

MISURE DI SPEECH TRANSMISSION INDEX E TEMPO DI RIVERBERAZIONE IN AULE SCOLASTICHE PRIMA E DOPO INTERVENTI DI MIGLIORAMENTO ACUSTICO

di

* Simone Secchi, Veronica Amodeo

SOMMARIO

Questo articolo è la forma estesa del contributo pubblicato negli atti del 47° Convegno Nazionale della Associazione Italiana di Acustica, svoltosi on-line dal 24 al 28 maggio 2021 [1].

Riporta l'analisi del Tempo di Riverberazione e dello Speech Transmission Index misurati in un campione di aule scolastiche del Comune di Firenze, precedentemente e successivamente alla realizzazione di interventi di correzione della qualità acustica interna.

I risultati riportati, che fanno riferimento alle metodologie di misura e di calcolo, e ai valori limite definiti dalla norma UNI 11532 parti 1 e 2, mostrano un significativo miglioramento di entrambi i parametri esaminati con una maggiore criticità nella verifica del Tempo di Riverberazione rispetto allo STI.

I risultati delle misure dello STI vengono inoltre posti a confronto con i valori dello stesso parametro calcolati in base alla metodologia descritta dall'appendice

A della norma UNI 11532-1, ottenendo una buona corrispondenza tra valori misurati e valori determinati teoricamente.

1. Premessa

Il Decreto Ministeriale dell'11 ottobre 2017 sui Criteri Ambientali Minimi relativi alle opere di nuova costruzione, ristrutturazione e manutenzione di edifici pubblici [2] indica l'obbligo delle verifiche della qualità acustica degli ambienti interni con riferimento specifico alla

determinazione del Tempo di Riverberazione e dello Speech Transmission Index, rimandando alla norma UNI 11532 per i dettagli tecnici ed i valori limite.

Alla data di pubblicazione del decreto (ottobre 2017) era in vigore la versione del 2014 della norma 11532, poi aggiornata nel 2018 (con la importante Errata Corrige 1) alla versione 11532-1 [3] che però non contiene valori limite, ma solo le definizioni delle grandezze pertinenti. Solo nel marzo del 2020 è stata emanata la parte 2 della norma [4] che contiene i valori limite in termini di Tempo di Riverberazione, TR, Chiarezza, C50, e Speech Transmission Index, STI, per l'edilizia scolastica. La norma chiarisce altresì che le verifiche di STI sono necessarie solo nei casi di ambienti didattici caratterizzati da volume pari ad almeno 250 m³, mentre per volumi inferiori, ovvero per la maggior parte delle aule scolastiche, la verifica dello STI può essere sostituita da quella della Chiarezza.

In questo articolo si riporta il risultato dell'applicazione della metodologia di misura e di calcolo del tempo di riverberazione e dello STI, a un campione di scuole site nel Comune di Firenze che sono state oggetto di calcoli previsionali, verifiche sperimentali e conseguenti interventi di correzione acustica.

Vengono pertanto posti a confronto i valori dello STI e del TR riferiti alle situazioni antecedente e seguente agli interventi di miglioramento acustico.

2. Descrizione del campione di scuole esaminate e degli interventi eseguiti

L'indagine qui presentata riguarda un campione di undici aule per la didattica, appartenenti a scuole di ordine differente, del Comune di Firenze, nelle quali sono state realizzate opere di miglioramento della qualità acustica interna a cura della Direzione Servizi Tecnici del Comune.

Sia le misurazioni che gli interventi correttivi sono stati eseguiti prevalentemente tra il 2018 e il 2020, e hanno riguardato alcune aule di differenti istituti scolastici in cui era prevista la presenza di alunni con deficit uditivi.

