



Stima indiretta dell'impedenza acustica per la calibrazione di modelli numerici FEM e wave-based in piccole sale

Donato Masci

Studio Sound Service S.r.l. · Università degli Studi di Firenze

52° Convegno Nazionale AIA · Perugia, 10–12 giugno 2026

Le basse frequenze sono il problema

- Sotto la frequenza di Schroeder il campo acustico è dominato da modi propri discreti e individualmente udibili.
- I metodi geometrici (ray tracing) non sanno descrivere questo regime.
- Serve un approccio wave-based: FEM, BEM, FTDT o ibrido.

≈ **350 Hz**

frequenza di Schroeder

Il nodo: l'impedenza acustica

- L'impedenza di superficie Z governa il decadimento modale e la distribuzione del campo di pressione.
- È il parametro critico di ogni modello wave-based alle basse frequenze.
- Ma la misura diretta in situ (tubo d'impedenza, two-microphone) è spesso impraticabile in cantiere.
(poi c'è il discorso misura normale/diffusa)

Z

come stimarla senza misurarla?

Boundary Admittance Measurement Method (BAMM!)

Peter D'Antonio^{*2}, Michael Vorlaender¹, Markus Mueller-Trapet³

¹IHTA, RWTH Aachen University, Aachen, Germany;

²REDI Acoustics, Highland, New York, United States;

³National Research Council Canada, Ottawa, Ontario

- Trevor Cox, Keith Attenborough, Christian Nocke, Ning Xiang, Michael Vorlaender, Finnur Pind, Toru Otsuru, Peter D'Antonio
- We discussed forming three linked WGs TCAA of ASA, TC RBA of EAA and ASJ (Japan). WG chairs to be determined.

L'approccio: stima indiretta da misure MT60

Misura dei tempi di decadimento modale (MT60) → stima di Z → calibrazione del modello

COMSOL Multiphysics

FEM completo

- Impedenza stimata risolvendo un problema inverso a partire dai modi misurati.
- Massimo controllo, ma laborioso.

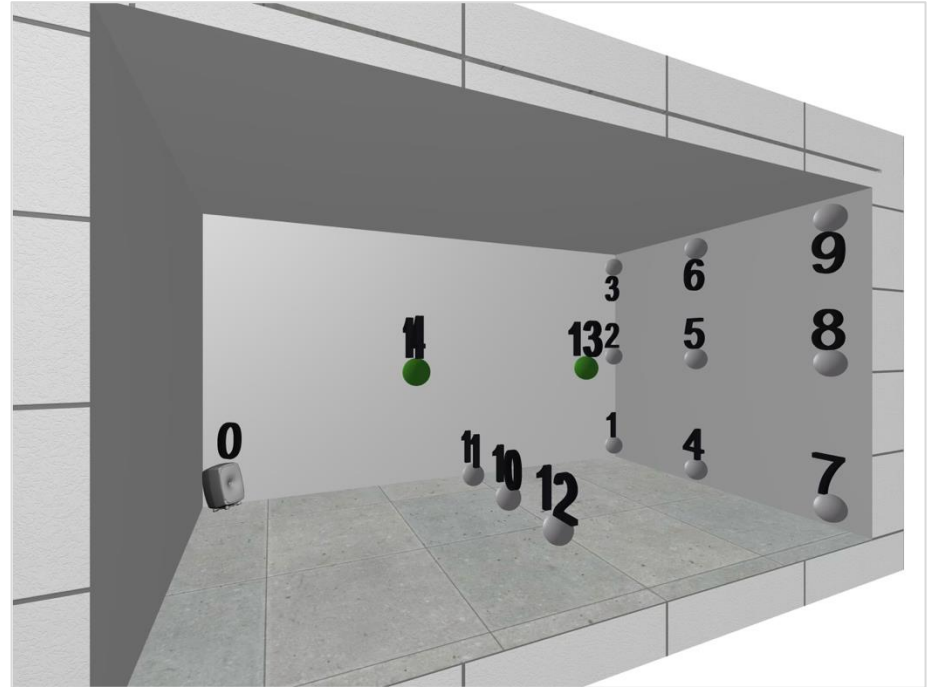
Treble Technologies

Wave-based ibrido

- L'algoritmo stima Z dal target di assorbimento; taratura per banda ottava.
- Immediato e pronto al progetto.

