risultati più elevati rispetto alla sorgente omnidirezionale utilizzata durante le compagne di misurazioni. Un sistema di amplificazione, grazie al modello di direttività ristretto, permette di focalizzare il segnale vocale sull'area degli studenti e di ottenere un rapporto segnale/rumore ottimale.

Compatibilmente con la geometria della sala, è stato studiato un posizionamento appropriato per avere un'adeguata copertura dell'area di ascolto, con una buona omogeneità tra tutte le sedute. La soluzione progettuale scelta prevede una coppia di line array, composte ciascuna da due colonne di diffusori ai lati dello schermo a 1 metro di altezza rispetto al pavimento. La disposizione dei trasduttori scelti (Python-KP102) produce uno schema con direttività H/V 90° × 7°, ottimizzando la copertura orizzontale senza dispersioni sull'asse verticale. I dodici altoparlanti a cono distanziati garantiscono una bassa distorsione e un buon ascolto sia in campo vicino sia a distanza dal diffusore. Il posizionamento di un diffusore acustico dietro la cattedra è stato ottimizzato per aumentare l'auto-monitoraggio degli insegnanti (*Vocal Support*).

Il guadagno e i ritardi temporali dei line array sono stati impostati in modo da raggiungere una copertura omogenea del suono diretto nell'area di seduta con l'aiuto di un modello numerico. Utilizzando il software *Odeon Room Acoustics* [14] è stata valutata e quindi ottimizzata la copertura del campo sonoro diretto dei diffusori line array, come mostrato in Fig. 7. Nella progettazione si è tenuto conto del delay temporale del diffusore superiore di ciascuna colonna di line array inclinando di 4°. La configurazione di progetto dell'impianto audio, è stata rispettata, creando di fatto un ponte di progettazione integrata con gli impiantisti elettrici e gli installatori audio/video (vedi Fig. 6).

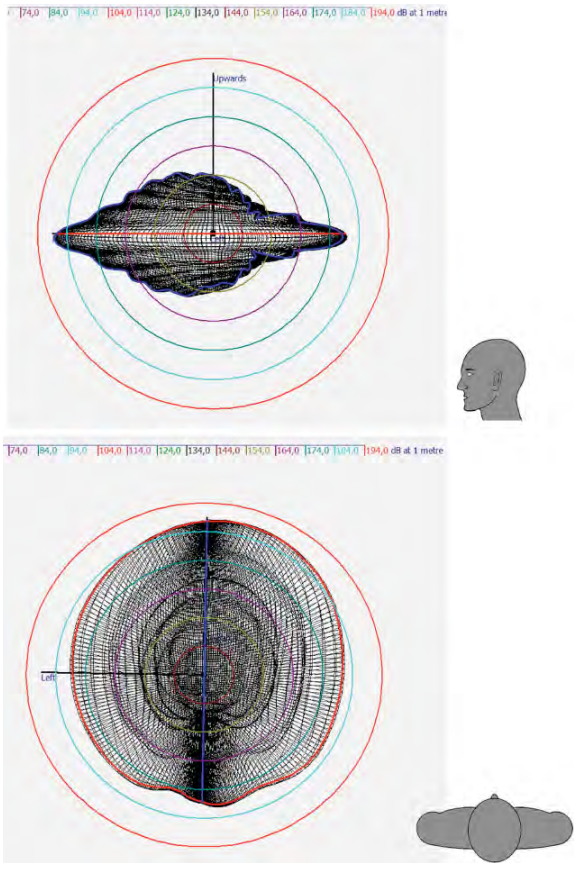

Fig. 5 – Direttività verticale ed orizzontale della colonna di altoparlanti alla frequenza di 1000 Hz

Vertical and horizontal directivity of the speaker column at 1000 Hz frequency

Fig. 6 – Foto del sistema di amplificazione al termine dei lavori di trattamento acustico della sala