A questo riguardo, è stata attivata una proficua collaborazione tra Comune di Firenze, Dipartimento di Architettura dell'Università di Firenze,



Figura 1 - Esempio di un intervento di correzione acustica eseguito nella scuola primaria Rossini del Comune di Firenze

Nome scuola	Ordine	V (m ³)	S (m ²)
Marconi	primaria	138	46
Marconi	infanzia	104	35
Carducci	primaria	183	51
Desiderio da Settignano	infanzia	149	50
Masaccio	Secondaria I	101	33
Montagnola 1°B *	primaria	350 (160)	81 (37)
Montagnola 4°C *	primaria	350 (208)	81 (52)
Rossini	primaria	147	39
Martin Luther King	primaria	209	50
Acciaiuoli	primaria	191	45
Salvemini**	Secondaria II	412	62

Tabella 1 – Elenco delle aule esaminate con le relative dimensioni.

* A seguito degli interventi di miglioramento acustico sono state unite due aule, raddoppiando così superficie e volume rispetto alla condizione ante operam, le cui dimensioni sono indicate tra parentesi.

** Esaminata fuori dal presente progetto di ricerca.

e l'associazione IOPARLO che unisce genitori di alunni con difetti uditivi. La ricerca scientifica ha infatti dimostrato che il problema della cattiva qualità acustica degli ambienti didattici provoca conseguenze negative sulle attitudini di comprensione e di apprendimento di tutti gli alunni, soprattutto se più giovani, ma tali conseguenze sono maggiormente marcate in soggetti con difetti uditivi. Per approfondire tale problematica e supportare il Comune di Firenze nell'adeguamento degli spazi scolastici (aule, refettori e palestre) che ospitano o ospiteranno alunni con deficit uditivo, il Dipartimento di Architettura ha svolto una ricerca che è stata supportata, oltre che dal Comune stesso (Direzione Servizi Tecnici) anche dalla Fondazione Cassa di Risparmio di Firenze, della quale alcuni risultati sono qui presentati.

Le opere di miglioramento acustico eseguite nell'ambito di questa ricerca sono consistite in diverse tipologie di interventi realizzati con applicazione a parete o a soffitto (a controsoffitto continuo o a baffles), di pannelli in fibra poliestere, in gesso microforato, o in fibra di legno mineralizzata e sono state finalizzate al conseguimento dei valori del tempo di riverberazione richiesti per ambienti didattici che ospitano alunni con difetti uditivi. In figura 1 si riporta un esempio degli interventi eseguiti in una scuola primaria.

Va qui evidenziato che i valori limite del Tempo di Riverberazione sono differenti nella versione del 2014 della norma UNI 11532 (Appendice A, $TR \leq 0,4$ s) e nella versione del 2020 (categoria A.3.1, $T_{0,17} = 0,32 \cdot \log(V) - 0,17$ (s)). A questo riguardo, è utile sottolineare che il limite di 0,4 s, definito dalla versione del 2014 della 11532, corrisponde, nella nuova versione, a un volume di 60,5 m³ dell'aula. Tale valore è inferiore alla media del volume delle aule esaminate, che invece è prossimo a 180 m³; il valore ottimale per tale volume, secondo la versione del 2020, è pari a circa 0,55 s.

Va comunque sottolineato che i limiti definiti dalla UNI 11532-2:2020 fanno riferimento a tutte le frequenze in bande di ottava tra 125 e 4000 Hz, che devono essere corretti con i margini di tolleranza (min – max) descritti dalla norma per ogni singola banda di frequenza, per il contributo fonoassorbente stimato degli alunni (all'80% di presenza rispetto alla capienza dell'aula), e per l'incertezza di misura.

Pertanto, non è possibile un confronto diretto tra il limite di 0,4 secondi stabilito per tali aule dalla versione del 2014 e quello definito dalla versione del 2020.

La tabella 1 riporta l'elenco delle aule esaminate sulle quali sono stati eseguiti gli interventi di miglioramento acustico nell'ambito della campagna di misure citata.

