

## **ACUSTICA DELLE AULE E VOCE DELLE INSEGNANTI DI SCUOLA PRIMARIA: UNO STUDIO LONGITUDINALE**

## **CLASSROOM ACOUSTICS AND PRIMARY SCHOOL TEACHERS' VOICE: A LONGITUDINAL STUDY**

Giuseppina Emma Puglisi \*

Dipartimento Energia, Politecnico di Torino

\* Indirizzo dell'autore di riferimento - Corresponding author's address:  
corso Duca degli Abruzzi 24 - 10129, Torino, Italia  
e-mail: giuseppina.puglisi@polito.it

(Ricevuto il 28/02/2017, accettato il 11/06/2017)

### **RIASSUNTO**

In questo studio sono riportati gli esiti del monitoraggio della voce di 27 insegnanti elementari e della relazione tra i parametri acustici di voce e aula. A seguito della validazione metrologica di un nuovo analizzatore vocale, in termini di incertezza tipo ed errore massimo ammissibile, è stata avviata la campagna di monitoraggio della voce occupazionale. Lo sforzo vocale medio, è risultato pari a 71,2 dB. È stato osservato l'effetto Lombard ad un tasso di 0,53 dB/dB ed un tempo di riverberazione ottimale di 0,7 s in grado di minimizzare il livello di voce. Per la sicurezza occupazionale è necessario avviare strategie di controllo vocale in campo, accurate e prolungate nel tempo.

### **ABSTRACT**

In this study, the results of the voice monitoring of 27 teachers and the relationships between voice and classroom acoustics parameters are given. After metrologically validating a new vocal analyzer in terms of standard uncertainty and maximum admitted error, the occupational voice use monitoring campaign was started. The average vocal effort resulted to be of 71.2 dB. A Lombard effect was observed at a rate of 0.53 dB/dB and an optimal reverberation time of 0.7 s was found that minimizes the voice level. To guarantee occupational safety it is thus needed to start voice control strategies in field, that are accurate and prolonged in time.

Parole chiave: Monitoraggio vocale; Acustica delle aule scolastiche  
Keywords: Voice monitoring; Classroom acoustics

## 1. Introduzione

La voce viene utilizzata da un lavoratore su tre in tutto il mondo come strumento principale per lo svolgimento della propria professione [1]. L'uso non corretto della voce, specialmente quando sollecitata ripetutamente per lungo tempo e in condizione di ambienti competitivi per rumorosità e riverberazione, può causare l'insorgere di patologie all'apparato fonatorio di entità che vanno dalle più lievi (infiammazione, raucedine, afonia temporanea) alle più gravi (afonia permanente, polipi, noduli) [2]. In particolare, è stato evidenziato che la categoria professionale degli insegnanti di ogni ordine e grado sia la più soggetta ad evidenziare disturbi vocali [3]. Si stima che una percentuale compresa tra il 2% e 6% della forza lavoro dei paesi industrializzati sia costituita proprio da questa categoria professionale [4,5], dunque risulta evidente la necessità di identificare le possibili cause di insorgenza di disturbi vocali al fine di introdurre nuove strategie di prevenzione dello stress lavoro-correlato. La normativa italiana prevede la tutela della salute e della sicurezza sul posto di lavoro attraverso il decreto legislativo 81/2008 [6] ma il tema della sicurezza vocale per le categorie professionali a rischio non è affrontato adeguatamente per via della sua storia molto recente, legata principalmente a ricerche sperimentali che stanno mettendo in luce questa problematica solo negli ultimi anni. Per colmare le lacune ancora esistenti in questo ambito, è essenziale orientare l'attività di ricerca al monitoraggio del comportamento vocale degli insegnanti, nei loro quotidiani ambienti di lavoro e ripetutamente nelle diverse giornate lavorative, al fine di individuare le possibili cause ambientali e funzionali che generano l'affaticamento dell'uso della voce. Inoltre, risulta di estrema importanza il confronto tra l'uso occupazionale della voce a confronto con quello conversazionale, ossia il parlato di comfort in condizioni non lavorative, al fine di individuare le eventuali variazioni vocali durante le ore di insegnamento.

Diversi lavori scientifici hanno proposto l'utilizzo di valutazioni soggettive al fine di valutare la percezione dello stato di voce degli insegnanti [7, 8], anche se l'affidabilità di tali indagini è ancora fortemente dibattuta per via dei fattori personali di condizionamento [9]. Per queste ragioni, è stato implementato in maniera crescente l'uso di strumenti di misura in grado di monitorare oggettivamente l'utilizzo della voce, monitorando quindi l'attività delle corde vocali tramite sensori a contatto non invasivi e compatibili con attività lavorative ripetute e prolungate nel tempo [10-12].

Gaskill et al. [13] hanno coinvolto due insegnanti di scuola elementare nel monitoraggio longitudinale di due settimane lavorative, dunque 10 giorni in totale, facendo uso di un Ambulatory Phonation Monitor (APM). Nonostante non siano state misurate delle variazioni significative nei parametri vocali, durante il periodo di osservazione gli insegnanti hanno riferito di percepire una migliore condizione di salute vocale per via dell'uso dell'APM nella loro pratica lavorativa.

Facendo uso dell'analizzatore vocale validato a fini di ricerca presso il *National Center for Voice and Speech* (NCVS), Hunter e Titze [14] hanno monitorato l'uso della voce di 57 insegnanti continuativamente per due settimane, sia in condizione occupazionale (durante le ore di lavoro) sia in condizione conversazionale (durante le pause lavorative e i weekend). Hanno riscontrato un incremento di 2,5 dB della moda del livello di pressione sonora ( $SPL_{moda}$ ) durante le ore di insegnamento, così come un aumento della moda della frequenza fondamentale ( $F_{0,moda}$ ) di 10 Hz.

Oltre all'uso prolungato e sostenuto della voce, come evidenziato dai riferimenti sopra riportati, è stato messo in luce che anche i fattori ambientali ricorrenti come l'acustica dell'ambiente in cui si parla possono agire sulla produzione vocale. Un noto esempio di questo fenomeno è sicuramente quello conosciuto come "effetto

Lombard" [15], per cui si tende naturalmente ad aumentare il livello di voce all'aumentare del livello di rumore presente in ambiente. Anche la riverberazione è stata individuata come causa di variazione significativa dell'uso della voce, sia quando molto lunga e sia quando molto corta [16-18].

Bottalico e Astolfi [19] hanno utilizzato un APM per monitorare l'attività vocale di 40 insegnanti di scuola elementare afferenti ad istituti che presentavano caratteristiche acustiche molto differenti (tempo di riverberazione alle medie frequenze,  $T_{mf}$ , tra 0,4 e 1,6 s). Oltre ad aver riscontrato un aumento di 0,72 dB di livello di voce per ogni 1 dB di incremento di livello di rumore in ambiente, il risultato più interessante di questo lavoro è stato l'individuazione di un range ottimale di tempo di riverberazione compreso tra 0,75 e 0,85 s per la minimizzazione dello sforzo vocale.

Lo stesso incremento dello studio precedente in termini di effetto Lombard è stato misurato da Sato e Bradley [20] durante il monitoraggio della voce di 27 insegnanti utilizzando contemporaneamente quattro microfoni in aria posizionati in aula.