Picture of the PA system at the end of the acoustic treatment of the hall

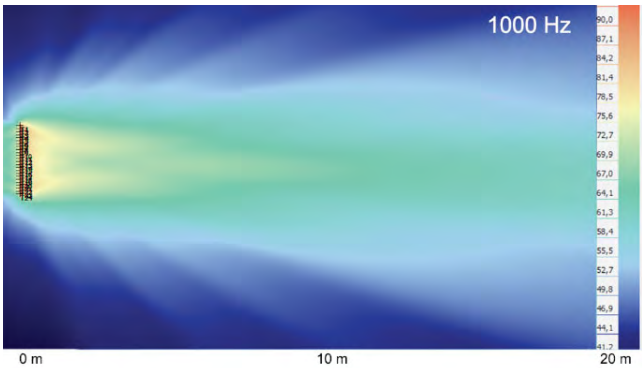

Fig. 7 – Simulazione della direttività verticale dei line array di progetto a 1000 Hz, considerando la profondità di 20 m come riferimento geometrico dell'aula

Simulation of vertical directivity for the design line array at 1000 Hz, considering a depth of 20 m as the geometric reference of the classroom

Copyright © FrancoAngeli This work is released under Creative Commons Attribution - Non-Commercial - NoDerivatives License. For terms and conditions of usage please see: http://creativecommons.org

4 | Risultati

I valori misurati riportati in Tab. 2 mostrano la panoramica dei principali risultati delle misurazioni ante e post operam, i cui valori medi sono calcolati su tutte le posizioni della sorgente e dei ricevitori. I valori misurati tempo di riverberazione (T_{20}), indice di Chiarezza del suono (C_{50}) e intelligibilità del parlato (STI) denotano condizioni acustiche piuttosto scarse per un'adeguata intelligibilità del parlato. L'elaborazione delle misure effettuate conferma la necessità di un trattamento di miglioramento acustico della sala, che allo stato di fatto presenta già un trattamento acustico della copertura. Infatti, le dimensioni e l'altezza della sala, senza trattamento acustico, avrebbero contribuito ad un valore molto più elevato di tempo di riverberazione. In particolare, l'andamento di T_{20} (Fig. 8) mostra un picco nella banda di ottava di 250 Hz, dovuto ad altri fenomeni che si verificano nella sala: la presenza di tessuto rigido, con una cavità retrostante di 30 cm, caratterizzate da un assorbimento per risonanza di membrana. Inoltre, considerando T = 1.94 s come tempo medio di riverberazione e V = 1850 m³ come volume della sala, è possibile calcolare la frequenza di Schroeder, come segue:

$$fs \simeq 2000\sqrt{\frac{T}{V}} = 2000\sqrt{\frac{1.94}{1850}} = 65\ Hz \qquad (5)$$

Il campo riverberante diffuso si può assumere considerando 2 volte la frequenza di Schroeder, pertanto i fenomeni modali all'interno dell'aula interessano parzialmente la banda d'ottava considerata solitamente nell'acustica architettonica, ossia i 125 Hz.

4.1 | Misure post operam

Il collaudo post operam è stato effettuato con lo stesso setup di misura ante operam, ma utilizzando il nuovo sistema PA come sorgente sonora. I risultati mostrano che i diffusori line array hanno una copertura uniforme sui 4 settori di sedute, coprendo anche i posti più lontani, grazie allo schema di direttività del sistema di diffusori. Le misure effettuate dopo l'intervento hanno confermato quanto previsto, ovvero il raggiungimento dei valori di riferimento per tutti i criteri di intelligibilità (vedi Tab. 2). In particolare, l'introduzione dei diffusori line array ha permesso di ottenere il valore target del parametro STI in ogni posizione del ricevitore, altrimenti difficilmente raggiungibile. La verifica di questo parametro di intelligibilità risulta soddisfatta considerando anche il rumore di fondo dell'ambiente, sia con la misura con il nuovo sistema di amplificazione (STI≥0.60), sia con la misura con la sorgente dodecaedrica ovvero senza utilizzare l'impianto PA (STI≥0.50). In un'aula di queste dimensioni (profondità di 20 m) e capienza di 178 posti, è solito utilizzare sistemi line array come sistema di amplificazione per assicurare una chiara comprensione del discorso tra insegnanti e studenti [5]. Per tale ragione, la normativa UNI 11532-2 [2] stabilisce requisiti specifici in situazioni simili (con un indice STI>0.60).