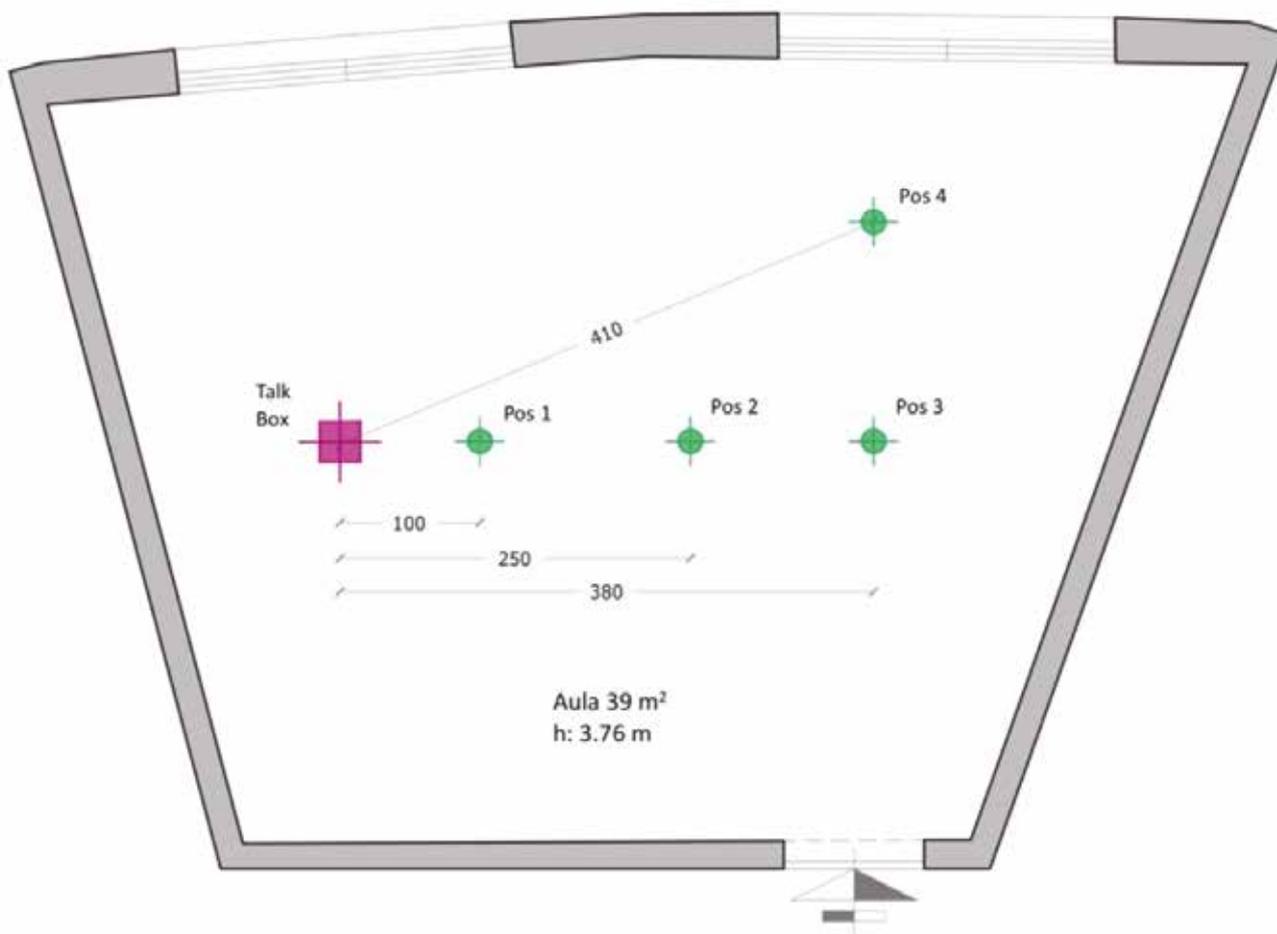


Figura 2 – Punti di misura dello STI nell'aula della scuola primaria Rossini (in verde con numerazione da 1 a 4) e posizione della sorgente (in viola).

3. Descrizione della metodologia di misura e di calcolo

Le misure di Tempo di Riverberazione sono state condotte sia prima che dopo l'esecuzione degli interventi di miglioramento, rilevando la risposta impulsiva degli ambienti con analizzatore di spettro sonoro a due canali e microfoni per campo diffuso da ½ pollice. Le postazioni di misura del Tempo di Riverberazione sono state distribuite nell'ambiente mantenendo le distanze dalle superfici riflettenti definite dalle norme pertinenti, mentre per quelle dello STI si è fatto riferimento alle posizioni indicate dal punto 6 della UNI 11532-2. In figura 2 si riporta per un'aula campione, le 4 postazioni di misura dello STI e la posizione della sorgente sonora.

