

## STIMA INDIRETTA DELL'IMPEDENZA ACUSTICA PER LA CALIBRAZIONE DI MODELLI NUMERICI FEM E WAVE-BASED IN PICCOLE SALE

Donato Masci (1)

1) Studio Sound Service S.r.l., Impruneta (FI) – Università degli Studi di Firenze, [donatomasci@studiosoundservice.com](mailto:donatomasci@studiosoundservice.com)

### SOMMARIO

La simulazione del campo acustico alle basse frequenze in piccole sale richiede metodi numerici wave-based, il cui parametro critico è l'impedenza acustica di superficie — difficile da misurare direttamente in situ. In questo lavoro si presentano due approcci di stima indiretta dell'impedenza a partire da misure di decadimento modale (MT60), applicati alla calibrazione di un modello FEM (COMSOL Multiphysics) e di un modello wave-based ibrido (Treble Technologies) di una sala campione. I fattori di partecipazione modale, calcolati tramite analisi agli autovalori, consentono di risolvere il problema inverso e stimare l'ammettenza di ciascuna superficie. Per Treble, i materiali vengono ritirati iterativamente per banda ottava fino a convergenza con i tempi di riverberazione misurati. Entrambi i metodi producono previsioni attendibili nella banda 80–150 Hz; le discrepanze nella banda 50–75 Hz sono attribuibili alla risonanza strutturale del cartongesso, non catturata da un modello scalare di impedenza. Il confronto delinea un trade-off tra rigore formale (COMSOL) e praticabilità operativa (Treble).

### 1. Introduzione

Nelle piccole sale professionali il campo acustico al di sotto della frequenza di Schroeder (~350 Hz) è dominato da modi propri discreti e individualmente udibili [1]. La simulazione accurata di questo regime richiede metodi risolutivi dell'equazione d'onda (FEM, BEM o approcci ibridi wave-based). Il parametro critico è l'impedenza acustica di superficie  $Z$ , che governa i tempi di decadimento modale (MT60) e la distribuzione del campo di pressione. La sua caratterizzazione diretta in situ è spesso impraticabile nelle condizioni reali. Il presente lavoro descrive un metodo di stima indiretta di  $Z$  a partire da misure MT60 e la sua applicazione alla calibrazione di due piattaforme: COMSOL Multiphysics (FEM completo) e Treble Technologies (wave-based ibrido). Scopo è valutare la fattibilità operativa di entrambi gli approcci e identificarne i limiti attuali.

### 2. Metodologia

#### 2.1 Banco di prova: la sala SSS

Le misure sono state condotte in una piccola sala usata come laboratorio di Studio Sound Service a Impruneta (FI), con pareti in cartongesso su struttura metallica, pavimento in legno e soffitto in calcestruzzo. Sono stati identificati quattro gruppi di superfici con impedenza distinta: contropareti, soffitto/pavimento, porta e partizione interna. Le risposte all'impulso sono state acquisite con sorgente in angolo (Genelec 8351) e 14 punti ricevitore distribuiti per isolare le prime forme modali (software REW), come mostrato in figura 2.

#### 2.2 Stima dell'impedenza tramite COMSOL

Seguendo il metodo di Magalotti e Cardinali [2], l'impedenza viene stimata come problema inverso. Per i quattro modi assiali principali (38, 63, 68, 76 Hz) si misura la MT60 in punti selezionati per isolare il contributo modale. Si imposta un sistema di quattro equazioni nelle quattro incognite beta (coefficienti di ammettenza normalizzata):

$$(1) \quad MT_{60,N} = \frac{6 \ln(10)}{c} \frac{V}{\sum_j \epsilon_N \beta_j S_j} \quad [s]$$

dove:

- $c$  : velocità di propagazione del suono nell'aria [m/s];
- $\beta_j$  : coefficiente di ammettenza normalizzata di superficie;
- $S_j$  : superficie  $j$ -esima [m<sup>2</sup>];

$V$  : volume della stanza [m<sup>3</sup>];

$\epsilon_N$  : fattore di partecipazione modale per ogni superficie.

I fattori di partecipazione modale sono calcolati tramite analisi agli autovalori in COMSOL sul modello geometrico esatto della stanza (inclusivo della porta come discontinuità di impedenza). Il sistema viene risolto con Mathematica e i valori beta assegnati alle superfici per il calcolo della risposta in frequenza nei 14 punti.

