

Gennaio  
2025

# SPECIALE CALENDARIO 2025

**Comfort e Benessere**

# Progettazione integrata con cambio di destinazione d'uso di un'aula universitaria

Alessia Nora | Luca Barbaresi | Dario D'Orazio | Giulia Fratoni

## Introduzione

L'entrata in vigore dei Criteri Ambienti Minimi (CAM) per l'edilizia ha dato un forte impulso per la progettazione acustica degli ambienti pubblici e in particolare per gli edifici scolastici. Nelle aule a scopo didattico un aspetto di fondamentale rilevanza è la comprensibilità di un suono da parte di un ascoltatore in modo non sia deteriorata la comunicazione di informazioni tra docenti e studenti, ovvero l'intelligibilità del parlato. Inoltre, i locali scolastici devono soddisfare requisiti di illuminamento medio per garantire il comfort e le prestazioni visive adeguate. Infatti, la mancanza di un singolo fattore di comfort può incidere sulla sensazione complessiva e influire sul successo delle altre componenti. Questo studio affronta la progettazione integrata acustica ed illuminotecnica, con focus sull'adeguamento acustico, di una palestra storica a Forlì con cambio di destinazione d'uso ad Aula Magna, rispettando la norma UNI 11532-2 per il comfort acustico degli ambienti scolastici.

## Determinazione dei parametri acustici per aule scolastiche

I parametri acustici necessari per la caratterizzazione di un'aula scolastica sono definiti dalla normativa UNI 11532-2 [1], resa cogente dai CAM [2], e sono il tempo di riverberazione  $T$ , l'indice di chiarezza  $C_{50}$  e lo *Speech Transmission Index* STI. I metodi previsionali per determinare tali parametri sono descritti nella norma UNI 11532-1 [3], mentre la UNI 11532-2 definisce i metodi di progettazione e le tecniche di valutazione. Quest'ultima prevede che i valori di tempo di riverberazione siano sempre riferiti a un ambiente arredato e occupato ( $T_{occ}$ ). Le misurazioni sono però da effettuare in condizioni di ambiente arredato e non occupato ( $T_{inocc}$ ). Per ottenere i valori di tempo di riverberazione che tengano conto dell'occupazione è necessario aggiungere l'assorbimento acustico delle persone, calcolato considerando l'80% dell'occupazione totale per ciascuna banda di ottava tra 125 Hz e 4000 Hz, come nella formula a seguire.

$$T_{occ} = \frac{T_{inocc}}{1 + \frac{T_{inocc} \cdot \Delta A_{persone}}{0,16 V}} \quad (s) \quad (1)$$

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 UNI11532-2, in  $m^2$  Sabine.

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

$$T_{ott} = 0,37 \log V - 0,14 \quad (s) \quad (2)$$

Dove:

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

Nella simulazione previsionale analitica, invece, si utilizza la formula del tempo di riverberazione di Sabine tenendo conto anche dell'area equivalente di persone che occupano l'80% dell'ambiente.

$$T_{occ} = 0,16 \frac{V}{\sum \alpha_j S_j + A_{obj} + 0,8N \Delta A_{persone}} \quad (s) \quad (3)$$

Dove:

- $V$  è il volume della sala, in  $m^3$ ;
- $\alpha_j$  è il coefficiente di assorbimento acustico della superficie  $j$ -esima;
- $S_j$  è la superficie  $j$ -esima delle superfici dell'involucro, in  $m^2$ ;
- $A_{obj}$  è 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 UNI 11532-2, in  $m^2$  Sabine.