Tab. 2 – Confronto dei risultati delle misure *ante operam*, dei metodi previsionali e dei valori misurati *post operam* in fase di collaudo. I valori in stato occupato sono calcolati secondo il metodo previsionale fornito dalla UNI 11532-2 [2] (vedi equazione 1). Dove "M" (che indica la gamma delle frequenze medie) e "3" indicano quei valori medi sulle bande centrali di ottava, rispettivamente 500-1000 Hz e 500-1000-2000 Hz

Comparison of the results of ante operam measurements, predictive methods and post operam measured values during testing. Values in occupied state are calculated according to the prediction method provided by UNI 11532-2 [2] (view equation 1). Where "M" (indicating the middle frequency range) and "3" indicate those average values on the middle octave bands, 500-1000 Hz and 500-1000-2000 Hz, respectively

	Ante-operam misurato	*Post-operam simulato*	*Metodo previsionale*	*Post-operam misurato*	*Valori Target (Cat. A2 - UNI 11532-2)*
$T_{M\ inocc}$ *(s)*	1.94	1.14	1.32	**1.10**	-
$T_{M\ occ}$ *(s)*	1.58	1.00	1.26	**1.02**	1.07
$C_{50,3}$ *(dB)*	-0.6	-	-	**0.5**	≥0
STI (senza P.A.)	0.52	0.53	0.33	**0.56**	≥0.50
STI (con P.A.)	0.52	0.68	-	**0.63**	≥0.60

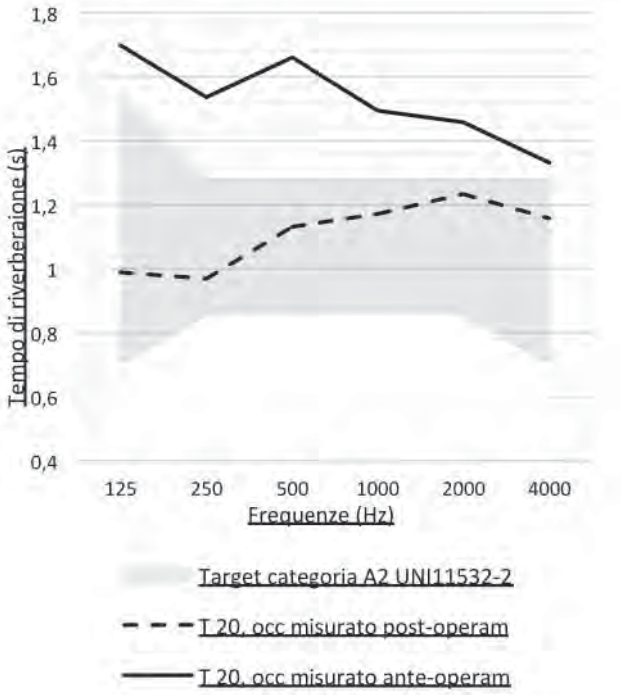

Fig. 8 – Tempo di riverberazione in funzione della banda di ottava della frequenza in condizioni occupate (all'80% come da normativa UNI11532-2) della sala prima e dopo i trattamenti acustici

Reverberation time as a function of octave band frequency in occupied conditions (at 80% as per UNI11532-2) of the room before and after acoustic treatments

5 | Discussione

Nella Fig. 8 viene presentato il confronto dell'andamento in frequenza del tempo di riverberazione T_{20}, mentre nella Fig. 9 si analizza il decadimento spaziale dei livelli di pressione sonora normalizzati (SPL) prima e dopo l'applicazione dei trattamenti acustici nella sala. L'andamento del tempo di riverberazione dopo i tratta-

Copyright © FrancoAngeli This work is released under Creative Commons Attribution - Non-Commercial - NoDerivatives License. For terms and conditions of usage please see: http://creativecommons.org

menti acustici rispecchia l'assorbimento delle sedute scelte (vedi Tab. 1), secondo i rapporti di prova del modello di poltrona [18], presentando un picco di assorbimento alle medie frequenze.

