

UNA SOLUZIONE PRATICA PER LA FONOMAPPATURA ACUSTICA IN OPERA DEGLI ELEMENTI PASSIVI DEGLI EDIFICI.

SPECTRA S.r.l
Arcore

1. Introduzione

I valori prestazionali dichiarati per gli elementi passivi degli edifici vengono raramente raggiunti quando tali elementi sono posti in opera. Varie e conosciute le problematiche coinvolte ma difficile rimane sempre la ricerca delle soluzioni adatte ad attuare gli interventi per il raggiungimento dei limiti prestazionali minimi imposti dal DPCM 5-12-97.

Di seguito viene presentato un nuovo approccio pratico per la fonomappatura diretta in opera, dei livelli di pressione ed intensità acustica degli elementi passivi degli edifici.

Viene anche descritta la realizzazione pratica di una sonda di intensità acustica a basso costo adatta per un campo di frequenza compreso tra gli 80 Hz ed i 6 kHz ed un calibratore per la verifica e la compensazione dell'uniformità di risposta in fase.

La procedura per la fonomappatura degli elementi passivi viene poi realizzata con una soluzione molto pratica ed adatta alle problematiche tipiche delle misure in cantiere, ovvero con un sistema di tracciamento ottico della posizione della sonda di intensità durante la scansione lungo la superficie di misura.

Alcuni esempi pratici di fonomappature eseguite su pareti, finestre, sono riportati con informazioni relative ai tempi di esecuzione delle misure e di elaborazione dei risultati.

2. La sonda intensimetrica

L'ostacolo principale nella diffusione delle misure di intensità acustica è sempre stato l'elevato costo necessario per acquistare un sistema di analisi con relative sonde capaci di soddisfare i requisiti della Normativa IEC 6143; per aumentare l'interesse sulla nuova soluzione di misura non essendo necessari i riferimenti normativi citati, sono state cercate delle soluzioni alternative principalmente orientate verso la possibilità di auto assemblare una sonda con caratteristiche adeguate per gli scopi desiderati ma con costi contenuti.

Per ottenere una sonda di intensità per misure a frequenze superiori ai 200÷300Hz è sufficiente fissare ad una distanza finita due normali microfoni a condensatore di buona qualità poiché in generale la loro uniformità di fase alle frequenze medio alte risulta molto buona. Nel campo di frequenze superiori ai 3kHz l'interferenza reciproca sul campo sonoro dovuta alle dimensioni fisiche dei microfoni può essere facilmente ridotta scegliendo microfoni di minore dimensione, per esempio con l'impiego di microfoni da ¼ di pollice anziché quelli da ½ di pollice.

Con questi presupposti la ricerca per la realizzazione di una sonda di intensità acustica a basso costo si è orientata su una soluzione basata su microfoni ad elettrete da ¼ di pollice; la gestione dell'alimentazione e del loro condizionamento risulta inoltre semplice ed in relazione alla loro piccola dimensione si può scegliere una configurazione con i microfoni disposti fianco a fianco, ritenendo appunto trascurabili le interferenze tra i trasduttori nel campo di frequenze al di sotto dei 8 kHz.

Per garantire una buona affidabilità, l'esperienza ha poi evidenziato l'importanza di realizzare una sonda solida e robusta dal punto di vista meccanico; per tale motivo si è cercato di evitare la necessità di smontaggio della sonda nelle operazioni di calibrazione dei livelli di pressione acustica o di compensazione della fase.

Seguendo queste indicazioni, per i microfoni della sonda sono stati scelti i MPA-416-BSWA in quanto oltre al costo contenuto ed alle ridotte dimensioni d'ingombro, hanno un preamplificatore integrato in grado di fornire un'uscita amplificata pari a 50mV/Pa, molto utile per scendere con la gamma di misura fino a 30dB(A).

Una sonda di intensità acustica può quindi essere facilmente realizzata seguendo l'esempio riportato nella figura n.1 dove si osserva la disposizione fianco a fianco della coppia microfoni preamplificatori ottenuta mediante incollaggio su un tubetto metallico di diametro analogo a quello dei microfoni. La direzione di orientamento della sonda durante le misure sarà ovviamente quella corrispondente alla linea congiungente i due microfoni, con il microfono del canale uno rivolto verso la sorgente. L'esempio riportato si presta facilmente a numerose variazioni con adattamenti e supporti necessari per soddisfare le varie configurazioni di misura.

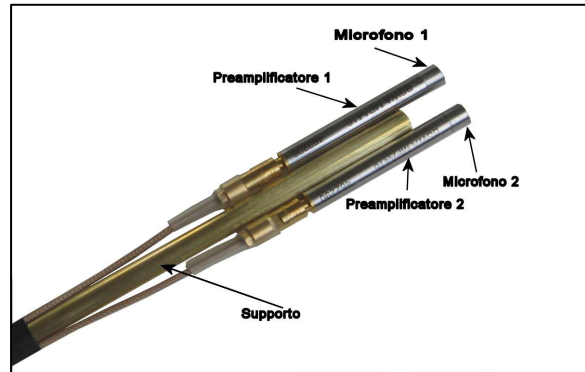


Figura 1 - Sonda di intensità acustica autocostruita

3. La compensazione della fase

Realizzata la sonda intensimetrica, si pone il problema di come rilevare le differenze della risposta in fase tra i due microfoni in funzione del campo di frequenza in cui si desidera operare. La soluzione più veloce è quella di prendere un tondino pieno di plexiglass da 45 mm e lavorando con tornio e trapano realizzare un accoppiatore tale da poter inserire da un lato i due microfoni della sonda e dal lato opposto una sorgente sonora di tipo elettrodinamico a banda larga. La sorgente sonora deve essere posta in una cavità accoppiata simmetricamente i due microfoni tramite un foro centrale. Come sorgente può essere utilizzato uno dei due trasduttori di una normale cuffia intrauricolare. Cura particolare dovrà essere posta nella realizzazione della tenuta generale del calibratore ed in particolare dei due fori di alloggiamento della coppia di microfoni.