Brunskog e Pelegrín-García, con altri coautori, hanno approfondito in diversi studi [21, 22] l'importanza di altri parametri acustici oltre al rumore e alla riverberazione per il comfort della produzione della voce. Hanno formalizzato una forte correlazione tra il livello di potenza sonora della voce ( $L_W$ ) e il *Room Gain* ( $G_{RG}$ ), che è una misura del guadagno apportato dalle riflessioni in ambiente alle orecchie del parlatore. In particolare, hanno riscontrato che all'aumento di 1 dB del  $G_{RG}$  il  $L_W$  diminuisce di 3,6 dB, perciò risulta desiderabile controllare anche questi nuovi parametri acustici dell'ambiente in fase di progettazione così da migliorare le condizioni di lavoro per le categorie a rischio. Una forte correlazione con il  $G_{RG}$  è stata trovata con un altro parametro sperimentale, il *Voice Support* ( $S_{TV}$ ), che è una misura dell'intensità delle prime riflessioni rispetto al suono diretto che arriva all'orecchio del parlatore. Lyberg-Åhlander et al. [23] hanno evidenziato che un campione di 14 insegnanti con problemi di voce ha ridotto il proprio livello di voce al crescere del  $S_{TV}$ , dunque in condizioni acustiche migliori, mostrando quindi una maggiore consapevolezza dell'ambiente acustico rispetto al campione di controllo di 14 insegnanti con voce sana.

In ultimo, in uno studio del 2014, Pelegrín-García et al. [24] hanno individuato in un  $T_{mf}$  di 0,6 s il valore ottimale per lo svolgimento di attività didattica, poiché aumenta il comfort vocale per l'insegnante.

L'evidenza scientifica riportata finora mette in luce delle lacune in due principali ambiti. Primo, il numero di studi longitudinali sperimentali svolti con strumenti accurati sulla voce occupazionale degli insegnanti, anche rispetto a condizioni di utilizzo conversazionale, è molto esiguo. Secondo, è necessario svolgere più monitoraggi in campo al fine di delineare con più accuratezza quale sia il rapporto tra l'uso occupazionale della voce e i parametri acustici dell'ambiente, poiché le conclusioni disponibili allo stato attuale dell'arte non sono sufficienti a spiegare il fenomeno complesso dell'adattamento vocale all'ambiente acustico. Questo lavoro è quindi un contributo alla ricerca sulla sicurezza occupazionale degli insegnanti che tenta di rispondere a quattro principali questioni:

- 1) caratterizzare metrologicamente un nuovo dispositivo *low-cost* per il monitoraggio non invasivo della voce;
- 2) individuare eventuali variazioni significative nell'uso della voce da parte degli insegnanti durante un periodo di osservazione di una settimana, al fine di pianificare correttamente dei monitoraggi longitudinali ed introdurli come pratica preventiva;
- 3) individuare eventuali variazioni significative nell'uso della voce occupazionale rispetto a quella conversazionale;

- 4) individuare le condizioni acustiche favorevoli per la produzione della voce nelle aule scolastiche, così da fornire indicazioni progettuali ottimali per il comfort dell'insegnante e la sua sicurezza sul luogo di lavoro.

## 2. Metodologia

### 2.1 Casi studio: soggetti e scuole

Lo studio ha coinvolto 27 insegnanti di scuola elementare di sesso femminile (età media 48 anni) afferenti a quattro istituti differenti, situati nelle province di Torino e Bolzano. Tutte le insegnanti hanno partecipato volontariamente a questa campagna di monitoraggio, i cui scopi sono stati loro descritti in occasione di incontri informativi *ad hoc*. Nessuna di loro ha riferito di essere affetta da disturbi vocali né uditivi gravi.

Come riportato in Bottalico e Astolfi [19], l'esperienza lavorativa delle insegnanti è stata suddivisa in classi al fine di poter correlare successivamente questo dato con i parametri vocali. Le classi di esperienza individuate sono state: classe 1 ( $\leq 6$  anni), classe 2 (da 7 a 12 anni), classe 3 (da 13 a 18 anni), classe 4 (da 19 a 21 anni), classe 5 ( $\geq 21$  anni). Un altro fattore successivamente correlato con i parametri vocali è stato la categoria di materia insegnata, ossia umanistica (U), scientifica (S) o mista (M).

Le scuole di afferenza delle insegnanti coinvolte sono state selezionate per differenza in termini di epoca di costruzione, localizzazione nel tessuto urbano e caratteristiche architettoniche, dunque per condizioni acustiche. La scuola A è stata costruita nel tardo XIX secolo ed è situata in un'area residenziale, vicina al centro storico di Torino, dove il traffico veicolare è presente ma non particolarmente sostenuto. Le aule di questa scuola non presentano trattamenti acustici a parete o a soffitto, sono voltate e hanno altezza e volume medi rispettivamente pari a 4,9 m e 244 m<sup>3</sup>. Le scuole B e C sono situate in una cittadina in provincia di Torino, in aree lontane dalle arterie di traffico veicolare sostenuto e sono state costruite entrambe nella seconda metà del XX secolo. Anche in questo caso le aule non presentano trattamenti acustici a parete o soffitto, ma i volumi sono molto ridotti rispetto al caso precedente. Si tratta infatti di aule di altezza e volumi medi rispettivamente pari a 3,5 m e 160 m<sup>3</sup> (scuola B) e pari a 3,5 m e 142 m<sup>3</sup> (scuola C). L'epoca di costruzione della scuola D, sita a Bolzano in un'area ad uso misto commerciale e residenziale, non prospiciente vie di traffico sostenuto, risale alla seconda metà del XX secolo. L'altezza e il volume medi delle aule di questa scuola sono rispettivamente 3,5 m e 144 m<sup>3</sup>. In alcune delle aule considerate è presente un controsoffitto acustico in pannelli fonoassorbenti, mentre in un'aula è stato sperimentato un rivestimento a soffitto in pannelli di poliestere espanso, facilmente rimovibile per ragioni di pulizia.

### 2.2 Parametri acustici delle aule scolastiche

Prima di avviare la campagna di monitoraggio della voce delle insegnanti, sono state svolte le misurazioni di caratterizzazione acustica delle aule interessate, in assenza delle insegnanti e degli alunni. La condizione di occupazione delle aule è stata ottenuta facendo uso di pannelli in fibra 100% poliestere adeguatamente dimensionati secondo le indicazioni di Astolfi et al. [25], al fine di avere le medesime proprietà di fonoassorbimento date da un singolo alunno seduto (che corrisponde ad un assorbimento equivalente di circa 0,35 m<sup>2</sup>).

I parametri e le procedure di misurazione degli stessi sono indicati di seguito:

- 1) Tempo di riverberazione,  $T30_{0,25-2kHz}$  (s). La misurazione è stata effettuata con il metodo della risposta all'impulso in accordo con la norma BS EN ISO 3382-2 [26].