Banco di prova: la sala SSS

- Piccola sala del laboratorio SSS (Impruneta).
- Pareti in cartongesso su struttura metallica, pavimento in legno, soffitto in calcestruzzo.
- Quattro gruppi di superfici con impedenza distinta: contropareti, soffitto/pavimento, porta, partizione.
- Sorgente in angolo (per eccitare tutti i modi) e 14 punti ricevitore.



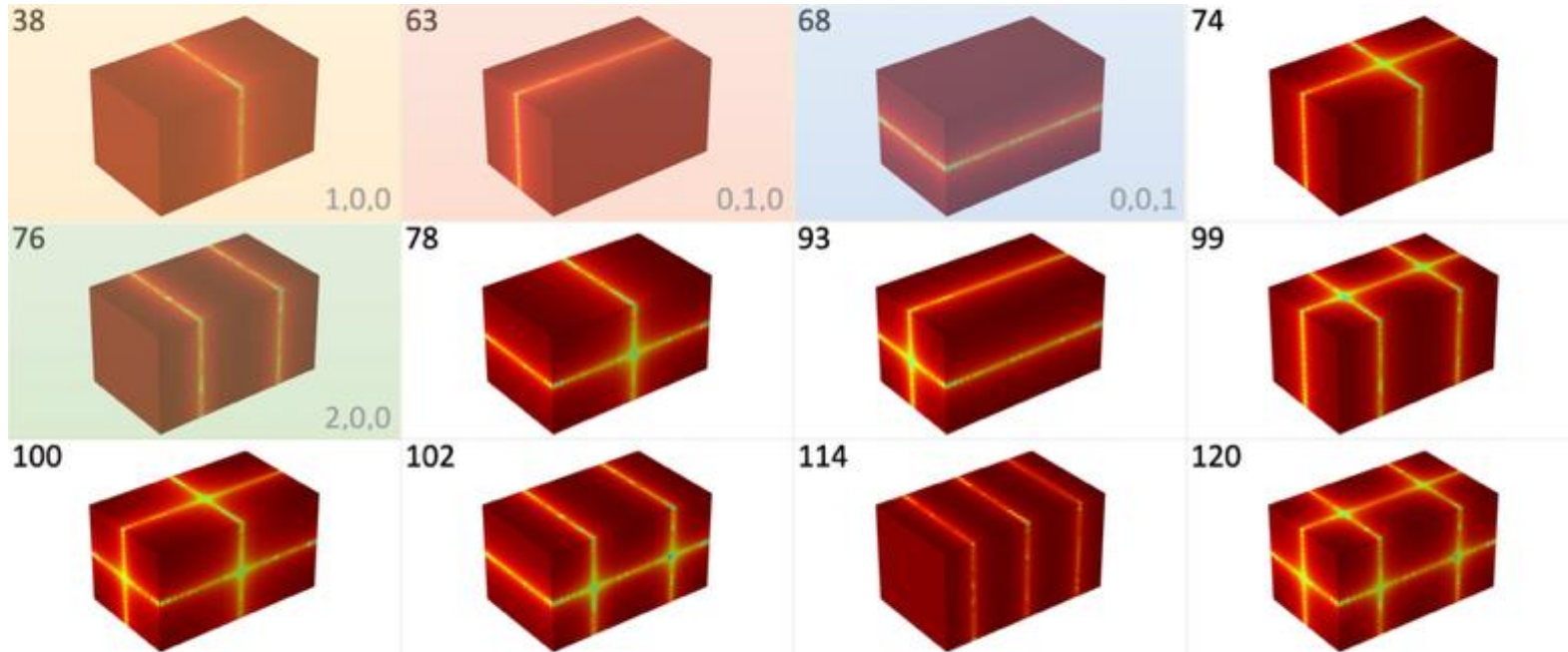
- Per i quattro modi assiali principali (38, 63, 68, 76 Hz) si misura il MT60 isolando il contributo modale.
- Si imposta un sistema di 4 equazioni nelle 4 incognite β (ammettenza normalizzata di ogni superficie).
- Metodo di Magalotti & Cardinali (COMSOL Conference 2018), risolto con Mathematica.