L'obiettivo da raggiungere è

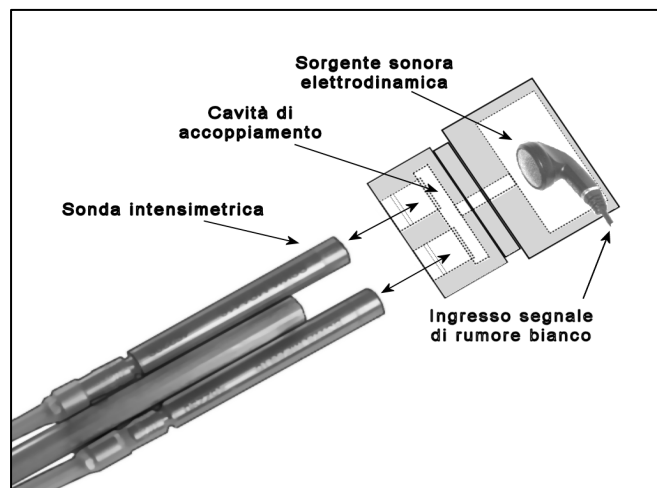


Figura 2 - Sonda di intensità e calibratore per uniformità di fase

quello di fornire un segnale sonoro di rumore bianco identico per entrambi i trasduttori microfonicici con una estensione in frequenza compresa tra 20 e 10kHz ed ampiezza uniforme ovvero senza picchi o valli troppo profonde.

Il segnale fornito dal calibratore inserito sulla coppia di microfoni ci consentirà rilevando la funzione di trasferimento mediante un analizzatore FFT di conoscere la variazione della fase verso frequenza e quindi di poter utilizzare questa informazione per equalizzare la risposta della sonda. L'operazione di equalizzazione coinvolge solitamente solo la risposta in fase in quanto la risposta in ampiezza verso frequenza dei microfoni a condensatore da ¼ di pollice risulta sempre entro tolleranze accettabili. Le variazioni di fase verso frequenza tra coppie di microfoni a condensatore possono essere di varie decine di gradi mentre l'uniformità desiderata per le misure di intensità sonora alle frequenze inferiori ai 100 Hz deve essere inferiore almeno ai 0.2 gradi.

Per verificare sonda e calibratore autocostruiti, abbiamo utilizzato l'analizzatore SoundBook che disponendo della funzione di equalizzazione per le sonde di intensità, si presta bene allo scopo oltre a consentire confronti diretti in parallelo con altre sonde certificate IEC 6143. La capacità di equalizzare la risposta in fase è una funzione comune a tutti i sistemi di analisi previsti per poter eseguire misure di intensità sonora.

Riportiamo di seguito nel grafico di figura 3 la risposta in fase originale della sonda autocostruita (con scala $\pm 5^\circ$) e nella figura 4 le risposte di uniformità in fase verso fre-

quenza successive alla equalizzazione (con scala $\pm 0.2^\circ$) eseguita utilizzando un calibratore autocostruito, simile a quello descritto. Nel grafico di figura 4 sono state sovrapposte alla curva di risposta in fase equalizzata, anche le curve ottenute prima e dopo due complete sessioni di misura eseguite a distanza di qualche giorno l'una dall'altra; si può notare che le variazioni successive all'utilizzo in campo della sonda hanno introdotto sfasamenti apprezzabili solo per frequenze superiori ai 6.3kHz in generale imputabili alla non sufficiente robustezza meccanica della sonda autocostruita.

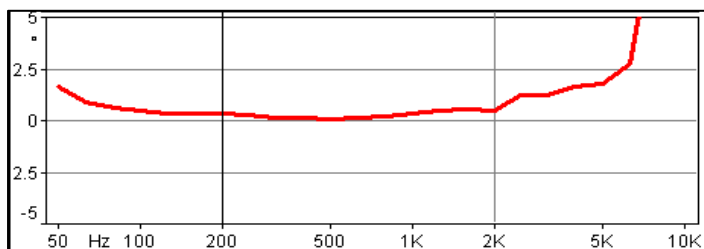


Figura 3 – Risposta in fase iniziale della sonda autocostruita

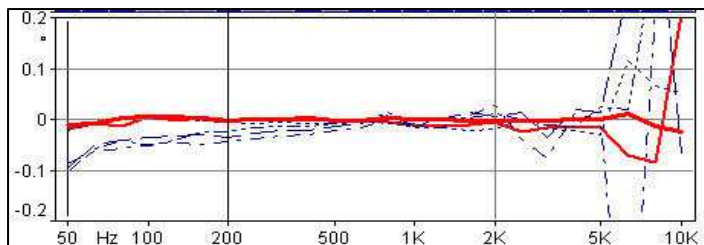


Figura 4 – Risposta in fase equalizzata della sonda autocostruita e successive verifiche all'inizio e fine misure.

