

INFLUENZA DI CONTROSOFFITTI FONOASSORBENTI SUL TEMPO DI RIVERBERAZIONE.

CONFRONTO TRA SOFTWARE E METODO DI CALCOLO EN 12354-6

di

* Nicola Granzotto, Paolo Ruggeri, Fabio Peron, Marco Caniato, Andrea Gasparella

Premessa

Questo articolo è un estratto di “N. Granzotto, P. Ruggeri, F. Peron, M. Caniato, A. Gasparella, Influence of Sound-Absorbing Ceiling on the Reverberation Time. Comparison Between Software and Calculation Method EN 12354-6 - 5th IBPSA-Italy Conference Bozen-Bolzano, 29th June –1st July 2022.” Per maggiori dettagli si invita a leggere la versione integrale.

Sommario

La corretta progettazione acustica di ambienti quali aule, sale conferenza e uffici è di fondamentale importanza per garantire un'elevata intelligibilità del parlato e per contenere i livelli di rumorosità interna. Il solo utilizzo di controsoffitti fonoassorbenti non sempre è sufficiente a garantire un adeguato comfort, in quanto le riflessioni tra pareti parallele potrebbero introdurre fenomeni indesiderati come flutter-eco o l'accentuazione di risonanze modali. Un altro problema è legato all'uso di modelli di calcolo semi-empirici come quelli proposti da Sabine o Eyring, che potrebbero portare a una sottostima dei tempi di riverbero. Questo articolo confronta il tempo di riverbero misurato e simulato in due ambienti di piccole dimensioni con (i) i modelli Sabine ed Eyring, (ii) due software di simulazione commerciali e (iii) il metodo standard EN 12354-6 valido per le stanze, con assorbimento non omogeneo distribuito tra le superfici.

1- Introduzione

Una corretta progettazione acustica di ambienti è di fondamentale importanza per aumentare il comfort e l'intelligibilità del parlato. Gli strumenti a disposizione dei progettisti possono essere dei modelli di calcolo semi-empirici semplificati come le equazioni di Sabine ed Eyring, equazioni più complesse come quelle descritte nella norma EN 12354-6 e software dedicati che prevedono una modellazione tridimensionale dell'ambiente, un'accurata definizione delle sorgenti, dei ricettori e delle superfici. Le formulazioni Sabine ed Eyring sono affidabili nelle seguenti condizioni:

- 1) campo sonoro diffuso;
- 2) coefficiente di assorbimento medio dell'ambiente inferiore a 0,2;
- 3) assorbimento omogeneo.

Spesso in ambienti come uffici viene utilizzato solo il controsoffitto fonoassorbente sia per ragioni di costo che di posizionamento. In questo caso l'assorbimento non è omogeneo, essendo concentrato in una sola parte dell'ambiente; pertanto, i modelli di Sabine ed Eyring, che non considerano la modalità in cui le superfici e gli oggetti fonoassorbenti sono posizionati nella stanza, potrebbero non fornire risultati affidabili.

In questo caso, per avere dei risultati più affidabili, utilizzando comunque delle formule semi-empiriche è possibile utilizzare il metodo

di calcolo descritto nell'allegato D della norma EN 12354-6 che è ottimizzato per la valutazione previsionale dei tempi di riverberazione in ambienti con assorbimento disomogeneo.

In ogni metodo di calcolo previsionale è comunque sempre presente una criticità che deriva dalle caratteristiche dei valori di fonoassorbimento utilizzati come dato di ingresso. Infatti, la misura del coefficiente di assorbimento in camera riverberante, secondo la norma ISO 354, presuppone un campo sonoro perfettamente diffuso per poter utilizzare la formulazione di Sabine, una condizione ideale e non completamente ottenibile nei laboratori di prova. Un altro problema legato alla determinazione del coefficiente di assorbimento in campo diffuso è legato alla presenza di diffusori appesi al soffitto delle camere riverberanti, che rendono il volume della camera inferiore a quello effettivamente utilizzato nella formula di Sabine, con una conseguente sovrastima dei risultati (Scrosati et al., 2019).

A seguito di queste premesse, in questo articolo verranno presentate delle misurazioni del tempo di riverberazione effettuate su due piccoli uffici non arredati con soffitti fonoassorbenti confrontate con i valori ottenuti da modelli di calcolo previsionali: formulazioni semplificate (Sabine, Eyring), metodo di calcolo EN 12354-6 e due software (ray-tracing, pyramid tracing) dedicati all'acustica di ambienti interni.