- 2) Nelle scuole sono state utilizzate alternativamente due tipologie di sorgenti, quali un clappatore che genera segnali impulsivi e una testa artificiale Bruel&Kjær 4128 per la generazione di un segnale *sweep*. Sono sempre state considerate due posizioni di sorgente e tre di ricevitore, poi mediate al fine di ottenere un unico indicatore spaziale del parametro misurato. In accordo con la norma tedesca DIN 18041:2004 [27] è stata infine applicata una media in frequenza tra 0,25 e 2 kHz;
- 3) *Voice Support*,  $ST_{V,0,5-2kHz}$  (dB), *Room Gain*,  $G_{RG,0,5-2kHz}$  (dB), *Decay Time at the Ears*,  $DT_{40,ME,0,5-2kHz}$  (s). Il metodo di misura di questi parametri è basato sulla risposta all'impulso che si ottiene tra la bocca e le orecchie di una testa artificiale (Bruel&Kjær 4128) posizionata a 1,5 m di altezza dal pavimento, ad una distanza minima da tutte le superfici circostanti di 1 m. Il  $ST_{V,0,5-2kHz}$  valuta la differenza tra il livello del suono riflesso e il livello del suono diretto, mentre il  $G_{RG,0,5-2kHz}$  valuta la differenza tra il livello dell'energia sonora totale e il livello del suono diretto. Il  $DT_{40,ME,0,5-2kHz}$  è definito come il tempo necessario affinché l'energia che arriva all'orecchio del parlatore decada di 60 dB dopo l'arrivo del suono diretto, calcolato a partire dal decadimento iniziale di 40 dB e assumendo un decadimento di tipo lineare. In accordo con le procedure indicate in Pelegrín-García et al. [21, 22, 24, 28, 29] è stata applicata una media in frequenza per tutti i parametri tra 0,5 e 2 kHz;
- 4) Livello di rumore di fondo,  $L_{A90}$  (dB). Il livello di rumore di fondo in ambiente è stato valutato come livello statistico ponderato A che è stato superato per il 90% del tempo di misurazione. L'acquisizione è stata eseguita tramite l'utilizzo di un fonometro calibrato in classe 1 (alternativamente un XL2 della NTi Audio oppure un Bruel&Kjær 2222) posizionato ad 1,2 m dal pavimento e in posizione prossima alla cattedra ma comunque ad almeno 1 m di distanza da ogni superficie circostante. I segnali di rumore acquisiti sono poi stati processati attraverso un codice MATLAB compilato *ad hoc*.

## 2.3 Monitoraggio della voce

### 2.3.1 Caratterizzazione metrologica di un nuovo analizzatore vocale

Le caratteristiche degli analizzatori vocali disponibili sul mercato spesso non soddisfano le esigenze degli utilizzatori ultimi, come ad esempio gli insegnanti. Tra queste si può indicare che le principali criticità siano relative alla possibilità di fruizione per periodi di tempo prolungati e ripetuti, all'ampiezza di banda per la corretta acquisizione dell'intero segnale vocale, alla riferibilità dei parametri stimati al fine di ottenere indicazioni affidabili sullo stato di voce, all'accessibilità in termini economici del dispositivo stesso. Carullo et al. [30] hanno sviluppato presso il Politecnico di Torino una nuova architettura per un dispositivo di acquisizione ed analisi del segnale vocale con caratteristiche metrologiche avanzate e dal costo contenuto: un Holter vocale basato sulla tecnologia Voice Care (VC). Al fine di rendere il dispositivo utilizzabile nella campagna di monitoraggio delle insegnanti è stata svolta la validazione della procedura di taratura del VC e la stima dei principali contributi di incertezza sui parametri vocali.

Il dispositivo fornisce una stima dei parametri vocali del livello di pressione sonora a 16 cm dalla bocca del parlatore (SPL, dB), della frequenza fondamentale ( $F_0$ , Hz) e del tempo percentuale di fonazione ( $D_{t\%}$ , %). Il segnale vocale acquisito è poi suddiviso in frammenti da 30 ms, che corrispondono alla pausa inter-sillabica, e analizzato in termini di distribuzione di occorrenze dei diversi parametri. Prima di avviare la fase di monitoraggio della voce è sempre essenziale eseguire la taratura personale dello strumento, che è di cruciale importanza per l'acquisizione dei dati e dunque per la loro

analisi. Poiché durante il monitoraggio ogni soggetto è predisposto solo di microfono a contatto e di *data-logger*, il parametro del SPL viene stimato a partire dal segnale di tensione acquisito con il sensore a contatto ( $v_{sk}$ ) e poi messo in relazione con un valore noto di SPL misurato proprio in fase di taratura, secondo l'equazione (1), al fine di identificare una curva di *fitting* tra i dati sperimentali acquisiti e il modello previsionale logaritmico.

$$(1) \quad SPL = a + b \cdot \log_{10}(v_{sk}) \quad [\text{dB}]$$

dove:

- $a$  e  $b$  sono i coefficienti sperimentali della regressione logaritmica;
- $v_{sk}$  è il segnale di tensione acquisito dal sensore a contatto [V].

Durante la taratura il VC viene collegato ad un microfono di riferimento opportunamente tarato e distanziato dalla bocca del soggetto di 16 cm. In corrispondenza di questo microfono viene prodotta la vocalizzazione della lettera /a/, per un periodo di tempo di 60 s, a diverse intensità al fine di ricoprire l'intero *range* di intensità tipiche del parlato (da molto basse – sussurro – a elevate – urlo).

Per valutare sperimentalmente i contributi di incertezza relativi alla fase di taratura, allo strumento e alle caratteristiche di ripetibilità e riproducibilità, sono state svolte prove *ad hoc* in un ambiente con livello di rumore di fondo (livello equivalente ponderato A,  $L_{Aeq}$ ) inferiore a 35 dB facendo ripetere più volte la procedura di taratura ad intervalli di tempo successivi. L'incertezza tipo sulla stima del SPL [ $u(\text{SPL})$ ] è stata dunque valutata applicando la procedura riportata nella Guida all'Espressione dell'Incertezza di Misura (GUM) [31], ossia secondo l'equazione (2):

$$(2) \quad u(\text{SPL}) = \sqrt{u^2(\text{SPL}_{ref}) + u^2(\text{SPL}_{fit}) + u^2(\text{SPL}_{rep})} \quad [\text{dB}]$$

dove:

- $u^2(\text{SPL}_{ref})$  è l'incertezza tipo relativa all'acquisizione di ogni frammento di segnale da parte dello strumento stesso in corrispondenza del microfono in aria e di quello a contatto (durante la fase di taratura) [dB];
- $u^2(\text{SPL}_{fit})$  è l'incertezza tipo relativa al *fitting* della curva di taratura [dB];
- $u^2(\text{SPL}_{rep})$  è l'incertezza tipo relativa alla ripetibilità della curva di taratura valutata sperimentalmente [dB].

L'accuratezza della stima dei parametri di  $F_0$  e  $D_{1\%}$  è stata valutata in termini di errore massimo ammissibile. Sono state quindi svolte delle prove in laboratorio facendo uso di una tavola vibrante (LDS V455 PA 1000L), su cui è stato posto il sensore a contatto, opportunamente sollecitata per mezzo di segnali noti inputati da un generatore di segnali arbitrario (TEKTRONIX AFG-3252).