$$MT_{60,N} = \frac{6 \ln(10)}{c} \frac{V}{\sum_{j \in N} \beta_j S_j}$$

ϵ_{N_j} : fattore di partecipazione modale per ogni superficie

4 modi = 4 equazioni = 4 incognite

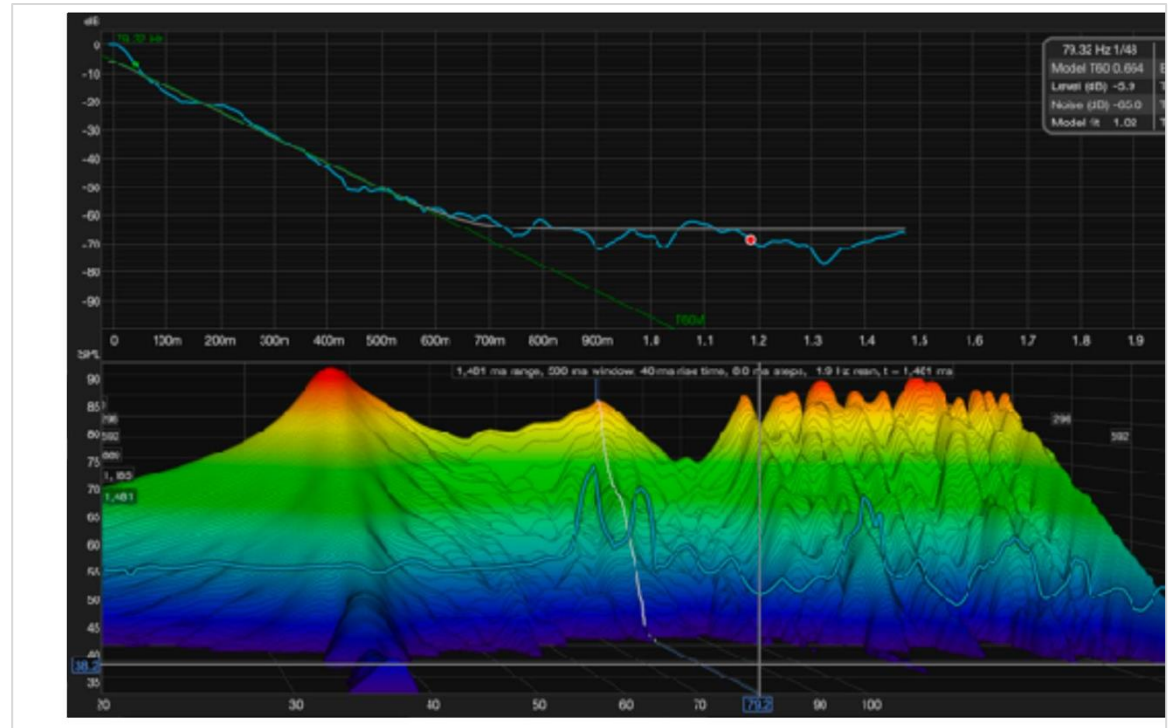
I fattori di partecipazione modale ϵ



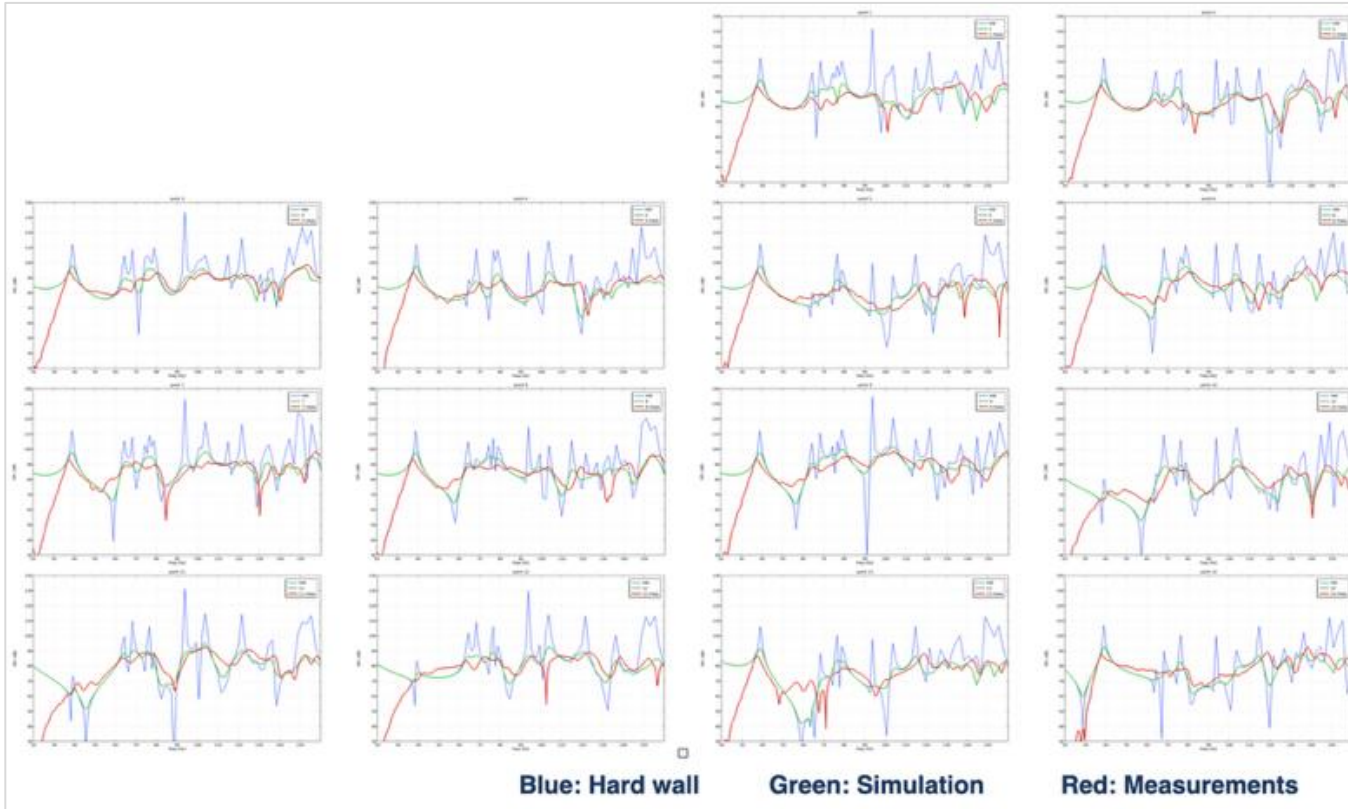
- I fattori ϵ sono calcolati tramite analisi agli autovalori in COMSOL sul modello geometrico esatto della stanza (inclusa la porta come discontinuità di impedenza).
- Ogni ϵ pesa il contributo di una superficie al decadimento di un modo: dove il modo ha pressione massima, la superficie pesa di più.

Stima dei tempi di decadimento modale

- Risposte all'impulso acquisite nei 14 punti con il software REW.
- I MT60 dei singoli modi sono stimati isolando il decadimento modale dal waterfall.
- Punti scelti per distinguere le prime forme modali.