4. Tracciamento ottico della movimentazione della sonda di intensità.

Viene ora presentata in anteprima una soluzione semplice ed originale studiata per rendere più pratica e veloce la realizzazione di fonomappature acustiche finalizzate allo studio della localizzazione delle sorgenti. Le ragioni che hanno sostenuto questo studio sono numerose ma in questa occasione ci soffermeremo principalmente sulle possibili applicazioni pratiche nell'ambito dell'acustica degli ambienti. Tutte le procedure di misura finalizzate alla valutazione degli elementi passivi degli edifici in conformità con le norme vigenti, portano infatti alla determinazione di un numero unico indice o del pote-

re fonoisolante tra ambienti oppure di quello di facciata o quello del rumore di calpestio. Se i valori minimi prestazionali non dovessero essere raggiunti sorge inevitabilmente il problema di trovare le cause e le possibili soluzioni. Il numero unico in tale contesto può solo dire se i valori richiesti vengono rispettati oppure no, ma non offre altra informazione utile per la comprensione delle ragioni che non ne hanno consentito il raggiungimento. Le cause più comuni risiedono nella errata posa in opera dei materiali con creazione di varie forme di possibili ponti acustici ed inevitabile decadimento delle prestazioni finali. La fonomappatura acustica condotta eseguendo dei rilievi su un grigliato di punti distribuito in modo uniforme lungo la superficie dell'elemento dell'edificio interessato dall'indagine, permette di ottenere una chiara visione dell'emissione sonora alle varie frequenze facilitando la comprensione delle problematiche coinvolte e localizzando la presenza di eventuali ponti acustici.

A fronte però di queste preziose informazioni fornite dalla fonomappatura, si pone una certa complessità per i rilievi da condurre direttamente in cantiere e soprattutto con tempi di misura non brevi; la fonomappatura con un grigliato di 54 punti distribuiti su una parete di medie dimensioni può richiedere non meno di 40 minuti considerando solo i tempi operativi per la definizione del grigliato e per la corrispondente acquisizione con tempi di media inferiori alla decina di secondi per punto.

Da queste considerazioni si può comprendere come la ricerca di soluzioni più pratiche e veloci abbiano portato alle moderne tecniche di localizzazione delle sorgenti basate sugli algoritmi di 'Beamforming' con array microfoniche da 60 e più trasduttori; soluzioni allo stato dell'arte ma come tali molto costose e di non semplice impiego sui cantieri.

Con tali premesse e cercando di trovare soluzioni innovative utilizzando la strumentazione di analisi già esistente, dalla collaborazione delle società Spectra e Sinus, è nata una realizzazione molto interessante per questo tipo di applicazione.

Senza introdurre soluzioni complicate ma solo unendo ed ottimizzando quanto già disponibile nel settore della multimedia, è stato realizzato un semplice tracciatore ottico 2D della posizione della sonda di intensità così come può essere movimentata dal braccio di un operatore lungo la superficie su cui si desidera ottenere una fonomappatura acustica.

Il sistema di analisi SoundBook si adattava molto bene per questa integrazione in quanto già provvisto della capacità di affiancare alle normali analisi di pressione ed intensità acustica anche le immagini provenienti da una webcam.

L'idea base del tracciatore ottico consiste nel dotare la sonda acustica di un piccolo illuminatore LED rivolto verso la webcam che inquadra la superficie di fonomappatura e che con una opportuna regolazione dei livelli di esposizione e luminosità ed un adeguato software di lettura, fos-

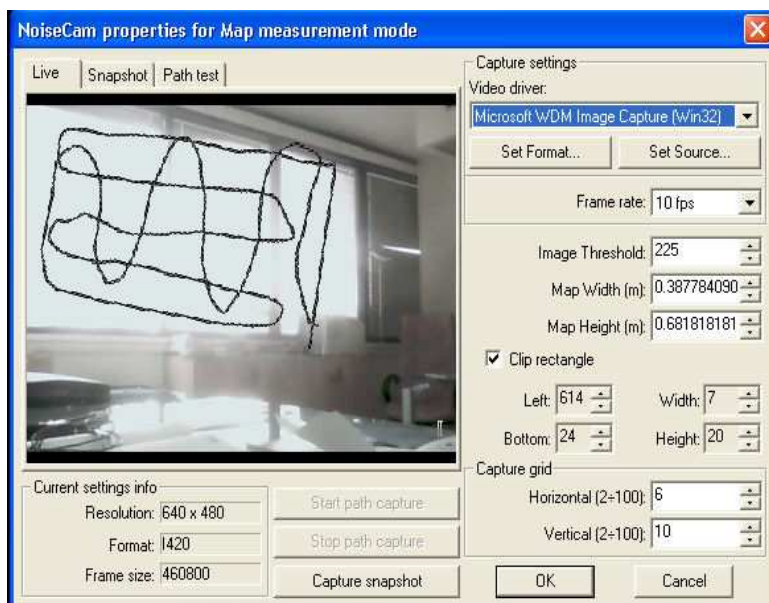


Figura 5 – Finestra per le impostazioni delle proprietà di tracciamento.