I trattamenti passivi hanno un impatto limitato sul decadimento spaziale di una sorgente sonora sferica, come la voce naturale o un altoparlante tradizionale: si osserva invece che un line array mostra una pendenza visibilmente maggiore nel grafico in Fig. 9. Le misurazioni dei livelli di pressione sonora confermano la distribuzione uniforme del campo sonoro nell'area del pubblico, come era stato valutato tramite simulazioni numeriche con il modello geometrico (vedi Fig. 10). Inoltre, le differenze rilevate (entro 3 dB tra punti massimi e minimi) sono ridotte dal contributo del campo sonoro riverberante. I posti più vicini all'oratore riceveranno anche un utile contributo diretto della voce dell'oratore.

La progettazione integrata della sala ha tenuto conto degli effetti cognitivi degli studenti con particolare riferimento alle relative scelte di sistemi di amplificazione, schermi di proiezione e interventi di correzione acustica passiva. Si è prediletta una disposizione delle sedute che segue il lato lungo della sala, scartando la soluzione sul lato corto della platea perché i compiti visivi e uditivi non coinciderebbero. Infatti il processo di apprendimento nelle lezioni tradizionali, cioè un singolo oratore che parla a un pubblico, coinvolge principalmente due sensi: la vista e l'udito. La concentrazione dello studente, supportata dalla percezione uditiva e visiva, può peggiorare se la situazione lo costringe a dividere l'attenzione per portare a termine un compito [19]. La percezione uditiva e visiva sono processi cognitivo-percettivi complessi. Anche i compiti uditivi più semplici in contesti reali richiedono una quantità significativa di elaborazione per decodificare suoni complessi, come il parlato [6-7] e [20]. Negli ambienti di apprendimento, la possibilità di vedere l'oratore rappresenta una condizione fondamentale per organizzare uno spazio confortevole per gli studenti o per migliorare le condizioni uditive in ambienti rumorosi [8,9]. Sulla base di queste considerazioni, l'orientamento della stanza diventa fondamentale perché veicola le informazioni visive e supporta la percezione del parlato.

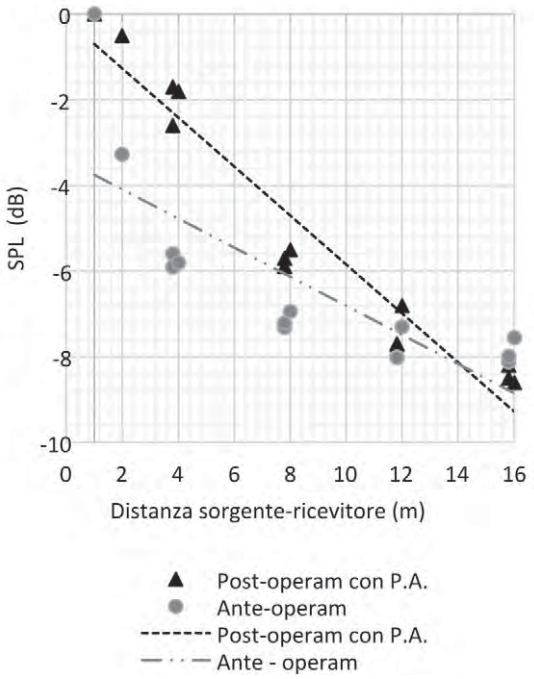

Fig. 9 – Confronto ante e post operam dei livelli di pressione sonora normalizzati (SPL) in funzione della distanza sorgente-ricevitore. I valori di SPL devono essere considerati solo qualitativamente perché non si riferiscono a una sorgente omnidirezionale nel caso post operam con l'introduzione di un sistema PA