### 2.3.2 Monitoraggio dell'attività vocale delle insegnanti

L'attività vocale delle insegnanti è stata monitorata attraverso l'uso di due strumenti di misura: l'Ambulatory Phonation Monitor (APM modello 3200 di KayPentax) e il Voice Care (VC). Il primo, è uno strumento commerciale mentre il secondo è un dispositivo *low-cost* recentemente sviluppato al Politecnico di Torino la cui procedura di caratterizzazione metrologica è stata introdotta nel paragrafo precedente (Sezione 2.3.1). Entrambi sono basati su un *data-logger* cui è collegato un sensore a contatto

da posizionare alla fossetta del giugolo del parlatore, al fine di misurare la tensione generata dal movimento delle corde vocali durante il periodo di fonazione. L'APM fa uso di un accelerometro BU7135 (di Knowles Corp., Itasca – IL), mentre il VC di un microfono a elettretto condensatore (ECM) AE38 (di Alan Electronics GmbH, Dreieich – D). A seguito dell'esecuzione della taratura personale dello strumento, che è analoga per APM e VC ed è stata descritta alla Sezione 2.3.1, entrambi i dispositivi forniscono una stima dei parametri vocali del livello di pressione sonora ad una distanza nota dalla bocca del parlatore (SPL, dB), della frequenza fondamentale ( $F_0$ , Hz) e del tempo percentuale di fonazione ( $D_{t\%}$ , %). Per ottenere una stima accurata dei parametri vocali è essenziale svolgere la taratura in un ambiente che abbia caratteristiche acustiche di riverberazione confrontabili con quelle dell'ambiente in cui si svolgerà successivamente il monitoraggio, e che il livello di rumore sia contenuto per garantire un rapporto segnale rumore anche ai livelli di voce più bassi di almeno 10 dB [32]. Alla luce di questi requisiti, la taratura degli analizzatori vocali è stata svolta in tutte le scuole in aule in cui il rumore di fondo  $L_{Aeq}$  non ha mai superato i 40 dB.

In fase di elaborazione, il segnale vocale acquisito con i sensori viene suddiviso in frammenti da 50 e 30 ms rispettivamente per APM e VC, ma poiché entrambi gli strumenti sono soggetti ad una procedura di taratura in laboratorio per la riferibilità dei parametri precedente all'utilizzo in campo, è possibile confrontare reciprocamente i risultati ottenuti e dunque raccogliere tutti i parametri vocali in un unico *database*. Inoltre, poiché la distanza della bocca del parlatore dal microfono di riferimento in fase di taratura era di 16 cm per il VC e di 15 cm per l'APM, per quest'ultimo dispositivo è stata applicata una correzione alle stime di SPL in fase di elaborazione in accordo con la legge di propagazione del suono in campo libero in modo da poter confrontare con elevata accuratezza i dati acquisiti.

Il monitoraggio dell'attività vocale delle insegnanti durante le ore di insegnamento, definito come "monitoraggio-lezione" (ML), è durato mediamente 4 ore. Prima di poter avviare il ML è stata sempre svolta una fase di colloquio, definita "pre-monitoraggio" (PM), al fine di acquisire un campione di parlato normale ad un livello di comfort definito come conversazionale. Il PM, svolto ogni giorno prima del ML, è consistito in un monologo dell'insegnante della durata di 5 minuti riguardo un tema a lei noto, come ad esempio una ricetta, la descrizione del percorso da casa a scuola, il racconto dell'attività didattica che svolgerà successivamente con gli alunni.

### 2.3.3 Parametri vocali delle insegnanti

Come anticipato alla sezione 2.3.2, i parametri stimati con i due analizzatori vocali sono SPL,  $F_0$  e  $D_{t\%}$ . Per quanto riguarda SPL e  $F_0$  i risultati sono presentati in forma di istogrammi di distribuzione di occorrenze a partire dai quali possono essere estratte le statistiche di media, moda e deviazione standard a 16 cm per il SPL (rispettivamente  $SPL_{med,16cm}$ ,  $SPL_{moda,16cm}$ ,  $SPL_{dev.st.,16cm}$ ) e per la  $F_0$  (rispettivamente  $F_{0,med}$ ,  $F_{0,moda}$ ,  $F_{0,dev.st.}$ ). Per il SPL è anche calcolato il suo valore equivalente a 16 cm ( $SPL_{eq,16cm}$ ) secondo l'equazione (3) proposta da Švec et al. [11].

$$(3) \quad SPL_{eq} = 10 \log_{10} \left\{ \frac{1}{N} \sum_{n=1}^N [k_v(n) \cdot 10^{SPL(n)/10}] \right\} \quad [dB]$$

dove:

- $N$  è il numero totale di frammenti di segnale analizzati in un dato intervallo;
- $n$  è il numero del frammento di segnale specifico analizzato in un dato intervallo;

- $SPL_n$  è il valore di SPL calcolato in un dato frammento di segnale  $n$  [dB];
- $k_v$  è un fattore di *voicing* impostato al valore 0 e 1 nel caso di frammenti di segnale di silenzio o di voce, rispettivamente.

## 2.4 Analisi statistica dei dati

Per quanto riguarda la caratterizzazione metrologica dell'analizzatore vocale portatile VC si è fatto riferimento alle indicazioni sulla valutazione dell'incertezza di misura stabilite nella GUM [31].

I dati acquisiti durante i monitoraggi della voce sono stati analizzati statisticamente attraverso il software SPSS (versione 22; SPSS Inc., New York – NY), verificando sempre un intervallo di fiducia pari al 95%. Prima di tutto è stata eseguita la verifica riguardo la distribuzione normale dei dati di voce e di caratterizzazione acustica delle aule applicando il test di Shapiro-Wilk. Successivamente sono state applicate diverse metodologie in base ai dati disponibili e alle rispettive domande di ricerca:

- 1) l'analisi della correlazione è stata utilizzata per valutare l'esistenza di una mutua relazione tra i parametri acustici delle aule e quelli vocali delle insegnanti nel caso di ML e PM, separatamente;
- 2) l'analisi della regressione è stata implementata per individuare l'eventuale dipendenza reciproca tra i parametri acustici delle aule, e tra essi e quelli della voce delle insegnanti. Al fine di eseguire quest'analisi sulla base di dati robusti e non dispersi, è stato applicato un raggruppamento in funzione di classi di riverberazione, ossia in funzione del tempo di riverberazione misurato e della sua *Just Noticeable Difference* (JND 5% in accordo con la BS EN ISO 3382-2:2008 [26]);
- 3) l'analisi della varianza (ANOVA) è stata infine applicata per valutare l'effetto di fattori fissi, quali il giorno del monitoraggio, la scuola, la classe, gli anni di esperienza lavorativa e la materia insegnata, sui parametri vocali delle insegnanti. Al completamento di questa analisi è stato anche applicato il test *post-hoc* di Sheffé [33] per individuare quale specifico fattore influenzasse il parametro vocale (ad esempio, se l'ANOVA indica un effetto del giorno di monitoraggio sul SPL il test di Sheffé chiarisce in quale specifico giorno si verifichi la variazione significativa di SPL).

## 3. Risultati

### 3.1 Parametri acustici delle aule scolastiche

La tabella 1 riporta i dati medi misurati nelle diverse scuole per i parametri acustici delle aule. Inoltre sono fornite delle informazioni descrittive riguardo il numero di aule considerate, il numero complessivo di insegnanti monitorate e le loro età medie.

Dai dati riportati si evince che il  $T_{30,0,25-2kHz}$  sia mediamente adeguato alle indicazioni da norma DIN 18041:2004 [27] solo nel caso della scuola D, ossia nell'istituto le cui aule presentano per la maggior parte un trattamento acustico a soffitto. Una ragione della eccessiva riverberazione presente nelle aule scolastiche italiane prese a campione può essere legata al fatto che siano tipicamente allocate in edifici storici con volumetrie molto ampie, talvolta soffitti voltati e assenza di trattamenti acustici specifici.