2- Caso studio

Sono stati presi in esame due ambienti non arredati con pavimento sopraelevato con superfici in pianta di 16,3 m² (Ambiente 1) e 32,9 m² (Ambiente 2). Le pareti sono in cartongesso e laterizio intonacato, il soffitto è realizzato con elementi quadrati in lana di roccia, con dimensioni di 600 mm x 600 mm. Le finestre di lunghezza pari alla facciata sono poste a 108 cm dal pavimento e hanno un'altezza da terra di 118 cm. Le dimensioni dei locali sono riportate nelle Figure 1, 2, 3 e 4.

Le caratteristiche geometriche delle stanze sono riportate nella Tabella 1. Viene riportato anche il percorso libero medio (MFP) calcolato con la formula di Sabine, o ottenuto con i software. Si può notare come i percorsi liberi medi ottenuti

con i software sono molto simili a quelli ottenuti utilizzando il modello Sabine.



fig. 1 - Planimetria ambiente 1

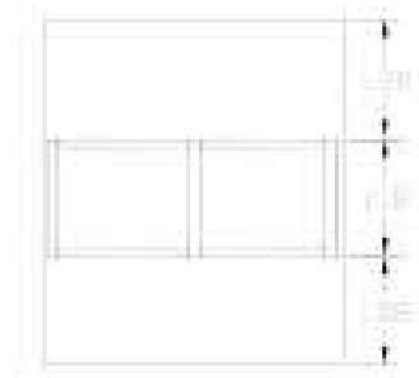


fig. 2 - Facciata ambiente 1

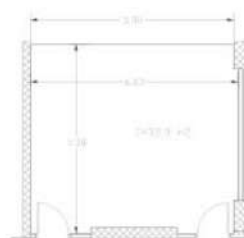


fig. 3 - Planimetria ambiente 2



fig. 4 - Facciata ambiente 2

tab. 1 - Percorso libero medio (MFP)

	Ambiente 1	Ambiente 2
V [m ³]	56.2	113.5
S [m ²]	91.5	147.2
MFP=4V/S [m]	2.460	3.084
MFP-Software A [m]	2.480	3.100
MFP-Software B [m]	2.470	3.090

3- Misure del tempo di riverberazione

Le misure del tempo di riverberazione T_{20} sui due uffici sono state effettuate per verificare l'affidabilità dei diversi metodi di calcolo.

Le misurazioni sono state effettuate con il metodo del rumore interrotto secondo la norma ISO 3382-2.

Nell'ambiente 1 sono state utilizzate una posizione della sorgente sonora e tre posizioni del microfono, mentre nell'ambiente 2 sono state utilizzate due posizioni della sorgente e tre po-

sizioni del microfono. La sorgente sonora omnidirezionale è stata posizionata a 1,7 m di altezza e il microfono è stato posizionato a 1-1,5 m di altezza. Le misurazioni sono state ripetute due volte per ciascuna combinazione sorgente-microfono.

I risultati ottenuti sono mostrati in Fig. 5.

Si può notare che, nonostante il volume dell'ambiente 1 sia circa la metà di quello dell'ambiente 2, il tempo di riverberazione è solo leggermente inferiore.