Ante and post operam comparison of normalised sound pressure levels (SPLs) as a function of source-receiver distance. The SPL values should only be considered qualitatively because they do not refer to an omnidirectional source in the post operam case with the introduction of a PA system

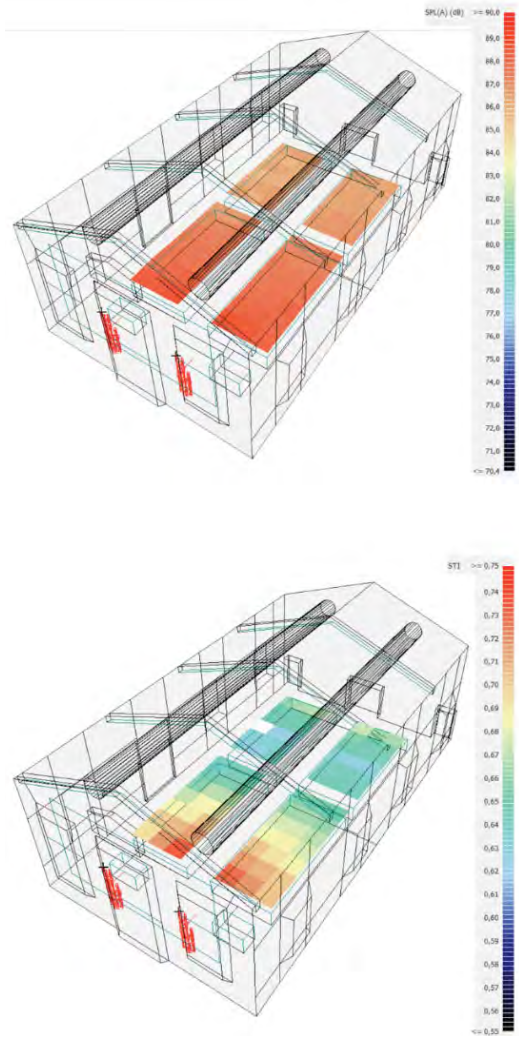

Fig. 10 – Distribuzione dei valori simulati di SPL(A) e di STI nei settori di sedute (Odeon).

Distribution of simulated SPL(A) and STI values in the seating areas (Odeon)

La progettazione del sistema di amplificazione è stata integrata dagli impiantisti elettrici e gli installatori audio/video e si riporta in Fig. 11 la configurazione della disposizione dell'impianto audio realizzata nella sala. La cattedra del docente sarà fornita di una pulsantiera di controllo di tutto il sistema audio e video della sala.

Copyright © FrancoAngeli This work is released under Creative Commons Attribution - Non-Commercial - NoDerivatives License. For terms and conditions of usage please see: http://creativecommons.org