se capace di inseguire il punto luminoso nel percorso corrispondente alla movimentazione della sonda catturando le coordinate di ogni punto. In figura 5 viene riportata la finestra realizzata per gestire le impostazioni del tracciamento dove l'operatore può eseguire le opportune regolazioni e verifiche per adattare l'inseguimento della traccia luminosa nelle diverse condizioni di luce ambientale. La situazione di maggior disagio con questo metodo risulta essere quella di controluce, con sfondo una sorgente luminosa come quella rappresentata in figura 5 da una ampia finestra; in questi casi la soluzione migliore è risultata quella di un utilizzo di un illuminatore all'infrarosso unitamente ad un filtro per l'infrarosso posto di fronte all'obiettivo della webcam. L'esempio di figura 5 relativo ad un tracciamento in piena controluce ottenuto con la funzione di verifica preliminare dei parametri di impostazione, dimostra l'efficienza di tale soluzione.

Realizzato il sistema che consente di ottenere la traccia del percorso di scansione della sonda, si doveva trovare un criterio altrettanto efficiente per definire la distribuzione dei punti di acquisizione delle misure. Dopo vari tipi di approcci, ci si è orientati verso una procedura che consiste nell'inquadrare la superficie interessata alla fonomappatura e dividerla in un numero arbitrario di righe e colonne definendo così anche il numero di punti di misura (figura 6); durante la scansione, il passaggio della traccia della sonda all'interno di ciascuna cella produrrà l'acquisizione di una misura corrispondente al punto con coordinate più vicine al centro della cella attraversata; se la scansione attraversa più volte la medesima cella, verrà memorizzata la misura con coordinate più vicine al centro della singola cella.

Il problema della accuratezza delle misure in funzione della velocità di scansione è stato affrontato introducendo un criterio di media del segnale collegato con il tipo di larghezza di banda di analisi e con la distanza che separa ciascuna cella. L'operatore definisce l'accuratezza desiderata e la visualizzazione delle celle attraversate durante la scansione diverranno di colore verde se la velocità di scansione sarà adeguata, rosse se invece la velocità dovesse risultare eccessiva; la figura 6 evidenzia in modo semplificato la visualizzazione grafica di queste informazioni.

L'algoritmo utilizzato per la generazione delle fonomappe è molto efficiente e consente di visualizzare la fonomappatura mentre viene eseguita la scansione; la mappa viene disegnata direttamente sopra all'immagine fotografica che raffigura la superficie di misura, consentendo all'operatore una chiara visione dell'intera procedura di acquisizione; ogni movimento della sonda viene riportato in tempo reale sulla corrispondente posizione dell'immagine visualizzata sullo schermo del PC.

Alla fine della scansione l'operatore ha subito disponibili tutte le fonomappe in termini di intensità acustica e pressione acustica, per bande di 1/3 d'ottava e in FFT; il posizionamento del cursore su una banda di 1/3 d'ottava o in FFT automaticamente aggiorna la fonomappa per il valore della banda in frequenza selezionata.

Il risultato finale del sistema così integrato è sicuramente interessante per le numerose applicazioni volte più in generale verso lo studio e la localizzazione delle sorgenti sono-

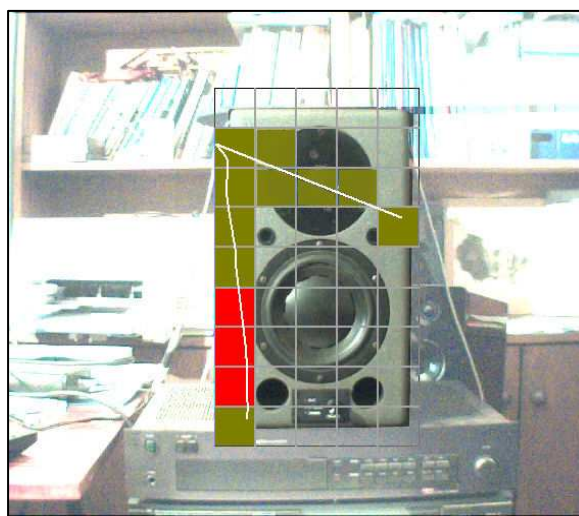


Figura 6 – Grigliato di misura 5 colonne x 9 righe con test velocità di scansione.

re, ma è appunto come si diceva nella premessa il settore dell'acustica edilizia che può trarre notevoli benefici da questa tecnica proprio perché risulta essere di pratico impiego direttamente in cantiere utilizzando strumentazione totalmente portatile e con funzionamento autonomo a batterie, con tempi di misura variabili dai due ai quattro minuti e con risultati di facile comprensione e di immediato utilizzo.

Riportiamo di conseguenza alcuni semplici esempi utili per comprendere la dimensione generale delle informazioni ottenibili a fronte dei corrispondenti tempi globali impiegati per i rilievi.

5. Fonomappa di una porta finestra a vetri.

Il primo esempio consiste nella fonomappatura di una porta finestra di elevato isolamento acustico inserita nella parete divisoria tra due camere riverberanti appartenenti al laboratorio dell'Istituto per le Tecnologie della Costruzione del CNR di San Giuliano Milanese.

La prestazione della porta misurata in laboratorio ha fornito un indice di potere fonoisolante inferiore alle attese. Il grafico di figura 7 evidenzia il risultato della misura riportato in conformità con la ISO-717.1; alla frequenza dei 1250 Hz è osservabile una perdita di isolamento marcata.