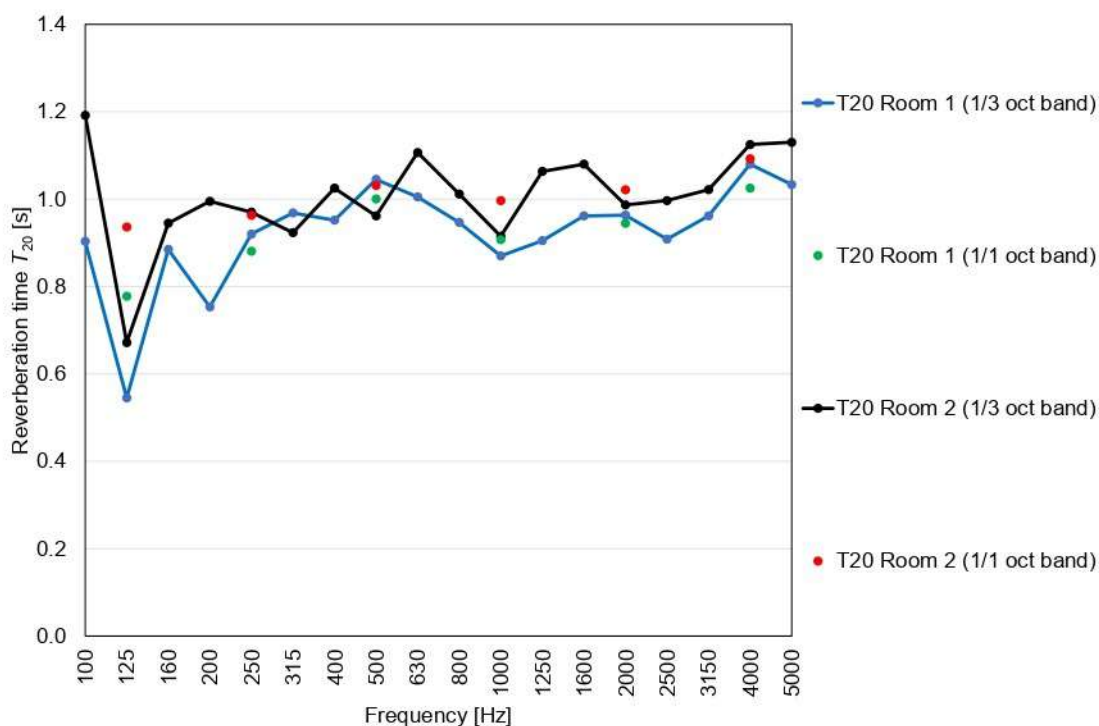


fig. 5 - Misura del tempo di riverberazione T_{20} per l'ambiente 1 e 2 in bande di 1/3 d'ottava e in bande d'ottava

4- Modelli di calcolo

I modelli di calcolo adottati per il calcolo del tempo di riverberazione sono indicati di seguito e si riferiscono sia a modelli semi-empirici che a software che adottano dei modelli basati sull'acustica geometrica:

- 1) equazioni di Sabine e Eyring;
- 2) metodo di calcolo EN 12354-6;
- 3) due diversi software di simulazione acustica per ambienti interni con modellazione ray-tracing e pyramid-tracing.

La formula di Sabine è:

$$T_{Sabine} = \frac{55,3 V}{c_0 A} \quad (1)$$

L'area di assorbimento equivalente A, considerando solo superfici piane e non oggetti, è calcolata con l'Eq. (2):

$$A = \sum_i a_i S_i \quad (2)$$

Il modello di Eyring è riportato in equazione 3:

$$T_{Eyring} = \frac{55,3}{c_0} \frac{V}{-5 \ln(1 - \alpha_{eq})} \quad (3)$$

Il metodo di calcolo della EN 12354-6 (Allegato D) per ambienti con assorbimento disomogeneo considera il seguente tempo di riverbero (senza assorbimento di oggetti):

$$T_{EN} = \frac{55,3V}{4c_0} \left(\frac{1}{A_x^*} + \frac{1}{A_y^*} + \frac{1}{A_z^*} + \frac{1}{A} \right) \cong T_{Sabine} \quad f \geq f_c = \frac{8,7c_0}{V^{0,75}} \quad (4)$$

$$T_{EN} = \frac{55,3}{c_0} \frac{V}{A_{total}^*} \quad f < f_c = \frac{8,7c_0}{V^{0,75}} \quad (5)$$

A*x, A*y, A*z, A*d sono l'area effettiva di assorbimento acustico per ciascun campo sonoro, mentre A*xyzd è l'area effettiva di assorbimento acustico per il campo totale per le basse frequenze ($f < f_c$).

I software commerciali utilizzati sono basati modelli di simulazione di acustica geometrica che adottano tecniche di ray-tracing (A) e pyramid-tracing (B).

5- Simulazioni

Per verificare l'affidabilità dei diversi metodi di calcolo sono state effettuate simulazioni del tempo di riverberazione T20. I modelli 3D sono stati realizzati con due diversi tipi di software per acustica architettonica. I modelli

sono riportati nelle Figg. 6 - 9.

I coefficienti di assorbimento acustico utilizzati sono riportati nella Tabella 2.