Tutte le misure sono state eseguite in aule nor-

malmente arredate e con i soli due tecnici addetti alle rilevazioni.

La misura diretta dello STI, che è stata eseguita tramite la sorgente TalkBox BedRock BTB 65, in grado di produrre la modulazione standard del segnale sonoro normalizzato a 60 dBA (70 dBA per le aule con $V > 250 \text{ m}^3$) a un metro dall'oratore, e fonometro analizzatore BedRock SM90 dotato di modulo per analisi diretta dello STI (figura 3), è stata svolta solo in un campione di aule.

In altre aule la determinazione dello STI è stata effettuata, invece, in maniera indiretta a partire dalla misura della risposta impulsiva e dai livelli del segnale parlato e di fondo misurati nel punto del ricevitore, sempre nell'ipotesi di sorgente sonora sopra descritta.

Tale procedura è implementata, tra gli altri,



Figura 3 – Strumentazione utilizzata per la misura diretta dello STI in un’aula campione; a sinistra il fonometro analizzatore, a destra la sorgente TalkBox.

nella plug-in Aurora 5.0 del software Audacity®. I risultati ottenuti con le due procedure hanno fornito risultati molto simili tra loro.

Inoltre, in alcune aule, la cui verifica era stata eseguita prima dell’inizio dell’attività di ricerca qui descritta, lo STI era stato calcolato a partire dal valore misurato tra 125 e 8000 Hz del Tempo di Riverberazione, sulla base del metodo B descritto nell’appendice A della UNI 11532-1:2018, che riprende il metodo della IEC 60268-16:2011.

Tale procedura di calcolo è valida solo in condizioni di campo riverberato perfettamente diffuso e quindi per una distanza dall’oratore pari ad almeno 5 volte la distanza critica, r_c , determinabile in base alla formula di seguito riportata, ripresa dalla UNI 11532-1:2018.

$$r_c = 0,0032 \frac{V}{TR}$$

A livello esemplificativo, per un’aula avente volume V di 150 m^3 e tempo di riverberazione medio TR di 1 secondo, la distanza critica è pari a circa 0,5 metri; pertanto, con riferimento a questo esempio, il metodo di calcolo semplificato dello STI sarebbe valido solo per postazioni di ascolto (alunni/ricevitori) posti ad almeno 2,5 metri dalla sorgente (cattedra),

quindi in generale nella metà dell’aula opposta alla posizione della cattedra.

In generale, si può ritenere che il calcolo semplificato dello STI, basato sul Tempo di Riverberazione e sul rapporto Segnale/Rumore, possa approssimare il valore della media spaziale della stessa grandezza, mentre tenda a sottostimare i valori misurati in prossimità della sorgente, che beneficiano invece di un migliore rapporto Segnale/Rumore.

Per ogni aula lo STI è stato quindi calcolato partendo dai valori misurati del Tempo di Riverberazione in bande di ottava tra 125 e 8.000 Hz e dalla stima del livello di pressione sonora nel punto del ricevitore, a centro stanza.

La stima del livello del parlato è stata effettuata normalizzando lo spettro della voce al livello di 60 dBA ad un metro dalla posizione della sorgente (la cattedra) e considerando per ogni aula la distanza tra cattedra e centro stanza ed il valore misurato del Tempo di Riverberazione, nell’ipotesi di campo sonoro semi riverberante.

Il livello del rumore di fondo è stato posto uguale al valore medio misurato in un’aula campione.

Tale livello è stato ritenuto rappresentativo del livello di rumore di fondo nelle diverse aule, in assenza di rumori antropici dentro la scuola (bambini silenti).