Tutto quanto è possibile rilevare sia in laboratorio sia in cantiere a fronte di un risultato che non rispetta le attese sono solamente ipotesi relative all'anomalia osservata a 1250Hz.

Vediamo nelle stesse condizioni quali altre informazioni possiamo trarre da una fonomappatura di intensità acustica eseguita su un grigliato di 5 x 9 punti uniformemente distribuiti sull'infisso ad una distanza di circa 15 centimetri ed acquisiti in un tempo di poco superiore ai 2 minuti. In figura 8 è riportata a sinistra la foto della porta finestra inserita nella parete del laboratorio di prova, mentre al centro osserviamo evidenziata la traccia del percorso compiuto dalla sonda durante la scansione manuale della superficie di misura ed a destra la mappa di intensità nella banda di frequenze comprese tra 1100 e 1440 Hz.

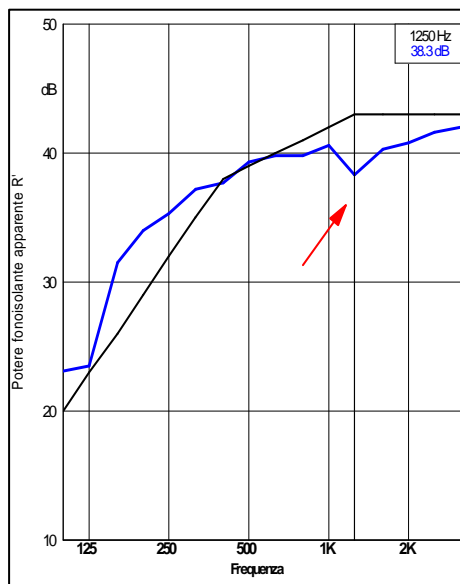


Figura 7 – misura del potere fonoisolante.

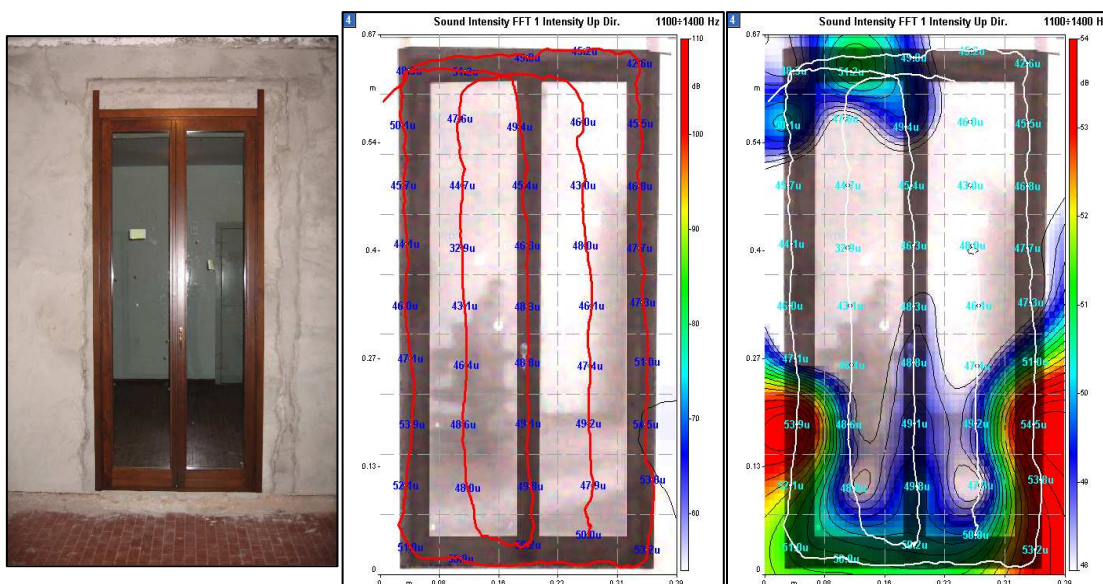


Figura 8 – foto della portafinestra, traccia del percorso della sonda e fonomappa di intensità tra 1100 e 1440

L'esame della mappa eseguita in corrispondenza della banda in frequenza dove era stata rilevata la perdita di isolamento mostra due distinte zone evidenziate sulla mappa in colore rosso responsabili dell'emissione sonora in corrispondenza dei punti di contatto con il controtelaio in basso e su entrambi i fianchi.