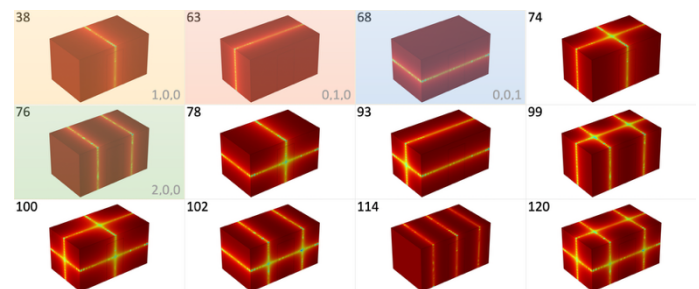


Figura 1 – modi scelti per tarare il modello (38, 63, 68 e 76 Hz)

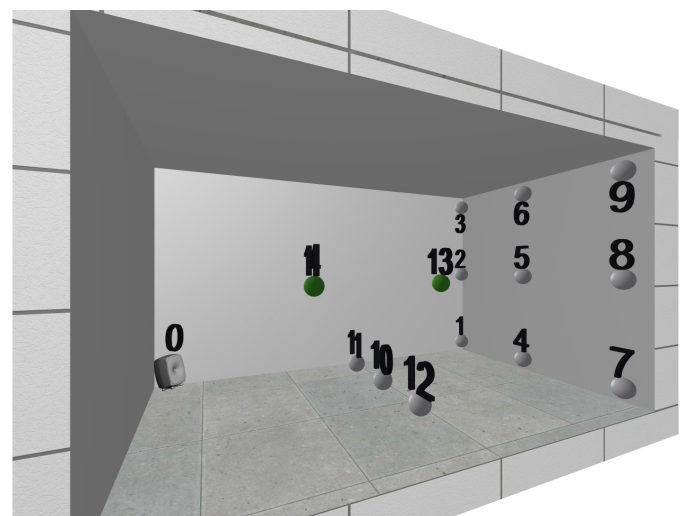


Figura 2 – 14 punti di misura (sfere) e la sorgente in angolo.

#### 2.3 Calibrazione tramite Treble Technologies

Il modello è importato in Treble Technologies, piattaforma wave-based ibrida. Partendo da materiali del database nativo, i

coefficienti di assorbimento per banda ottava vengono ritirati iterativamente fino a convergenza con i tempi di riverberazione misurati. L'algoritmo genera automaticamente i profili di impedenza in frequenza, rendendo il processo accessibile senza caratterizzazione diretta di  $Z$ .

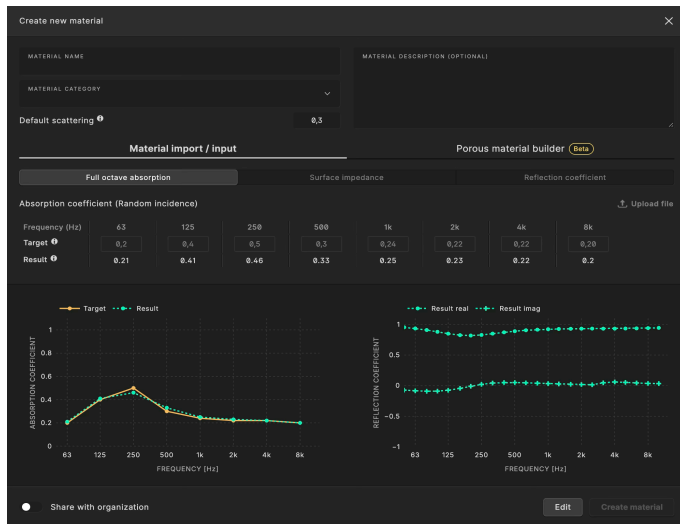


Figura 3 – Importazione di un nuovo materiale in Treble con algoritmo di stima dell'impedenza (parte reale e immaginaria)

### 3. Risultati

La figura 4 mostra il confronto tra risposta in frequenza misurata, simulata con COMSOL (impedenza calibrata) e modello a pareti rigide, per i 14 punti. L'accordo è generalmente buono nella banda 80-150 Hz; le maggiori discrepanze si osservano nella banda 50-75 Hz, attribuibili alla risonanza strutturale del cartongesso, non catturata dal modello scalare.

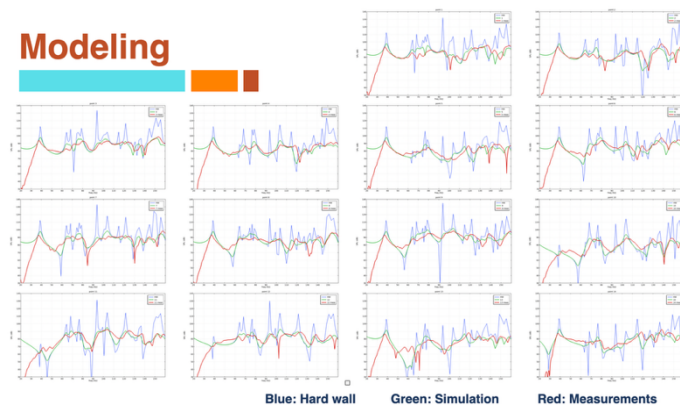


Figura 4 - Confronto risposta in frequenza per i 14 punti. Blu: pareti rigide; Verde: simulazione COMSOL calibrata; Rosso: misure.