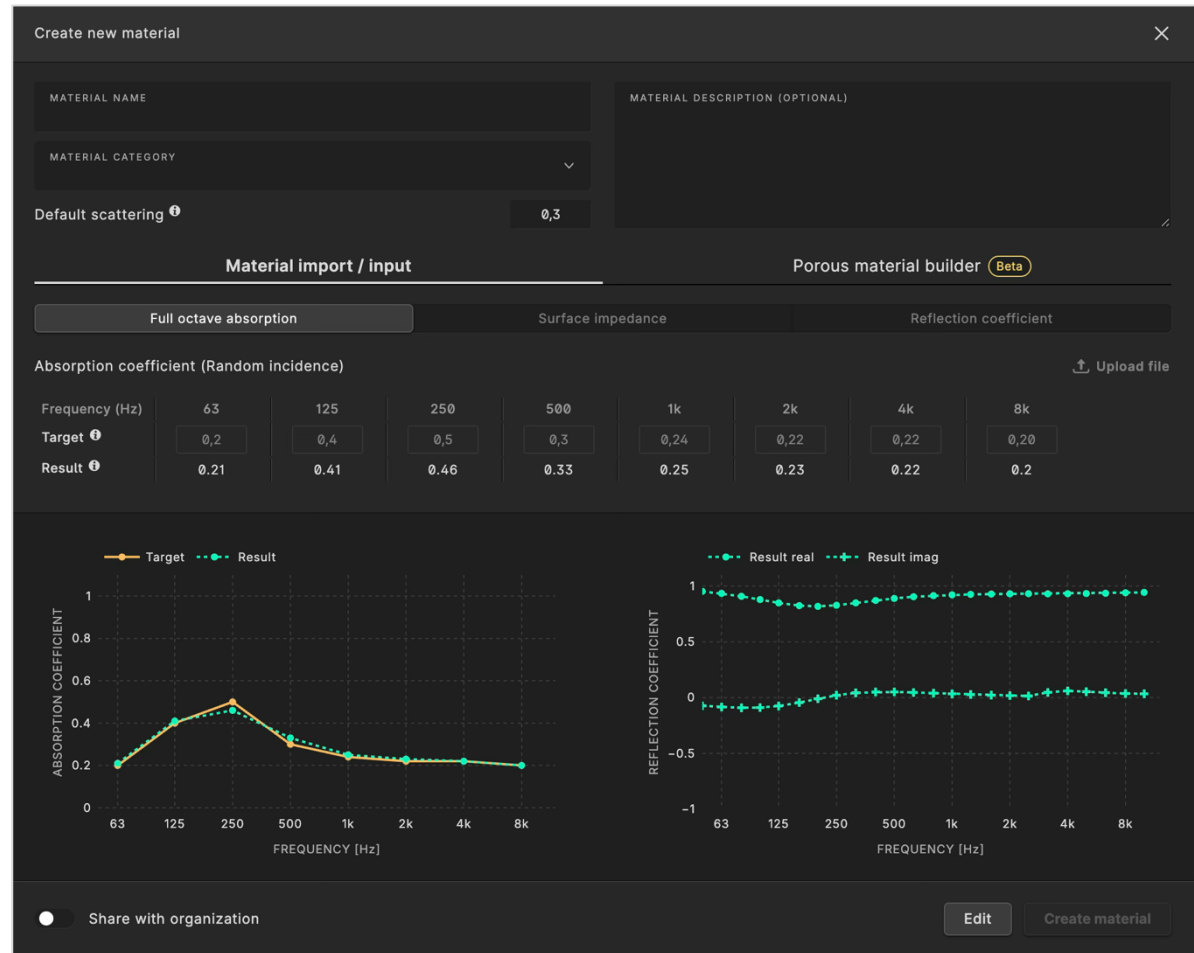
Risultati COMSOL: misura vs simulazione



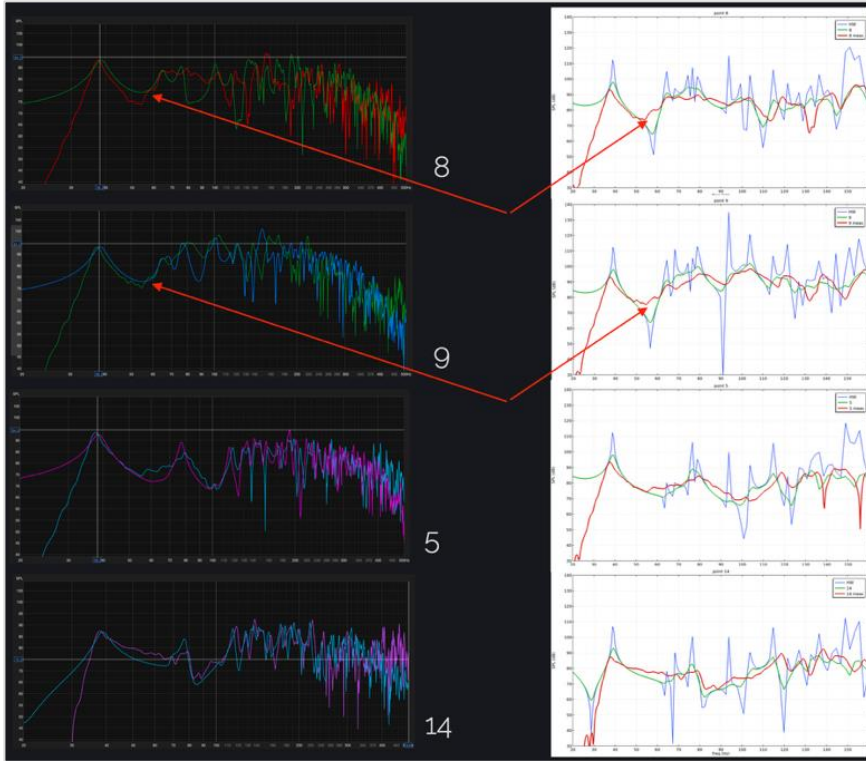
Blu: pareti rigide · Verde: simulazione COMSOL calibrata · Rosso: misure

Buon accordo nella banda 80–150 Hz; discrepanze a 50–75 Hz (risonanza strutturale del cartongesso).