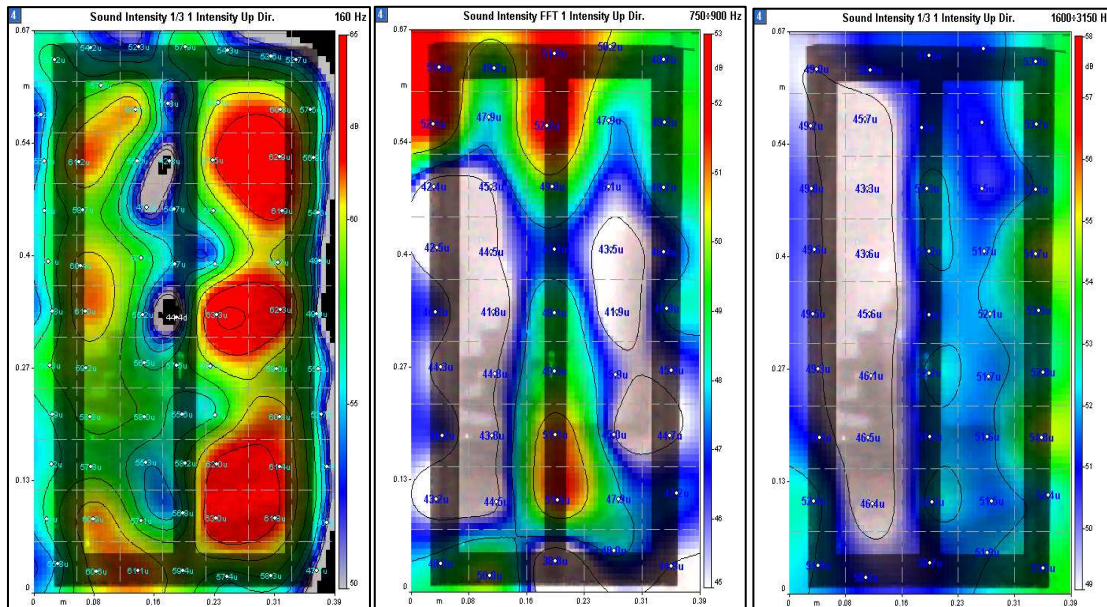


Figura 9 – fonomappe di intensità a 160Hz, tra 750 e 900 Hz e tra 1600 e 3150 Hz

In figura 9 sono riportate le mappe di intensità sonora alla frequenza del 1/3 d'ottava dei 160 Hz e qui si può osservare come a basse frequenze con rilievi eseguiti in campo vicino, l'emissione acustica risente direttamente dei modi di vibrare della superficie fonomappata, evidenziando con aree di colore rosso disposte simmetricamente i ventri ed i nodi della vibrazione corrispondente.

Nella gamma di frequenze comprese tra 750 e 900 Hz vengono evidenziate delle emissioni in corrispondenza dei blocchi di serraggio tra le due ante della portafinestra, mentre alle frequenze superiori, comprese tra i 1600 ed i 3150 Hz si può notare come la superficie vetrata del lato sinistro isoli meglio della corrispondente vetrata dell'anta di destra.

Altre osservazioni interessanti possono essere fatte dal confronto contemporaneo tra le mappe di intensità e quelle di pressione acustica o tra analisi in 1/3 d'ottava ed analisi FFT; nel processo di playback ogni dato archiviato può essere facilmente gestito dall'operatore utilizzando numerose funzioni di gestione della grafica di fonomappatura.

6. Fonomappa di una finestra in legno

Di seguito riportiamo le mappe corrispondenti a rilievi simili ai precedenti, eseguiti su una finestra in legno installata nelle camere riverberanti del laboratorio Consorzio Legno Legno di Correggio.

Le condizioni di misura risultavano quindi sempre ottimali ed anche in questa occasione si è potuto osservare che la posa in opera pur in laboratorio di prove, assume una valenza determinante ai fini della valutazione del numero unico prestazionale.

In figura 10 sono riportate le mappe alla frequenza del 1/3 d'ottava dei 1250 Hz dove risulta facile osservare l'emissione acustica proveniente dalle fessure dei bordi di contatto tra serramento e controtelaio; le due mappe rappresentate si riferiscono ai livelli di pres-

sione acustica per la mappa a sinistra e di intensità per quella di destra; il confronto mostra una identica capacità di evidenziare le fughe acustiche per entrambi i metodi, confermando che questo tipo di indagine per frequenze superiori ai 500 - 700 Hz può benissimo essere eseguito anche con mappe generate da tradizionali misure fonometriche. Individuato il problema dell'emissione proveniente dalle fessure di contatto tra infisso e controtelaio, si è provveduto ad una più accurata sigillatura, ottenendo come riscontro immediato un miglioramento di quasi 2 dB.