Al contrario del  $T_{30,0,25-2kHz}$ , i parametri sperimentali di  $ST_{V,0,5-2kHz}$ ,  $G_{RG,0,5-2kHz}$  e  $DT_{40,ME,0,5-2kHz}$  risultano conformi alle indicazioni da letteratura mediamente in quasi tutte le aule e scuole [28, 29]. Questo risultato è coerente per due principali ragioni. In primo luogo, una maggiore riverberazione permette un maggior supporto della voce del parlatore, essendo i parametri tra loro positivamente e significativamente correlati. In



secondo luogo, Pelegrín-García et al. [24] hanno formalizzato una forte relazione tra  $T_{30,0,25-2\text{kHz}}$ ,  $ST_{V,0,5-2\text{kHz}}$  e il volume dell'ambiente in cui questi parametri sono misurati, indicando che nel caso di aule scolastiche di dimensioni medie ( $100 \text{ m}^3 < \text{volume} < 250 \text{ m}^3$ ) con  $T_{30,0,25-2\text{kHz}}$  differenti, il  $ST_{V,0,5-2\text{kHz}}$  può essere molto simile. Per esemplificare questa relazione, ad un'aula di circa  $250 \text{ m}^3$  con  $T_{30,0,25-2\text{kHz}}$  di 1,3 s corrisponde lo stesso  $ST_{V,0,5-2\text{kHz}}$  di un'aula con volume  $160 \text{ m}^3$  e  $T_{30,0,25-2\text{kHz}}$  di 0,8 s, ossia -10 dB.

Tab. 1 - Dati medi misurati dei parametri acustici delle aule e informazioni descrittive del campione (in grassetto se ottimali). Tra parentesi è indicata la deviazione standard, se disponibile (oppure: ND) - Classroom acoustics parameters, averaged across schools, and descriptive data about the selected sample (in bold if optimal). The standard deviation is given in brackets when available (otherwise: ND)

	<i>Scuola A</i>	<i>Scuola B</i>	<i>Scuola C</i>	<i>Scuola D</i>	<i>Range ottimale</i>
Numero di aule	2	6	4	5	-
Numero di insegnanti	3	7	6	11	-
Età media delle insegnanti	52,0 (7,0)	49,6 (6,0)	48,7 (12,3)	41,6 (5,9)	-
Tempo di riverberazione - $T_{30,0,25-2\text{kHz}}$ [s]	1,3 (0,07)	0,7 (0,12)	0,9 (0,09)	<b>0,5</b> (0,13)	0,5-0,6
Voice Support- $ST_{V,0,5-2\text{kHz}}$ [dB]	<b>-9,8</b> (0,23)	<b>-9,8</b> (0,46)	-8,4 (0,27)	<b>-11,5</b> (1,46)	da -14 a -9
Room Gain- $G_{RG,0,5-2\text{kHz}}$ [dB]	<b>0,5</b> (0,03)	<b>0,4</b> (0,05)	0,6 (0,04)	<b>0,3</b> (0,09)	0,2-0,5
Decay Time at the Ears- $DT_{40,ME,0,5-2\text{kHz}}$ [s]	<b>0,9</b> (0,03)	<b>0,5</b> (0,08)	<b>0,7</b> (0,05)	<b>0,4</b> (ND)	0,4-1,2
Rumore di fondo - $L_{A90}$ [dB]	65,4 (5,2)	53,2 (4,7)	59,4 (5,6)	52,3 (6,7)	$\leq 40$

L'analisi di correlazione tra i parametri acustici delle aule ha riportato, come atteso, una correlazione statisticamente significativa e positiva del  $T_{30,0,25-2\text{kHz}}$  con il volume dell'aula, il  $ST_{V,0,5-2\text{kHz}}$ , il  $G_{RG,0,5-2\text{kHz}}$  e il  $DT_{40,ME,0,5-2\text{kHz}}$ , oltre che con il  $L_{A90}$ . Tra il  $ST_{V,0,5-2\text{kHz}}$  e il  $G_{RG,0,5-2\text{kHz}}$  è stata poi confermata una correlazione significativa come da dati di letteratura [28, 29]. Il  $L_{A90}$  è risultato infine significativamente e positivamente correlato anche con il volume dell'aula.

I dati di  $ST_{V,0,5-2\text{kHz}}$  e  $DT_{40,ME,0,5-2\text{kHz}}$  sono stati studiati, inoltre, applicando ai dati misurati in questo studio i due modelli previsionali proposti da Pelegrín-García et al. [28, 29]. Il risultato di questo confronto indica una variazione di 1,4 dB/dB ( $R^2 = 0,85$ ) e di 1,3 s/s ( $R^2 = 0,97$ ) rispettivamente per  $ST_{V,0,5-2\text{kHz}}$  e  $DT_{40,ME,0,5-2\text{kHz}}$ .

Gli esiti del monitoraggio del livello di rumore nelle aule, indicano un livello medio complessivo di  $L_{A90}$  di 55,8 dB (dev.st. 8,7 dB). Il riferimento più comune per la valutazione del rumore ambientale in aule scolastiche è il Building Bulletin (BB93, [34]), che però riporta esclusivamente valori riferiti alla condizione di aula non occupata, ossia di collaudo, indicando un limite superiore di 40 dBA. Non potendo confrontare direttamente i livelli misurati nella campagna di monitoraggio, che sono stati acquisiti in condizione di aula occupata, con il riferimento al BB93, si è scelto di applicare una correzione ai livelli misurati in base a dati sperimentali proposti da Shield e Dockrell [35] in un caso studio analogo di aule di scuola elementare. In questo studio sono stati misurati i livelli di rumore  $L_{A90}$  in condizione occupata e non occupata, rispettivamente quantificati in 54,1 dB e 47,0 dB. La differenza tra i due è risultata

dunque di 7,1 dB, pertanto applicando la medesima correzione ai dati acquisiti nella campagna di misura in discussione, si ottiene un  $L_{A90}$  in condizione di aula non occupata equivalente a 48,7 dB. Questo dato, che può essere quindi confrontato con limite indicato nel BB93, supera il valore massimo ammissibile. La ragione di questo risultato può essere data dalla dipendenza lineare del livello di rumore dal tempo di riverberazione con un tasso di variazione di 12,9 dB/s, che è risultato statisticamente significativo ( $p\text{-value} < 0,05$ ) attraverso un'analisi di regressione lineare.

### 3.2 Caratterizzazione metrologica di un nuovo analizzatore vocale

Applicando i criteri indicati nella GUM [31] riguardo la valutazione dell'incertezza di misura [Eq. (2)], è stato possibile individuare una incertezza tipo massima sulla stima del parametro di SPL pari a 3,9 dB. La verifica dell'accuratezza della stima dei parametri di  $F_0$  e il  $D_{t\%}$ , invece, è stata eseguita in termini di errori massimi ammissibili ed è risultata rispettivamente pari a  $\pm 1$  Hz e 5%.

### 3.3 Monitoraggio dell'attività vocale delle insegnanti

Il monitoraggio della voce ha avuto una durata equivalente ad una settimana lavorativa per tutte le insegnanti, anche se alcuni monitoraggi non sono stati tenuti in considerazione in fase di analisi a causa di errori di acquisizione o di inaccuratezza della procedura di taratura personale dell'analizzatore vocale. A seguito di questi adeguamenti è stato quindi considerato un totale di 61 monitoraggi vocali per 2,3 giorni di osservazione media per ciascuna insegnante.