Il tempo di riverberazione rappresenta una caratteristica intrinseca della sala, mentre l'indice di chiarezza varia in funzione della posizione delle sorgenti sonore e dei ricevitori, rendendola una proprietà specifica del punto di ascolto. La normativa UNI 11532-2 stabilisce punti di misura obbligatori per il posizionamento delle sorgenti sonore e dei ricevitori durante le misurazioni prima e dopo il trattamento acustico. L'indice di chiarezza  $C_{50}$  è definito con la formula seguente.

$$C_{50} = \frac{\int_0^{50} p(t)^2 dt}{\int_{50}^{\infty} p(t)^2 dt} \text{ (dB)} \quad (4)$$

Dove:

- $50 \text{ ms}$  è il riferimento temporale che delimita il suono diretto e prime riflessioni (utili per il parlato), dalle successive riflessioni (dannose per il parlato);
- $p(t)$  indica la pressione sonora istantanea della risposta all'impulso.

Il descrittore  $C_{50}$  è richiesto da norma UNI 11532-2 che sia  $\geq 2\text{dB}$ , in alternativa allo STI, per ambienti di dimensioni inferiori ai  $250 \text{ m}^3$ . Per ambienti di volume  $\geq 250 \text{ m}^3$  si applica esclusivamente lo STI. Nel presente lavoro viene comunque considerata anche la  $C_{50}$  e si riporta di seguito la formula previsionale di tale parametro secondo la UNI 11532-1.

$$C_{50} \approx 10 \log e^{\left(\frac{0.691}{T} - 1\right)} \text{ (dB)} \quad (5)$$

I valori di *Speech Transmission Index* STI variano da 0 a 1, dove il valore 0 indica nessuna intelligibilità ed il valore 1 un'intelligibilità ideale. La IEC 60268-16 [4] e la normativa nazionale UNI 11532-1 qualifica come "buono" un valore di STI compreso tra 0,6 e 0,75, "eccellente" un valore maggiore di 0,75. La norma UNI 11532-2 richiede, per aule con volume maggiore di  $250 \text{ m}^3$ , valori di STI  $\geq 0,50$  in caso di assenza di impianto di amplificazione e STI  $\geq 0,60$  in presenza di sistema di diffusione sonora (*Public Address PA*). Lo STI considera, a differenza degli altri parametri acustici (tempo di riverberazione, indice di chiarezza  $C_{50}$ ), l'effetto combinato del rumore di fondo e della riverberazione sulla riduzione di intelligibilità del parlato. Infatti, una bassa intelligibilità, secondo numerose fonti da letteratura [5,6], crea un notevole affaticamento nella comprensione delle informazioni da parte degli studenti. Questo aspetto comporta un abbassamento della concentrazione e probabile aumento della distrazione degli studenti, che infine comporta un aumento del livello di rumore di fondo. Lato docente invece, l'incremento del rumore di fondo induce un effetto chiamato *Lombard*, ovvero l'innalzamento inconsapevole della voce, incrementando di conseguenza lo sforzo vocale dell'oratore. Un adeguato comfort acustico risulta quindi necessario per ridurre al minimo lo sforzo vocale del docente e facilitare la comprensione del parlato per gli studenti.

## Caso studio e metodologia

Il caso studio è la Palestra Campostrino, immobile di interesse storico-artistico, che al termine dell'intervento di riqualificazione è stato adibito ad Aula Magna del campus universitario di Forlì. La sala ha una pianta regolare di  $20 \times 11,5$  metri, un volume di  $1850 \text{ m}^3$  (vedi Figura 1) e da progetto è richiesta una capienza di 180 posti.

La campagna di misure acustiche, condotta a valle degli interventi di correzione acustica, ha evidenziato un tempo di riverberazione ( $T = 1.94\text{s}$ ), un indice di chiarezza sonora ( $C_{50} = -0.6\text{dB}$ ) e uno STI insufficienti ( $\text{STI} = 0.52$ ) per soddisfare i requisiti normativi. Per migliorare la qualità acustica sono stati utilizzati modelli numerici, integrando sia simulazioni, che calcoli previsionali (formule 3 e 5) per identificare le soluzioni ottimali. Nel modello, creato con software via *ray-tracing*, sono stati collocati sorgenti, ricevitori e sono stati attribuiti i materiali alle superfici (vedi Figura 2). Per simulare la condizione iniziale dell'aula sono stati utilizzati materiali con differenti proprietà acustiche: superfici riflettenti (pareti, pavimenti, vetri) ed elementi più assorbenti (copertura).