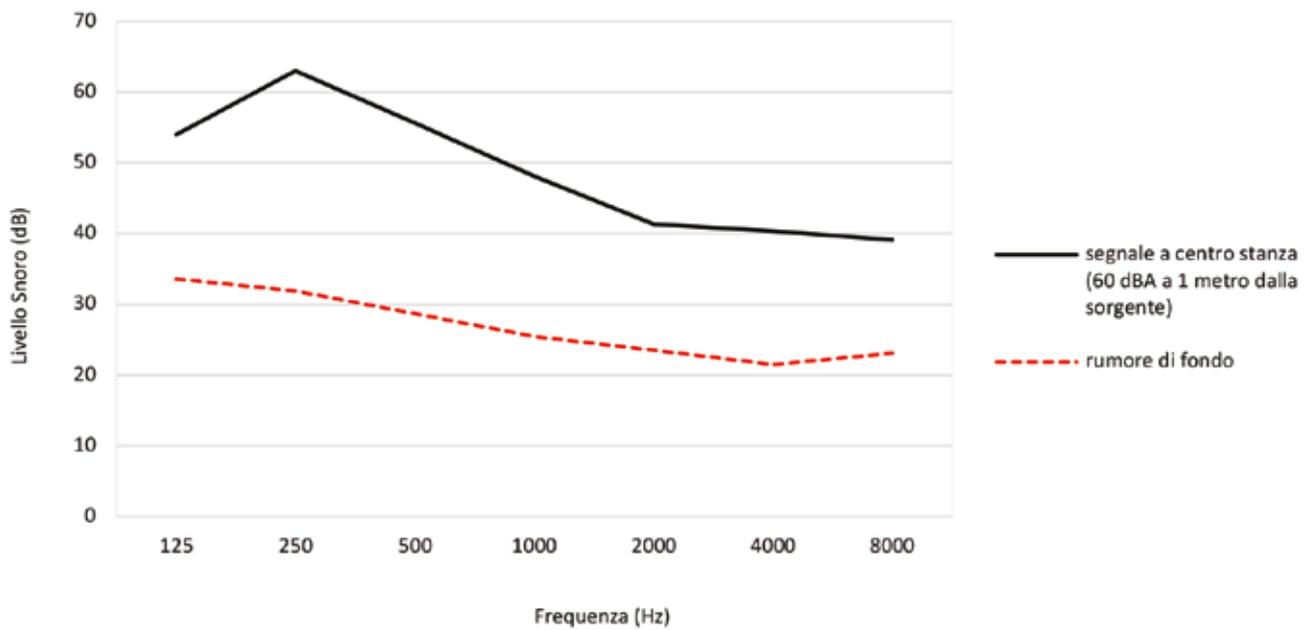


Figura 4 – Livello di pressione sonora a centro stanza per segnale di parlato e di rumore di fondo per un’aula tipo.

La figura 4 riporta, per un’aula tipo, il confronto tra i valori del livello del segnale (parlato) e del rumore a centro stanza.

Il grafico di figura 5 mostra il confronto tra i valori misurati dello STI con metodo diretto (modulazione del segnale generato da sorgente Talk Box nella posizione dell’oratore, come media tra i diversi punti di misura) e valori calcolati secondo il metodo B dell’appendice A della UNI 11532-1, a partire dal tempo di riverberazione, per campo riverberante e quindi validi in gene-

rale oltre la metà della stanza.

Dai risultati riportati in figura 5 si deduce che la differenza tra valore misurato come media tra le tre posizioni in asse alla cattedra (1,2,3) e valore calcolato per campo riverberante è compresa tra 0 e 0,05, quindi trascurabile. Pertanto, si può ritenere che la stima del valore medio dello STI sulla base del metodo B dell’appendice A della UNI 11532 sia sufficientemente affidabile. Tale metodo di calcolo è quindi alla base delle analisi di seguito riportate.