Mediamente, il livello di sforzo vocale delle insegnanti, ossia di livello di pressione sonora equivalente calcolato ad 1 m di distanza dalla bocca del parlatore ( $L_{eq,1m}$ ), è risultato di 71,2 dB. Questo valore può essere classificato come sforzo vocale tra "eavalto" e "forte", in accordo con la norma ANSI S3.5-1997 [36]. Il tempo percentuale di fonazione  $D_{t\%}$ , che è stato valutato come misura legata al carico vocale delle insegnanti nel caso di ML, è risultato mediamente pari al 29% confermando dati già presenti in letteratura che riportano un  $D_{t\%}$  occupazionale mediamente pari al 30% [14].

#### 3.3.1 Confronto tra uso occupazionale e conversazionale della voce

Applicando la ANOVA è stato riscontrato che la variabile del "grado della classe di insegnamento" non ha avuto un'influenza statisticamente significativa sui parametri vocali di ML e PM, mentre l'ha avuta la "materia di insegnamento" sulla variazione del  $SPL_{moda,16cm}$  e della  $F_{0,med}$  rispettivamente nel caso di ML e PM. In particolare, questo effetto significativo è stato evidenziato in funzione dell'insegnamento di una materia umanistica, che richiede quindi un carico vocale maggiore delle materie scientifiche, essendo principalmente caratterizzata da spiegazioni verbali prolungate e ripetute nel tempo. Inoltre, nel caso del ML si è individuato un effetto significativo degli "anni di esperienza lavorativa" sull'incremento del  $D_{t\%}$ , evidenziando nuovamente una possibile causa di maggiore carico vocale.

Le statistiche di media e moda del SPL della voce delle insegnanti a 16 cm dalla loro bocca nel caso di ML sono risultate significativamente maggiori di quelle misurate nel caso del PM, rispettivamente di 5,5 e 6,5 dB. Le stesse statistiche per la  $F_0$  nel ML sono inoltre risultate maggiori rispetto al PM di 50 e 55 Hz, rispettivamente. Queste variazioni confermano i risultati riportati in uno studio di Hunter e Titze [14] in cui si riferisce un aumento di 2,5 dB e 10 Hz per la moda di SPL e  $F_0$ , rispettivamente, nel caso di voce occupazionale a differenza di quella conversazionale.

### 3.3.2 Parametri vocali durante una settimana di osservazione

Per capire quale sia la variazione dei parametri vocali delle insegnanti durante un'osservazione longitudinale di una settimana, i dati acquisiti sono stati raggruppati per giorni di monitoraggio. Al fine di escludere un effetto significativo sulle variazioni dovuto all'acustica delle aule, sono stati raggruppati per giorni di osservazione anche i parametri di caratterizzazione acustica. L'ANOVA, applicata a questi dati, ha confermato l'ipotesi di partenza, per cui i parametri acustici delle aule nei diversi giorni di osservazione sono risultati mediamente uguali (anche a meno della deviazione standard) e si è potuto procedere nell'indagine delle variazioni dei parametri vocali esclusivamente legate all'uso della voce ripetuto nel tempo.

Anche se non è risultato statisticamente significativo, nel caso del ML si è riscontrato un progressivo abbassamento delle statistiche relative a SPL e  $F_0$  nel periodo di osservazione. Una possibile causa della mancanza di significatività nella variazione nell'arco della settimana di ML può essere legata alla grande variabilità intrinseca del parlato che dipende, ad esempio, dalla materia insegnata e dal materiale vocale stesso [37]. Nel caso del PM, invece, è stato misurato un decremento statisticamente significativo di 6,5 dB del  $SPL_{moda,16cm}$  tra il lunedì e il giovedì. Questa variazione può essere spiegata dalla necessità delle insegnanti di ridurre il proprio sforzo vocale nel caso di parlato conversazionale, ossia a riposo, per via di un sovraccarico di voce durante le ore lavorative per potere altresì mantenere un livello costante nelle diverse giornate al fine di garantire l'intelligibilità in corrispondenza degli alunni, anche di quelli seduti nelle ultime file della classe. A conferma dell'ipotesi avanzata, questo comportamento vocale è stato riscontrato in uno studio sulla variazione dei parametri vocali al variare della distanza tra parlatore e ascoltatore [38], per cui al raddoppiare di tale distanza il livello di voce del parlatore aumenta tra 1,3 e 2,2 dB in condizioni di  $T30_{0,25-2kHz}$  di 5,38 e 0,04 s, rispettivamente.

I risultati ottenuti in questo studio longitudinale, inoltre, sono confrontabili con quelli ottenuti da Gaskill et al. [13], che hanno monitorato l'attività vocale occupazionale di due insegnanti per due settimane senza individuare variazioni significative di SPL.

### 3.4 Influenza dell'acustica dell'aula scolastica sull'uso occupazionale della voce

La regressione statistica applicata ai dati di voce in relazione a quelli di caratterizzazione acustica delle aule ha permesso di identificare una dipendenza quadratica, statisticamente significativa, tra  $SPL_{med,1m}$  e  $T30_{0,25-2kHz}$  che si esprime nella forma (4):

$$(4) \quad SPL_{med,1m} = 14,6 \cdot (T30_{0,25-2kHz})^2 - 20 \cdot (T30_{0,25-2kHz}) + 73,2 \quad [dB]$$

dove:

- $SPL_{med,1m}$  è il livello di pressione sonora medio della voce dell'insegnante, calcolato ad 1 m di distanza dalla bocca [dB];
- $T30_{0,25-2kHz}$  è il tempo di riverberazione, misurato in condizione occupata, dell'aula in cui l'insegnante ha svolto il monitoraggio vocale.

Questa dipendenza quadratica permette di individuare un minimo nella curva di regressione che corrisponde ad un valore di  $T30_{0,25-2kHz}$  di 0,7 s, che minimizza il livello di voce richiesto all'insegnante. Per valori di riverberazione inferiori, infatti, le ridotte

riflessioni in ambiente tendono a non supportare adeguatamente il parlato e portano a richiedere un incremento dello sforzo vocale.

D'altro canto, valori di riverberazione superiori a 0,7 s implicano un incremento del livello di voce richiesto perché le eccessive riflessioni portano ad un incremento del livello di rumore che, per effetto Lombard, implicano un naturale aumento del livello di voce. Il  $T_{30,0,25-2\text{kHz}}$  di 0,7 s identificato in questo studio per ridurre il livello di voce richiesto all'insegnante conferma il risultato ottenuto da Bottalico e Astolfi [19], che hanno misurato la medesima relazione quadratica tra  $SPL_{\text{med},1\text{m}}$  e  $T_{30,0,25-2\text{kHz}}$  ed individuato il minimo di tale curva in corrispondenza di una riverberazione di 0,8 s. Questo valore, o meglio un range di  $T_{30,0,25-2\text{kHz}}$  tra 0,7 e 0,8 s, conferma anche la condizione acustica ottimale identificata in letteratura per la massimizzazione dell'intelligibilità del parlato, come indicato da Yang e Bradley [39] che riportano a questo scopo un  $T_{30,0,25-2\text{kHz}}$  ottimale di 0,68 s.