Il progetto acustico della sala, già trattata in precedenza con pannelli fonoassorbenti in copertura, prevede due tipologie di interventi: un trattamento passivo con l'inserimento di sedute fonoassorbenti e un trattamento attivo con l'installazione di un sistema di amplificazione (PA). Il sistema di diffusione sonora è fondamentale nelle aule per aumentare l'intelligibilità del parlato, soprattutto per aule di grandi dimensioni ( $\text{Volume} \geq 250\text{m}^3$ ). Infatti, con il supporto del sistema di diffusione sonora, diminuisce l'effetto *Lombard* suddetto perché il docente tende a non innalzare il tono della voce, raggiungendo così il livello ottimale di segnale-rumore in accordo con la letteratura scientifica [7]. Nell'aula analizzata, con profondità di 20 metri e capienza di 180 posti, dovrebbe essere utilizzato come sistema di amplificazione un *line array* per assicurare una chiara comprensione del discorso tra insegnanti e studenti. Un sistema *line array* è un insieme di altoparlanti allineati in modo verticale, assimilabili ad una sorgente sonora lineare che crea un fronte sonoro cilindrico. Aumentando il numero di elementi, e quindi la lunghezza della sorgente, si ottiene un livello di pressione sonora più elevato e uniforme. 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 dell'intelligibilità del parlato nei settori di sedute. Le misure effettuate dopo l'intervento hanno confermato il raggiungimento dei requisiti normativi con un tempo di riverberazione mediato sulle bande centrali di ottava di 1,02 secondi e un valore di STI mediato in tutte le posizioni di ricevitori pari a 0,63. Nel precedente intervento di riqualificazione della sala, era stata effettuata anche la realizzazione di un nuovo impianto di illuminazione. Tuttavia, nel presente lavoro state svolte nuove simulazioni illuminotecniche (vedi Figura 3) per verificare che i corpi illuminanti esistenti garantiscano il compito visivo richiesto da normativa EN 12464-1 [8] e per ottimizzare l'installazione di un adeguato sistema di videoproiezione nella sala.

Questo progetto evidenzia l'efficacia di un approccio integrato di progettazione acustica, combinando trattamenti passivi e attivi e di progettazione illuminotecnica (vedi Figura 4 e 5). Gli interventi inoltre hanno reso possibile il raggiungimento di un livello di comfort per studenti e docenti, rispettando al contempo i vincoli storici e architettonici. La trasformazione della palestra Campostrino in Aula Magna è un esempio di come sia possibile ottimizzare il comfort acustico e visivo in ambienti storici, garantendo al contempo la conformità agli standard UNI 11532-2 [1], EN 12464 [8] e CAM [2].

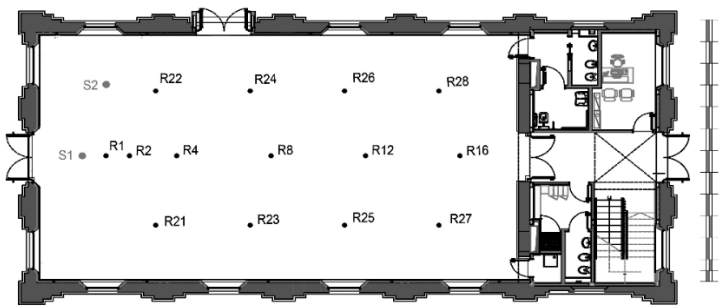


Figura 1 - Planimetria della sala con indicate le posizioni delle sorgenti sonore (S) e dei ricevitori (R) durante le misurazioni.