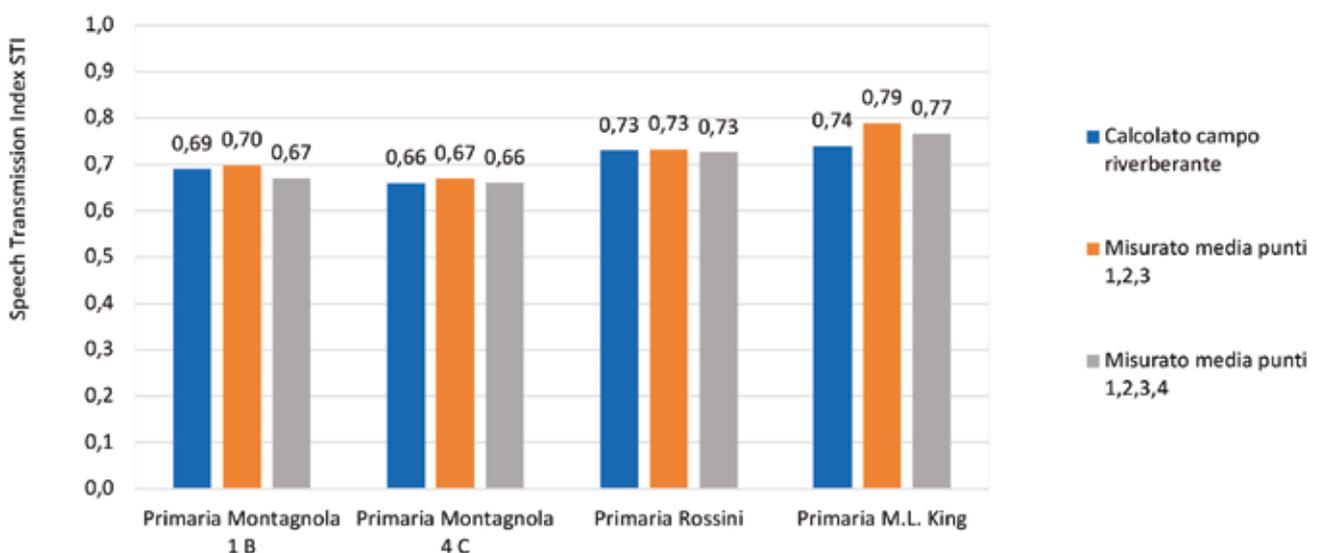


Figura 5 – Confronto tra valori misurati (come media tra le postazioni 1,2,3 e 4 e tra le sole postazioni 1,2,3) e calcolati (come valore a centro stanza) dello STI.