La dipendenza lineare, anch'essa statisticamente significativa, tra  $SPL_{\text{med},1\text{m}}$  e  $L_{A90}$  è stata misurata in un incremento di 0,53 dB del livello di voce per ogni 1 dB di incremento del livello di rumore, a conferma quindi della presenza dell'effetto Lombard. Questo risultato conferma altri studi simili come quelli di Sato e Bradley [20], Bottalico e Astolfi [19], Durup et al. [40], che hanno rispettivamente misurato un effetto Lombard di 0,72 dB/dB, 0,72 dB/dB e 0,69 dB/dB.

## Conclusioni

L'obiettivo di questo lavoro è stata la valutazione delle variazioni dei parametri vocali di 27 insegnanti di scuola elementare, al fine di capire in che misura l'acustica delle aule scolastiche possa avere un'influenza sull'uso occupazionale della voce. Per poter svolgere un monitoraggio vocale longitudinale e di lunga durata nell'arco della giornata, è stata precedentemente eseguita la caratterizzazione metrologica di un nuovo analizzatore vocale, il Voice Care.

I principali risultati ottenuti sono riassunti di seguito, in funzione della domanda di ricerca cui contribuiscono a rispondere (vedi Sezione 1):

- 1) è stata valutata l'incertezza di misura legata alla stima dei parametri vocali di livello di pressione sonora, frequenza fondamentale e tempo percentuale di fonazione;
- 2) sulla base dei 61 monitoraggi vocali acquisiti dall'indagine occupazionale delle insegnanti, è stata osservata una tendenza a ridurre il livello e la frequenza fondamentale della voce tra il primo e l'ultimo giorno del monitoraggio (anche se non statisticamente significativa). Questa riduzione del livello di voce, invece, è risultata significativa nel caso di uso conversazionale, indicando dunque un progressivo incremento nell'affaticamento vocale con il passare del tempo di osservazione che si ripercuote sull'uso della voce in condizioni normali poiché, durante le ore lavorative, le insegnanti tendono comunque a mantenerlo costante nel periodo longitudinale al fine di incrementare l'intelligibilità in corrispondenza di tutti gli alunni della classe;
- 3) mettendo a confronto il monitoraggio occupazionale con quello conversazionale della voce, risulta che nel primo caso si abbia un incremento del livello e della frequenza fondamentale rispettivamente di 5,5 dB e 50 Hz;

le condizioni acustiche delle aule sono risultate significative nell'influenzare la produzione del livello di voce delle insegnanti per quanto riguarda in particolare il livello di rumore di fondo e il tempo di riverberazione. Rispettivamente, infatti, è stato osservato un aumento del livello di voce di 0,53 dB per ogni 1 dB di incremento del livello di rumore mentre è stato identificato un valore di

riverberazione pari a 0,7 s per la minimizzazione del livello di voce al fine di garantire dunque un comfort vocale ottimale per le insegnanti.

In conclusione, essendo risultato il livello di sforzo vocale, ossia il livello di pressione sonora equivalente calcolato ad 1 m di distanza dalla bocca del parlatore, per tutte le insegnanti mediamente pari a 71,2 dB, risulta necessario individuare delle strategie di controllo della produzione della voce che siano efficaci ai fini della sicurezza occupazionale. Il monitoraggio della voce deve essere pianificato efficacemente in periodi di tempo ripetuti e prolungati, ma dati i risultati osservati in questo lavoro si può ipotizzare una pianificazione ripetuta ma più estesa nell'arco di tempo piuttosto che ripetuta ma concentrata in una sola settimana, dunque campagne di monitoraggio future mireranno a ripetere le acquisizioni dei campioni di voce occupazionale in un periodo di tempo equivalente ad un anno scolastico al fine di individuare variazioni significative. In aggiunta, oltre alla necessità di utilizzare analizzatori vocali metrologicamente accurati, questo studio ha evidenziato l'importanza della corretta progettazione acustica delle aule al fine di minimizzare il livello di voce dell'insegnante e massimizzare l'intelligibilità del parlato in corrispondenza degli alunni.

## Conclusions

This work has investigated the variations in voice production for 27 female primary school teachers, in order to understand to which extent the acoustic characteristics of classrooms may have an influence on the occupational voice use. To perform a longitudinal voice monitoring that lasts for hours in a day, the metrological characterization of a new *low-cost* device, that is, the Voice Care, was previously performed.

The main outcomes of the study can be summarized as follows, with respect to the research question they give an answer (see Section 1):

- 1) the measurement uncertainty evaluation has been performed to understand the accuracy of the estimation of the voice parameters of sound pressure level, fundamental frequency and voicing time percentage;
- 2) based on the acquisition of 61 complete occupational voice monitorings, it has been observed a tendency of teachers to reduce their voice level and fundamental frequency from the first to the last day (although not statistically significant). Such a decrease, instead, was found to be significant in the case of conversational voice monitoring, which can be hypothesized to be related to a growing voice fatigue across the days that affects the teachers' voice production to be as constant as possible during the working hours to keep a high level of speech intelligibility towards all pupils in the classroom, even the furthest ones;
- 3) the comparison between the occupational and conversational voice use highlights that, in the first case, teachers keep a voice level and fundamental frequency higher by 5,5 dB and 50 Hz, respectively;
- 4) classroom acoustics have a significant effect on the teachers' voice production during the teaching hours. First, it was found that they increase their speech level by 0,53 dB per each 1 dB of increase in the background noise. Second, a value of reverberation time that corresponds to 0,7 s was found to minimize the speech level demand, thus it was found to maximize the optimal teachers' vocal comfort.

In conclusion, being the vocal effort of teachers, that is, the equivalent voice sound pressure level calculated at 1 m from the talker's mouth, of 71,2 dB on average across teachers, it is necessary to find effective strategies for voice production control in order to enhance occupational safety in the school environments. An effective voice monitoring to find out significant voice variations should be planned that is repeated and prolonged in time, however, due to the outcomes of the present study, it should be repeated in a longer period of time such as throughout an entire school year instead of repeated but concentrated in a short time period (one week). In such a framework, the use of metrologically accurate vocal analyzers is of primary importance. Furthermore, this study has proved the need of improving classroom acoustics to minimize the teachers' voicing demand and to maximize speech intelligibility towards pupils.