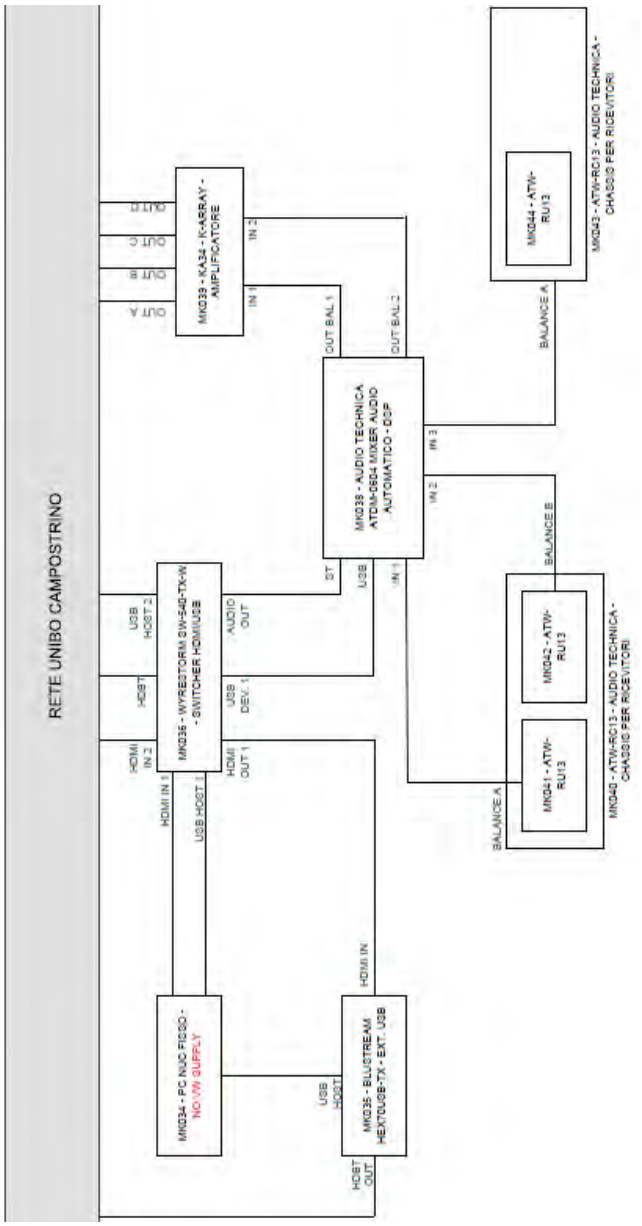

Fig. 11 - Schema di collegamento dell'impianto audio nell'aula
Sound system connection diagram in the classroom

6 | Conclusioni

Il presente lavoro riguarda la correzione acustica di una sala affinché, dopo il cambio di destinazione d'uso, da palestra diventi aula magna del Campus di Forlì. Secondo la norma ISO 3382, la condizione ante operam è stata qualificata attraverso misure di risposta all'impulso, dalle quali sono stati ricavati i valori dei criteri di intelligibilità T_{20}, C_{50} e STI. Il processo di progettazione si è basato sui valori di riferimento forniti dalla norma tecnica UNI 11532-2, ovvero il riferimento normativo indicato nei CAM per ambienti ad uso scolastico. La proposta è stata sviluppata utilizzando sia metodi previsionali, che simulazioni numeriche su un modello calibrato con un software di acustica geometrica. L'intervento ha previsto trattamenti acustici passivi – inserimento di 178 sedute – e attivi con l'introduzione di un sistema line array con l'obiettivo di raggiungere un'adeguata intelligibilità del parlato, preservando allo stesso tempo i vincoli architettonici della sala. Le misurazioni post operam hanno confermato che i metodi di previsione analitici risultano essere a favore di sicurezza, mentre le simulazioni numeriche più aderenti ai risultati ottenuti in fase di collaudo.

Conclusions

The present work concerns the acoustic correction of a room so that, after a change of use, it becomes a lecture hall on the Forlì Campus. According to the ISO 3382 standard, the ante operam condition was qualified through impulse response measurements, from which the values of the T_{20}, C_{50} and STI intelligibility criteria were derived. The design process was based on the reference values provided by the technical standard UNI 11532-2, i.e. the normative reference indicated in CAM for school environments. The proposal was developed using both prediction methods and numerical simulations on a model calibrated with geometric acoustics software. The project included passive acoustic treatments – placement of 178 seats – and active with introduction of line array sistem with the aim of achieving adequate speech intelligibility while preserving the room's architectural constraints. Post operam measurements confirmed that analytical prediction methods are in favor of safety, while numerical simulations more closely match the results obtained during testing.

7 | Ringraziamenti

L'autrice vuole ringraziare il RUP del progetto Ing. Carla De Canditiis. Il progetto iniziale della sala con l'inserimento dei pannelli fonoassorbenti a soffitto è dell'Ing. Franca Conti (TCA).

Bibliografia

[1] D.M. 11/10/17, Criteri ambientali minimi per l'affidamento di servizi di progettazione e lavori per la nuova costruzione, ristrutturazione e manutenzione di edifici pubblici, 2017.

[2] UNI11532-2 Acustica in edilizia - Caratteristiche acustiche interne di ambienti confinati- Metodi di progettazione e tecniche di valutazione - Parte 2: Settore scolastico.