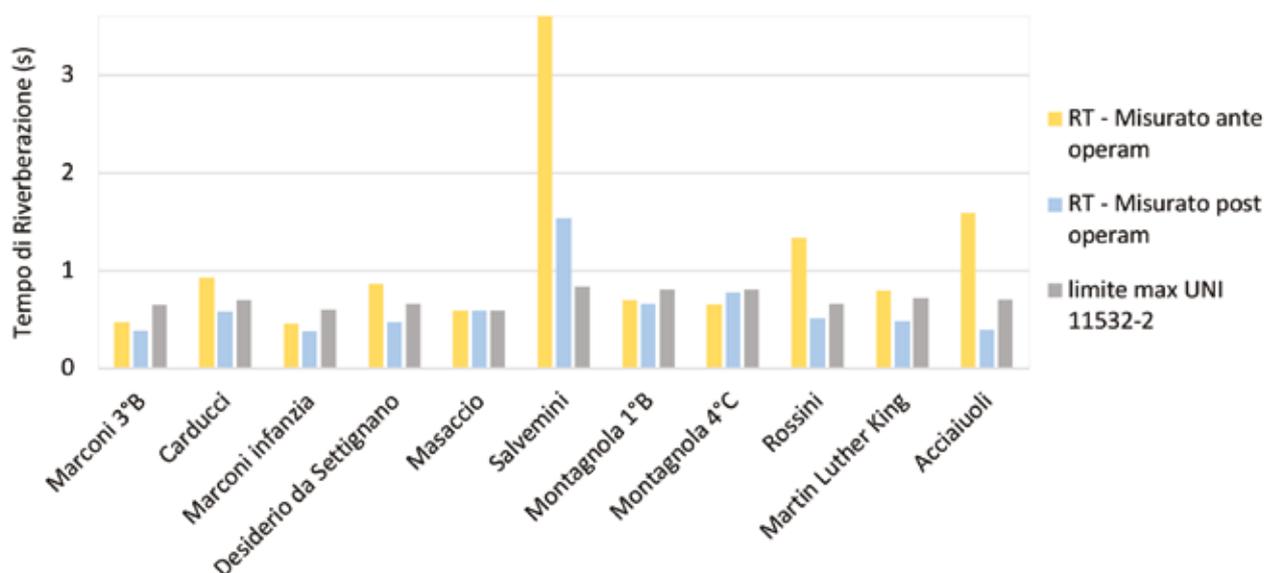


Figura 6 – Confronto tra i valori medi (250-2.000 Hz) del Tempo di Riverberazione ante e post operam (80% di occupazione dell’aula e incertezza di misura con 84% di livello di fiducia) e il valore limite massimo secondo UNI 11532-2 della categoria A.3.1.

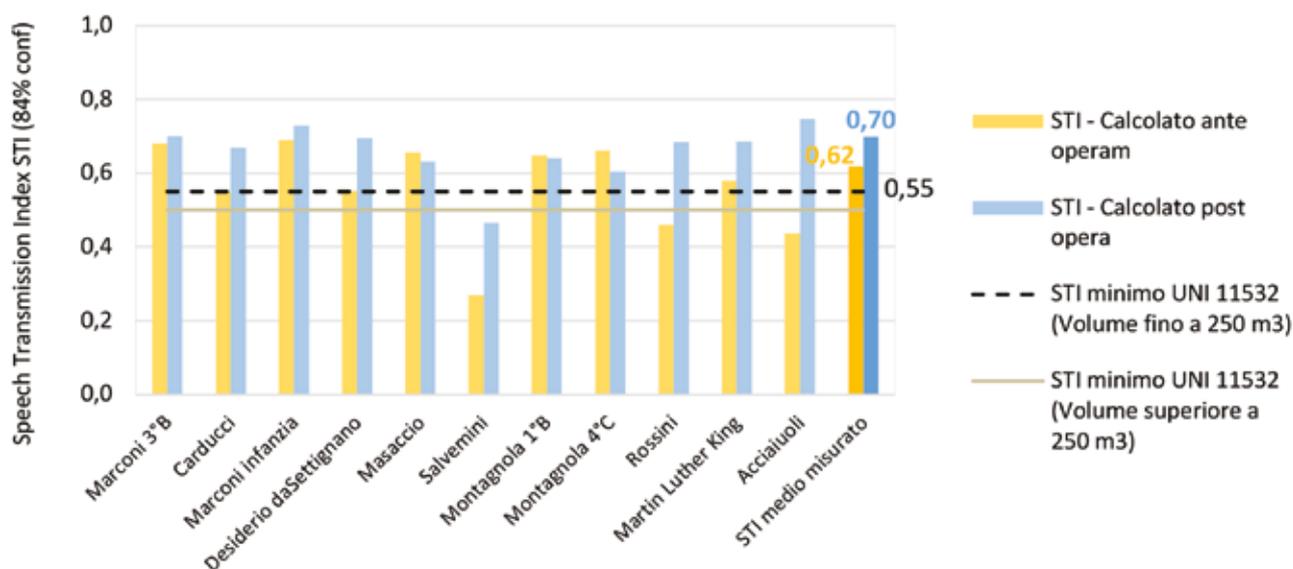


Figura 7 – Confronto tra i valori dello STI ante e post operam (aule vuote ed arredate) e il valore limite minimo secondo UNI 11532-2.

4. Risultati e considerazioni sulle misurazioni eseguite

I grafici che seguono riportano i risultati ottenuti prima e dopo gli interventi di correzione acustica nelle aule elencate in tabella 1.