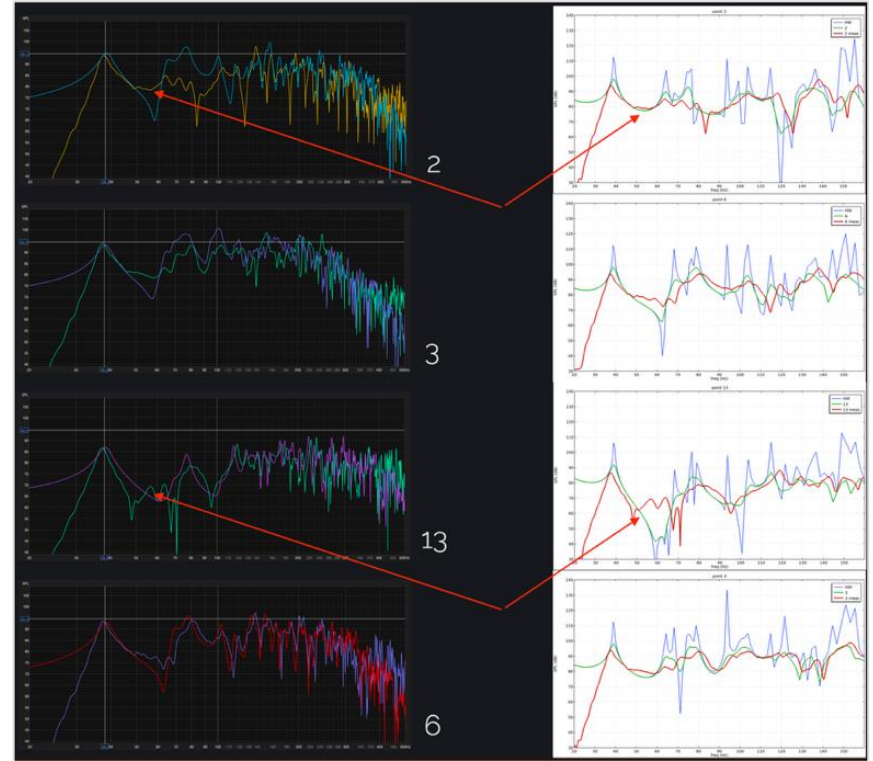
- L' algoritmo nativo stima il profilo di impedenza (parte reale e immaginaria) dal target di assorbimento.
- I materiali vengono ritarati per banda ottava fino a convergenza con gli RT misurati.
- Processo accessibile senza caratterizzazione diretta di Z.



Risultati Treble: migliori e peggiori



Casi migliori



Casi peggiori

Treble risulta sistematicamente migliore di COMSOL negli stessi punti.

Osservazioni e limiti

Cosa funziona

- Previsioni attendibili nella banda 80–150 Hz.
- La validazione della risposta in frequenza conferma il modello.

Dove restano sfide

- Discrepanze nelle risonanze del cartongesso.
- La risoluzione ottavale perde i fenomeni narrowband.

Il trade-off

COMSOL offre ottimizzazione formale ma resta uno strumento di ricerca. Treble è pratico e pronto al progetto, a fronte di minore trasparenza sul modello di impedenza.

La previsione alle basse frequenze in piccole sale passa da teoria a pratica. Cosa manca ancora:

1

Banche dati di impedenza

misurate in condizioni reali di
installazione

2

Stima indiretta raffinata

con risoluzione in frequenza
sub-ottavale

3

Validazione sistematica

su geometrie e materiali
eterogenei documentati

Gli strumenti sono ormai accessibili.

È l'infrastruttura dei dati che deve recuperare.

Grazie per l'attenzione

Donato Masci

donatomasci@studiosoundservice.com

Studio Sound Service S.r.l. · Università degli Studi di Firenze