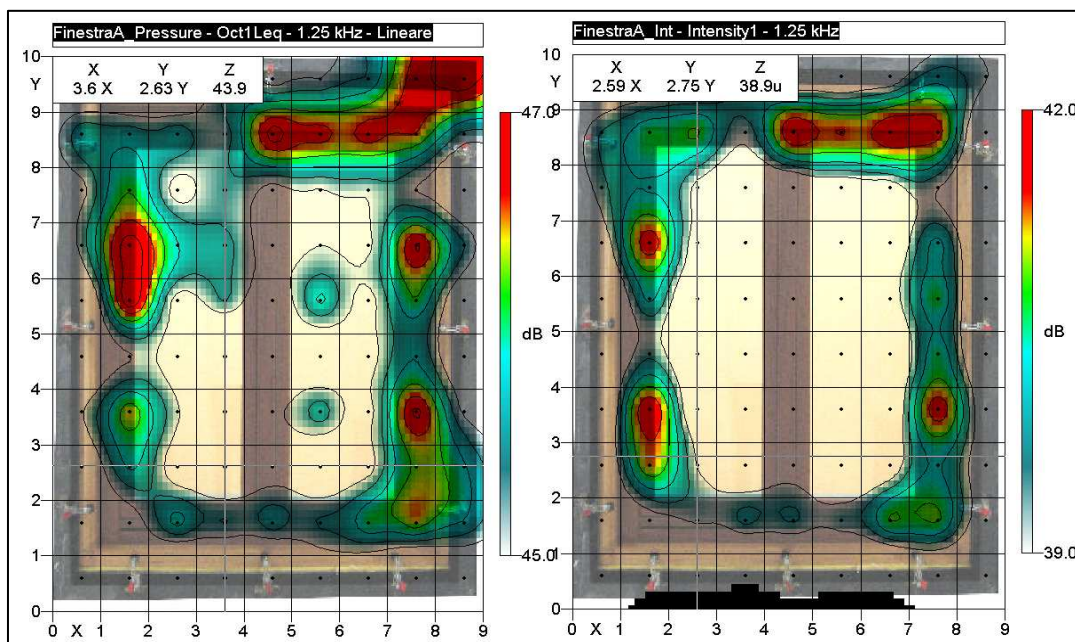


Figura 10 – Finestra, fonomappe di intensità e pressione a 1250 Hz

In figura 11 sono sovrapposti gli spettri di livello di intensità sonora emessi dal serramento prima e dopo la sigillatura dei bordi; si osserva che il problema coinvolge una estensione di frequenze che scende fino ai 250Hz e che comunque non era soggettivamente percepibile e non poteva essere altro che rilevabile se non da procedure di fonomappatura acustica.

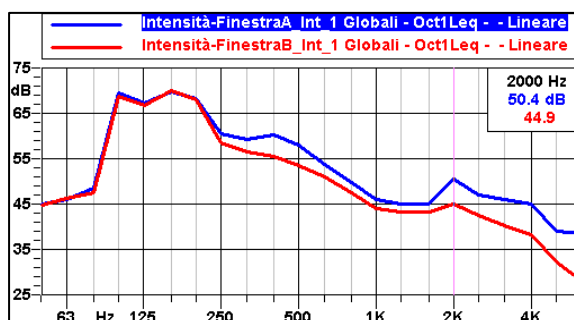


Figura 11 – Confronto spettro intensità prima e dopo sigillatura fessure

7. Fonomappe di intensità e di pressione acustica

L'esperienza acquisita in questi ultimi anni nella produzione di fonomappature su elementi passivi di edifici ha dimostrato più volte che dal punto di vista della ricerca delle sorgenti è possibile ottenere informazioni confrontabili sia utilizzando fonomappature basate su misure di intensità, sia con equivalenti fonomappature ottenute con livelli di pressione sonora. Le fonomappe di intensità e pressione descritte nell'esempio riportato in figura 10 convalidano molto bene questo tipo di esperienza e sosterebbero l'idea di utilizzare per tali rilievi le più semplici misure di pressione sonora ovvero l'impiego di

un semplice fonometro al posto della più complessa soluzione basata su un analizzatore bicanale con costosa sonda di intensità acustica.

Esistono però delle situazioni di campo acustico dove i rilievi di pressione ed intensità possono produrre fonomappature molto discordanti tra loro e sebbene tali condizioni non siano frequenti è opportuno saperle riconoscere tramite una valutazione preventiva delle unità assorbenti del locale in cui devono essere eseguiti i rilievi. Per un ambiente piccolo e molto riverberante la propagazione libera si può esaurire dopo solo poche decine di centimetri dalla sorgente ed in condizioni di campo diffuso una misura di pressione acustica non può essere utilizzata per gli scopi desiderati.

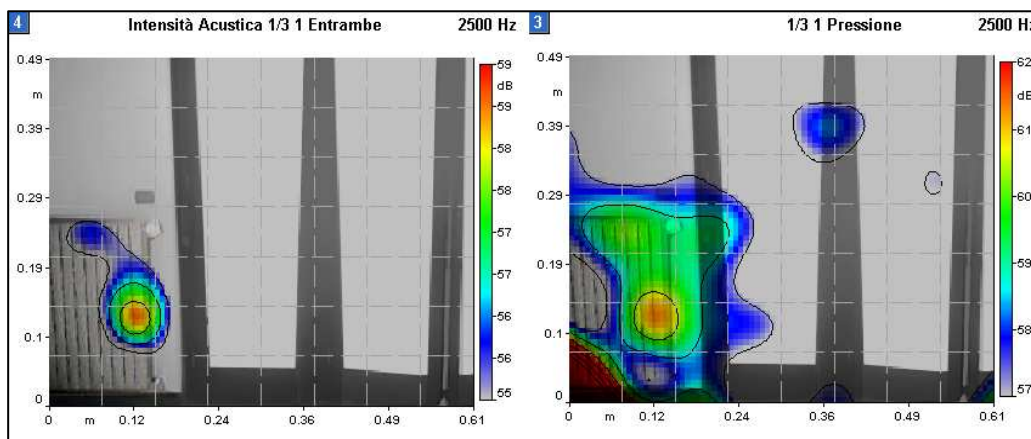


Figura 12 – Confronto fonomappa di intensità e pressione alla frequenza di 2500 Hz.