Il grafico di figura 6 riporta i valori della media spaziale del tempo di riverberazione modificati per tenere conto dell’occupazione all’80% dell’aula, in accordo alla formula (1) della UNI

11532-2, e dell’incertezza di misura con livello di fiducia dell’84%, al confronto con i valori limite massimi definiti dalla stessa norma per la categoria A.3.1 (aule didattiche con presenza di bambini con deficit uditivo o non madre lingua). Per semplicità di lettura, i dati sono qui riportati come media tra le frequenze di 250 e 2.000 Hz, mentre la verifica completa è stata effettuata per ogni banda di frequenza tra 125 e 4.000 Hz, rispettando il margine di tolleranza (min – max)

definito dalla figura 2 della norma UNI 11532-2. Si nota che in tutte le aule esaminate, con l'eccezione dell'aula della scuola secondaria superiore Salvemini, che non faceva parte del gruppo di aule selezionate dal Comune di Firenze per ospitare alunni con difetti uditivi, il Tempo di Riverberazione misurato dopo l'esecuzione degli interventi di miglioramento acustico, risulta conforme ai limiti massimi della UNI 11532-2:2020.

Il grafico di figura 7 mostra il confronto tra i valori calcolati dello STI ante e post operam nelle diverse aule considerate nello studio. La linea tratteggiata indica il valore limite minimo di 0,55 secondi per aule di volume inferiore a 250 m³. Per le aule della scuola Montagnola, lo STI risulta ridotto dopo l'esecuzione degli interventi di miglioramento (post opera). Tale peggioramento è stato causato dal raddoppio del volume delle aule che, per esigenze di distanziamento da regole anti COVID-19, sono state unite a due a due. Per le stesse aule post operam ($V = 350 \text{ m}^3$) e per l'aula della scuola Salvemini ($V = 412 \text{ m}^3$, cfr Tabella 1), il limite dello STI è 0,50.

Per tutte le aule esaminate, eccetto che per l'aula della scuola secondaria superiore Salvemini, lo STI è risultato ampiamente entro i limiti della UNI 11532-2 dopo l'esecuzione degli interventi di miglioramento acustico.

In generale, gli interventi di correzione acustica eseguiti su un campione di 11 aule hanno consentito un notevole miglioramento dello STI rendendolo conforme ai limiti della UNI 11532 Solo in presenza di una marcata non conformità del tempo di riverberazione (scuola secondaria superiore Salvemini), anche lo STI risulta non conforme.

5. Ringraziamenti

Le misurazioni sono state eseguite nell'ambito di un progetto parzialmente finanziato dalla Fondazione Cassa di Risparmio di Firenze e dalla Direzione Servizi Tecnici del Comune di Firenze. Si ringraziano i tecnici comunali geom. Mirko Drago, geom. Francesco Burrini e geom. Moreno Martini per l'assistenza alle misurazioni e per la fornitura del materiale docu-

mentario necessario, il prof. Gianfranco Cellai e l'ing. Fabio Brocchi per la partecipazione ad alcune delle campagne di misurazione e l'Associazione IOPARLO per la collaborazione nella definizione degli obiettivi dello studio. 

6. Bibliografia

[1] Secchi S., Amodeo V., Misure comparate di Speech Transmission Index e Tempo di Riverbero in edifici scolastici ante e post interventi di miglioramento, in atti del 47° Convegno Nazionale della Associazione Italiana di Acustica, on-line, 24-28 maggio 2021.

[2] Decreto Ministeriale 11 ottobre 2017, Criteri ambientali minimi per l'affidamento di servizi di progettazione e lavori per la nuova costruzione, ristrutturazione e manutenzione di edifici pubblici, in GU Serie Generale n.259 del 06-11-2017

[3] UNI 11532-1:2018, Caratteristiche acustiche interne di ambienti confinati - Metodi di progettazione e tecniche di valutazione - Parte 1: Requisiti generali

[4] UNI 11532-2:2020, Caratteristiche acustiche interne di ambienti confinati - Metodi di progettazione e tecniche di valutazione - Parte 2: Settore scolastico.

** Simone Secchi,*

*Dipartimento di Architettura, Università di Firenze.
simone.secchi@unifi.it*

*Veronica Amodeo,
veronica.amodeo@unifi.it*