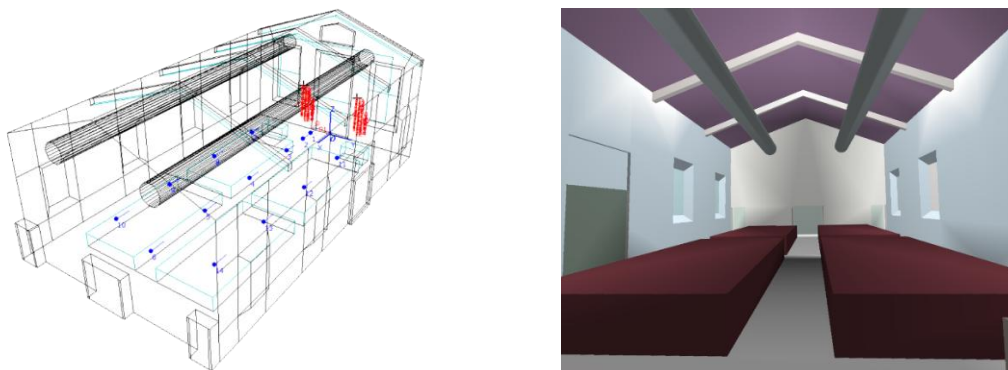


Figura 2 - Modello numerico realizzato con software di simulazione via ray-tracing.

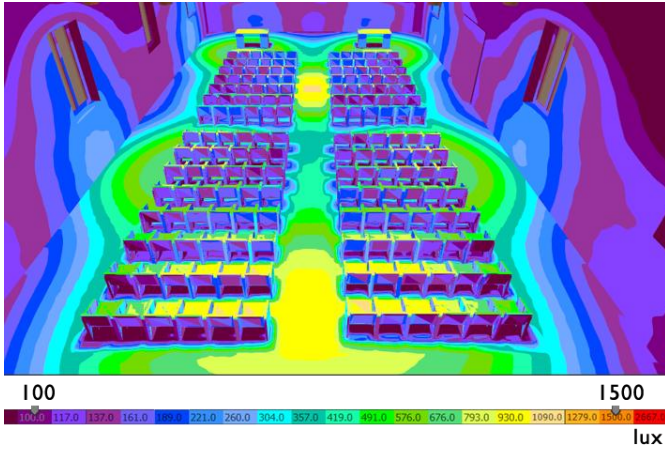


Figura 3 - Modello numerico realizzato con software di simulazione illuminotecnica per la verifica del compito visivo nei settori di sedute della sala.



Figura 4 - Sala durante le misurazioni prima del trattamento acustico.



Figura 5 – Aula Magna al termine del trattamento acustico passivo (sedute), attivo (impianto PA) e con l'inserimento del sistema di videoproiezione.

## Ringraziamenti

L'autrice vuole ringraziare il RUP del progetto Ing. Carla De Canditiis. Il progetto del trattamento acustico iniziale della sala è invece da attribuire all'Ing. Franca Conti.

## Bibliografia

- [1] UNI 11532-2 Acustica in edilizia - Caratteristiche acustiche interne di ambienti confinati- Metodi di progettazione e tecniche di valutazione - Parte 2: Settore scolastico.
- [2] D.M. 06/08/22, Criteri ambientali minimi per l'affidamento di servizi di progettazione ed esecuzione dei lavori di interventi edilizi, 2022.
- [3] UNI 11532-1 Acustica in edilizia - Caratteristiche acustiche interne di ambienti confinati - Metodi di progettazione e tecniche di valutazione - Parte 1: Requisiti generali.
- [4] EN IEC 60268-16 Sound system equipment - Part 16: Objective rating of speech intelligibility by speech transmission index.
- [5] Sato H., Bradley J., Evaluation of acoustical conditions for speech communication in working elementary school class-rooms, J. Acoust. Soc. Am., 123(4) (2008), 2064-2077.
- [6] 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.
- [7] De Salvo, D., & D'Orazio, D. (2022). Effectiveness of acoustic treatments and PA redesign by means of student activity and speech levels. Applied Acoustics, 194, 108783.
- [8] EN 12464-1 Light and lighting of work places - Part 1: Indoor work places.