[3] Sato H., Bradley J., Evaluation of acoustical conditions for speech communication in working elementary school classrooms, J. Acoust. Soc. Am., 123(4) (2008), 2064-2077, DOI: 10.1121/1.2839283.

[4] Hodgson M., Nosal E., Effect of noise and occupancy on optimal reverberation times for speech intelligibility in classrooms, J. Acoust. Soc. Am., 111(2) (2002), 931-939, DOI: 10.1121/1.2839283.

[5] De Salvio, D., D'Orazio, D. (2022). Effectiveness of acoustic treatments and PA redesign by means of student activity and speech levels. Applied Acoustics, 194, 108783, DOI: 10.1016/j.apacoust.2022.108783.

[6] Massaro, D.W., Simpson, J.A. (2014). Speech perception by ear and eye: A paradigm for psychological inquiry. Psychology Press, DOI: 10.4324/9781315808253.

Copyright © FrancoAngeli This work is released under Creative Commons Attribution - Non-Commercial - NoDerivatives License. For terms and conditions of usage please see: http://creativecommons.org

[7] Massaro, D.W., Palmer Jr, S.E. (1998). Perceiving talking faces: From speech perception to a behavioural principle. Mit Press.
[8] Lalonde, K., Werner, L.A. (2019). Infants and adults use visual cues to improve detection and discrimination of speech in noise. Journal of Speech, Language, and Hearing Research, 62(10), 3860-3875, DOI: 10.1044/2019_JSLHR-H-19-0106.
[9] Hodgson M., Experimental investigation of the acoustical characteristics of university classrooms, J. Acoust. Soc. Am., 106(4) (1999), 1810-1819, DOI: 10.1121/1.427931.
[10] UNI11532-1 Acustica in edilizia - Caratteristiche acustiche interne di ambienti confinati – Metodi di progettazione e tecniche di valutazione – Parte 1: Requisiti generali.
[11] EN IEC 60268-16: Sound system equipment - Part 16: Objective rating of speech intelligibility by speech transmission index.
[12] ISO 3382-1 Acoustic: Measurement of room acoustic parameters Part 1 Performance spaces.
[13] ISO 3382-2 Acoustic: Measurement of room acoustic parameters - Part 2 Reverberation time in ordinary rooms.
[14] Christensen CL., ODEON Room Acoustics Software-version 12. Lyngby, Denmark: Industrial, Auditorium and Combined Editions, 2013.
[15] Fratoni, G., D'Orazio, D., Barbaresi, L., Garai, M., & Cappellini, L. (2023, February). Mixing materials in false ceilings to increase sound diffusion in education spaces. In INTER-NOISE and NOISE-CON Congress and Conference Proceedings (Vol. 265, No. 2, pp. 5002-5006). Institute of Noise Control Engineering, ISBN 978-190691342-7.
[16] Cox T.J., D'Antonio P. (2009). Acoustic Absorbers and Diffusers, DOI: 10.1016/j.jsv.2006.01.055.
[17] Sistemi fonoassorbenti, pannelli Soundless, AKIFIX Group.
[18] Poltrone Antea, Audia Italia.6
[19] Massaro, D.W., Warner, D.S. (1977). Dividing attention between auditory and visual perception. Perception & Psychophysics, 21(6), 569-574, DOI: 10.3758/BF03198739.
[20] Lotto, A., Holt, L. (2011). Psychology of auditory perception. Wiley Interdisciplinary Reviews: Cognitive Science, 2(5), 479-489, DOI: 10.1002/wcs.123.
[21] EN 12354-6:2003 Building Acoustics - Estimation of acoustic performance of buildings from the performance of elements - Part 6: Sound absorption in enclosed spaces.
[22] UNI11532-1 Acustica in edilizia - Caratteristiche acustiche interne di ambienti confinati - Metodi di progettazione e tecniche di valutazione - Parte 1.

Copyright © FrancoAngeli This work is released under Creative Commons Attribution - Non-Commercial - NoDerivatives License. For terms and conditions of usage please see: http://creativecommons.org