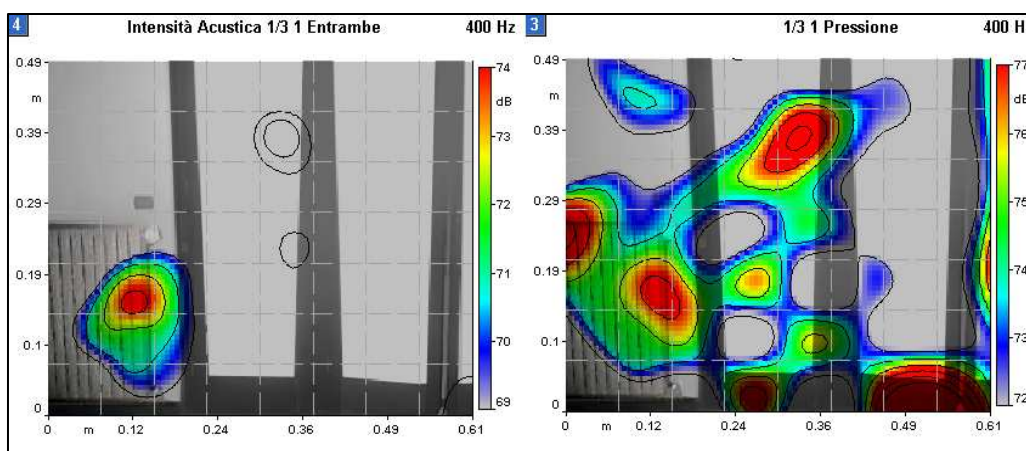


Figura 13 – Confronto fonomappa di intensità e pressione alla frequenza di 400 Hz.

Per meglio evidenziare questa condizione, riportiamo in figura 12 ed in figura 13 il riscontro di fonomappature eseguite alle frequenze dei 1/3 d'ottava dei 2500 Hz e dei 400 Hz relative ad un piccolo locale di un condominio appena ultimato e destinato alle funzioni di cucina, con pareti piastrellate, pavimento in ceramica ed ampie porte finestre che si affacciano su un balcone; un piccolo ambiente con un tempo di riverbero abbondantemente superiore al secondo e di conseguenza con un campo sonoro ad alta reattività come dimostrato anche dai valori superiori ai 15 dB dell'indice di p-I (spettro di pressione meno spettro di Intensità) riportato in figura 14.

La figura 12 è relativa alla fonomappatura a 2500 Hz, su una banda in frequenza relativamente alta, dove i livelli in pressione acustica più facilmente forniscono riscontri

comparabili con quelli prodotti dall'intensità eppure in queste condizioni di campo altamente riverberante possiamo osservare che mentre nella fonomappa di intensità riportata a destra, il foro di aerazione previsto per l'ambiente cucina e nascosto dietro il termosifone, viene evidenziato chiaramente come sorgente sonora, nella corrispondente fonomappa di pressione, questa evidenza si distribuisce sull'intera superficie del termosifone con una indicazione dei livelli più elevati posta nell'angolo in basso a sinistra e priva di alcun riscontro.

Nella figura 13 vengono riportate le corrispondenti fonomappe di intensità, a destra di pressione ed a sinistra di intensità, per la banda del 1/3 d'ottava dei 400 Hz; alle frequenze più basse oltre alla reattività del campo sonoro, intervengono anche i modi di risposta acustica del locale rendendo oltremodo difficoltosa qualunque interpretazione della fonomappatura dei livelli di pressione, mentre con la fonomappa di intensità, la localizzazione della sorgente sonora associata al foro di aerazione permane con chiara evidenza.

Le considerazioni fornite da questo ultimo esempio non devono essere intese a priori come critica all'impiego delle fonomappature generate utilizzando i livelli di pressione sonora bensì come ulteriore dimostrazione delle potenzialità del sistema di analisi presentato e dell'importanza della rappresentazione grafica delle misure nell'ottica di agevolare la lettura e la comprensione dei risultati.

8. Conclusioni

Il sistema di fonomappatura descritto in anteprima in questa relazione si pone come soluzione ottimizzata tra le procedure di acquisizione manuale per griglia di punti con successiva elaborazione e le nuove soluzioni di array microfonici con tecnologia 'Beamforming'. Rispetto alle procedure di acquisizione manuali offre una riduzione dei tempi operativi di almeno 10 – 15 volte, mentre rispetto alle soluzioni basate su array microfonici si pone a costi 5 – 6 volte inferiori e con la possibilità di misurare non solo pressione acustica ma anche intensità ed a partire da frequenze molto basse; l'aspetto negativo di maggior rilievo risulta logicamente essere quello della necessità di poter eseguire questo tipo di fonomappature solo su sorgenti sonore con emissione stazionaria. I risultati sono sempre di facile lettura anche per operatori con poca esperienza specifica e soprattutto sono utilizzabili immediatamente per trovare le cause della perdita delle prestazioni acustiche dei materiali dovute a non corretta posa in opera oltre che per lo studio finalizzato alla ottimizzazione delle prestazioni dei medesimi.

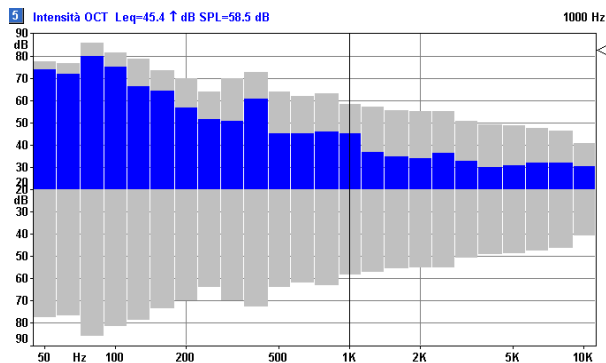


Figura 14 – Spettro di intensità (blue) sovrapposto allo spettro di pressione acustica (grigio).