### **Bibliografia**

- [1] Vilkmán, E. (2000). Voice problems at work: A challenge for occupational safety and health arrangement. *Folia Phoniatr. Logop.*, 52, pp. 120-125.
- [2] Williams, N.R. (2003). Occupational groups at risk of voice disorders: A review of the literature. *Occupational Medicine*, 53, pp. 456-460.
- [3] Astolfi, A., Bottalico, P., Accornero, A., Garzaro, M., Nadalin, J., Giordano, C. (2012). Relationship between vocal doses and voice disorders on primary school teachers. In: Proceedings of 9<sup>th</sup> Conference on Noise Control - Euronoise, Prague, 10-13 June.
- [4] Fritzell, B. (1996). Voice disorders and occupations. *Log. Phon. Vocol.*, 21, pp. 7-12.
- [5] Titze, I.R., Lemke, J., Montequin, D. (1996). Populations in the U.S. workforce who rely on voice as a primary tool of trade: A preliminary report. *J. Voice*, 11(3), pp. 254-259.
- [6] Decreto Legislativo n. 819 aprile 2008. Testo unico sulla salute e sicurezza sul lavoro. *Gazzetta Ufficiale della Repubblica Italiana*, Serie generale n. 101, 30/04/2008.
- [7] Ilomaki, I., Leppanen, K., Kleemola, L., Tyrmi, J., Laukkanen, A., Vilkmán, E. (2009). Relationships between self-evaluations of voice and working conditions, background factors, and phoniatic findings in female teachers. *Logop. Phoniatr. Vocology*, 34(1), pp. 20-31.
- [8] Carding, P.N., Wilson J.A., MacKenzie, K., Deary, I.J. (2009). Measuring voice outcomes: State of the science review. *J. Laryng. Otol.*, 123(8), pp. 823-829.
- [9] Werth, K., Voigt, D., Döllinger, M., Eysholdt, U., Lohscheller, J. (2010). Clinical value of acoustic voice measures: A retrospective study. *European Archives of Oto-Rhino-Laryngology*, 267(8), pp. 1261-1271.
- [10] Cheyne, H.A., Hanson, H.M., Genereux, R.P., Stevens, K.N., Hillman, R.E. (2003). Development and testing of a portable vocal accumulator. *J. Speech Lang. Hear. Res.*, 46(6), pp. 1457-1467.
- [11] Švec, J.G., Titze, I. R., Popolo, P.S. (2005). Estimation of sound pressure levels of voiced speech from skin vibration of the neck. *J. Acoust. Soc. Am.*, 117(3), pp. 1386-1394.
- [12] Mehta, D.D., Zaňartu, M., Feng, S.W., Cheyne, H.A., Hillman, R.E. (2012). Mobile voice health monitoring using a wearable accelerometer sensor and a smartphone platform. *IEEE T. Biom. Eng.*, 59(11), pp. 3090-3096.

- [13] Gaskill, C.S., O'Brien, S.G., Tinter, S.R. (2012). The effect of voice amplification on occupational vocal dose in elementary school teachers. *J. Voice*, 26(5), pp. 667.e19-667.e27.
- [14] Hunter, E.J., Titze, I.R. (2010). Variations in intensity, fundamental frequency, and voicing for teachers in occupational versus nonoccupational settings. *J. Speech Lang. Hear. Res.*, 53, pp. 862-875.
- [15] Lane, H., Tranel, B. (1971). The Lombard sign and the role of hearing in speech. *J. Speech Hear. Res.*, 14(4), pp. 677-709.
- [16] Astolfi, A., Carullo, A., Pavese, L., Puglisi, G.E. (2015). Duration of voicing and silence periods of continuous speech in different acoustic environments. *J. Acoust. Soc. Am.*, 137(2), pp. 565-579.
- [17] Bottalico, P., Astolfi, A., Graetzer, S., Hunter, E.J. (2017). Silence and voicing accumulations in primary school teachers with and without voice disorders. *J. Voice*, 31(2), pp. 260.e11-260.e20.
- [18] Astolfi, A., Puglisi, G.E., Cantor Cutiva, L.C., Pavese, L., Carullo, A., Burdorf, A. (2015). Associations between objectively-measured acoustic parameters and occupational voice use among primary school teachers. *Energy Procedia*, 78, pp. 3422-3427.
- [19] Bottalico, P., Astolfi, A. (2012). Investigations into vocal doses and parameters pertaining to primary school teachers in classrooms. *J. Acoust. Soc. Am.*, 131(4), pp. 2817-2827.
- [20] Sato, H., Bradley, J.S. (2008). Evaluation of acoustical conditions for speech communication in working elementary school classrooms. *J. Acoust. Soc. Am.*, 123(4), pp. 2064-2077.
- [21] Brunskog, J., Gade, A.C., Bellester, G.P., Calbo, L.R. (2009). Increase in voice level and speaker comfort in lecture rooms. *J. Acoust. Soc. Am.*, 125(4), pp. 2072-2082.
- [22] Pelegrín-García, D. (2011). Comment on "Increase in voice level and speaker comfort in lecture rooms. *J. Acoust. Soc. Am.*, 129(3), pp. 1161-1164.
- [23] Lyberg-Åhlander, V., Rydell, R., Löfqvist, A., Pelegrín-García, D., Brunskog, J. (2015). Part Summary of the project "Speakers' Comfort": Teachers' voice use in teaching environments. *Building Acoustics*, 22(3+4), pp. 209-224.
- [24] Pelegrín-García, D., Brunskog, J., Rasmussen, B. (2014). Speaker-oriented classroom acoustics design guidelines in the context of current regulations in European countries. *Acta Acustica United with Acustica*, 100, pp. 1073-1089.
- [25] Astolfi, A., Corrado, V., Griginis, A. (2008). Comparison between measured and calculated parameters for the acoustical characterization of small classrooms. *Appl. Acoust.*, 69, pp. 966-976.
- [26] BS (2008). BS EN ISO 3382-2:2008. Acoustics - Measurement of Room Acoustic Parameters - Part 2: Reverberation Time in Ordinary Rooms.
- [27] DIN (2004). DIN 18041:2004. Hörsamkeit in kleinen bis mittelgroßen Räumen (Acoustical Quality in Small to Medium-Sized Rooms).
- [28] Pelegrín-García, D., Brunskog, J. (2012). Speakers' comfort and voice level variation in classrooms: Laboratory research. *J. Acoust. Soc. Am.*, 132(1), pp. 249-260.
- [29] Pelegrín-García, D., Brunskog, J., Lyberg-Åhlander, V., Löfqvist, A. (2012). Measurement and prediction of voice support and room gain in school classrooms. *J. Acoust. Soc. Am.*, 131(1), pp. 194-204.

- [30] Carullo, A., Vallan, A., Astolfi, A. (2013). Design issues for a portable vocal analyzer. *IEEE T. Instrum. Meas.*, 62(5), pp. 1084-1093.
- [31] JCGM 100:2008. Evaluation of measurement data - Guide to the expression of uncertainty in measurement.
- [32] Šrámková, H., Granqvist, S., Herbst, C.T., Švec, J.G. (2015). The softest sound level of the human voice in normal subjects. *J. Acoust. Soc. Am.*, 137(1), pp. 407-418.
- [33] Seltman, H.J. (2017). Experimental design and analysis, Sept. 2015, <http://www.stat.cmu.edu/~hseltman/309/Book/Book.pdf>, Chap. 13 (last access: January 2017).
- [34] Building Bulletin (2015). Acoustic Design in Schools: Performance Standards.
- [35] Shield, B., Dockrell, J.E. (2004). External and internal noise surveys of London primary schools. *J. Acoust. Soc. Am.*, 115(2), pp. 730-738.
- [36] ANSI (1997). ANSI S3.5:1997. Methods for Calculation of the Speech Intelligibility Index.
- [37] Cooke, M., King, S., Garnier, M., Aubanel, V. (2014). The listening talker: A review of human and algorithmic context-induced modifications of speech. *Comput. Speech Lang.*, 28(2), pp. 543-571.
- [38] Pelegrín-García, D., Smits, B., Brunskog, J., Jeong, C. (2011). Vocal effort with changing talker-to-listener distance in different acoustic environments. *J. Acoust. Soc. Am.*, 129(4), pp. 1981-1990.
- [39] Yang, W., Bradley, J.S. (2009). Effects of room acoustics on the intelligibility of speech in class-rooms for young children. *J. Acoust. Soc. Am.*, 125(2), pp. 922-933.
- [40] Durup, N., Shield, B., Dance, S., Sullivan, R. (2015). An investigation into relationships between class-room acoustic measurements and voice parameters of teachers. *Build. Acoust.*, 22(34), pp. 225-242.