La figura 5 riporta i risultati del modello Treble calibrato, confrontati con le misure e con il modello COMSOL. Nei casi migliori il modello segue fedelmente la curva misurata. Treble risulta sistematicamente migliore di COMSOL, beneficiando della taratura per banda ottava piuttosto che di una singola impedenza scalare.

### 4. Conclusioni

I risultati dimostrano che la stima indiretta dell'impedenza acustica a partire da misure MT60 costituisce un approccio praticabile per la calibrazione di modelli numerici LF in piccole sale. Entrambi i metodi producono previsioni attendibili nella banda 80–150 Hz; le discrepanze nella banda 50–75 Hz, legate

alla risonanza strutturale del cartongesso, evidenziano il limite comune: l'impedenza di superficie reale è frequenza-dipendente e non riducibile a un valore scalare.

Il confronto COMSOL/Treble delinea un *trade-off* chiaro tra rigore e praticabilità. Il metodo inverso FEM consente una taratura formalmente controllata ma richiede competenze e tempi non compatibili con la routine di progetto. Treble inverte la logica: è l'algoritmo a stimare l'impedenza a partire dal target RT, risultando più immediato e, in questo caso studio, più accurato.

La strada verso previsioni LF affidabili nella pratica professionale passa necessariamente per tre sviluppi: banche dati di impedenza misurate in condizioni reali di installazione; metodi di stima indiretta con risoluzione sub-ottavale; campagne di validazione sistematica su geometrie e materiali eterogenei.

### 5. Riferimenti

- [1] B. Fazenda, M. Wankling, "Optimal room dimensions for critical listening environments," J. Audio Eng. Soc., 2009.
- [2] R. Magalotti, V. Cardinali, "A simulation test bench for decay times in room acoustics," COMSOL Conference 2018.

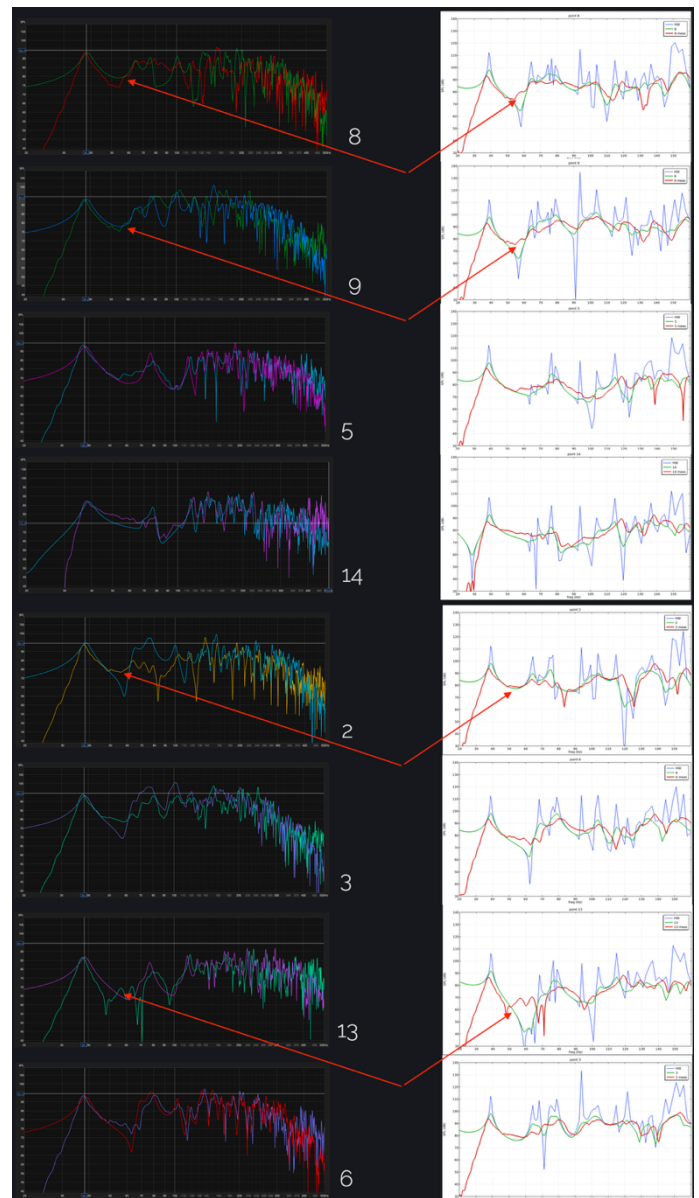


Figura 5 - Risultati Treble vs misure (sinistra) e confronto con COMSOL (destra). In alto: casi con miglior accordo; in basso: casi peggiori.