6- Risultati e discussione

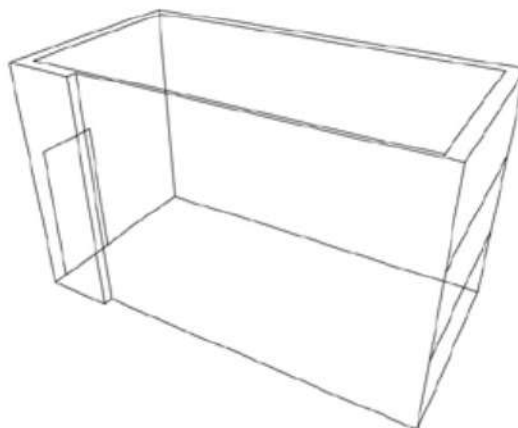


fig. 6 - Ambiente 1 – modello di simulazione 3D - Software A

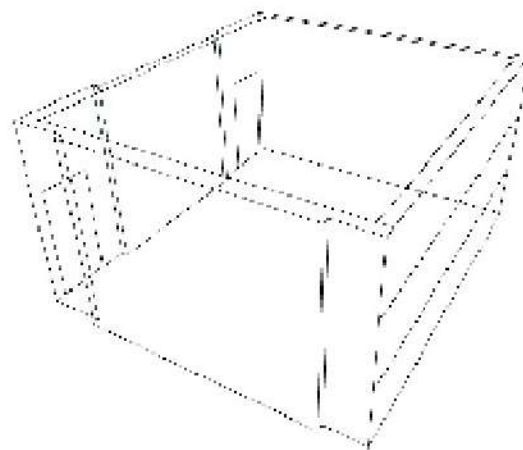


fig. 7 - Ambiente 2 – modello di simulazione 3D - Software A

fig. 8 - Ambiente 1 – modello di simulazione 3D - Software BSoftware A

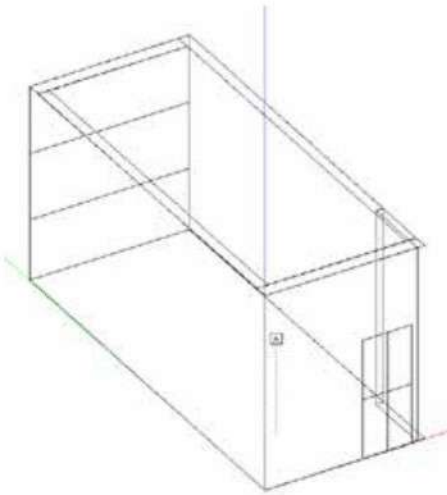
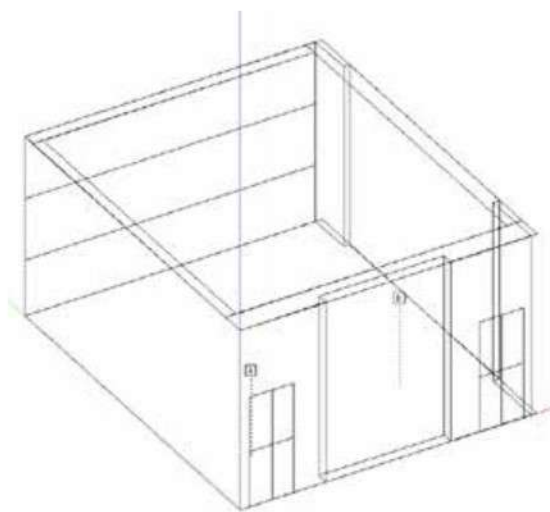


fig. 9 - Ambiente 2 – modello di simulazione 3D - Software B



tab. 2 - Coefficienti di assorbimento acustico utilizzati nelle simulazioni

	125	250	500	1000	2000	4000
Soffitto	0.45	0.90	1.00	0.85	0.95	0.95
Pareti intonacate	0.02	0.03	0.03	0.04	0.05	0.07
Pavimento sopraelevato	0.20	0.15	0.10	0.10	0.05	0.10
Pareti in cartongesso	0.15	0.10	0.06	0.04	0.04	0.05
Finestre	0.18	0.06	0.04	0.03	0.02	0.02
Porte	0.14	0.10	0.06	0.08	0.10	0.10

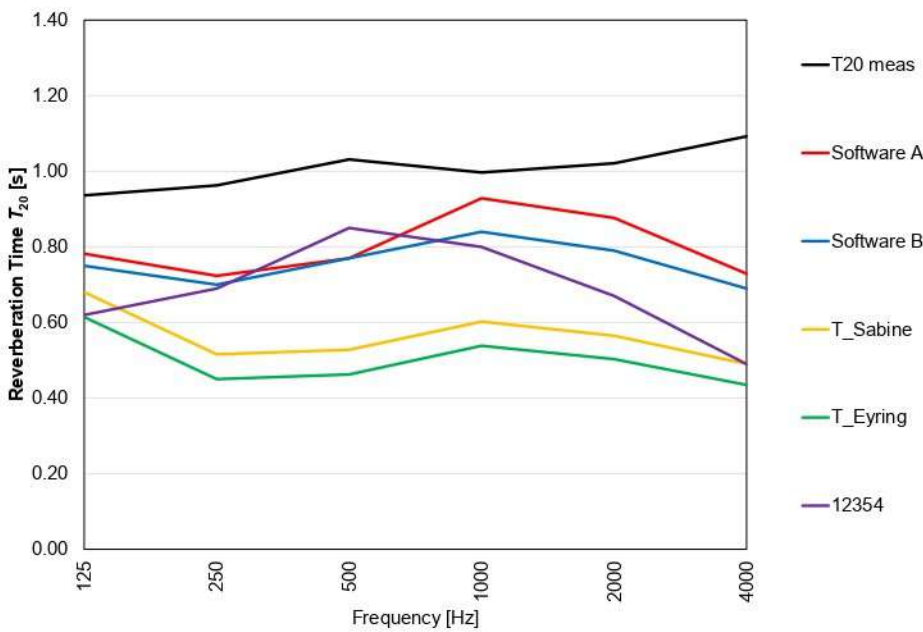


fig. 10 - Tempo di riverberazione T_{20} misurato e simulato (Ambiente 1)

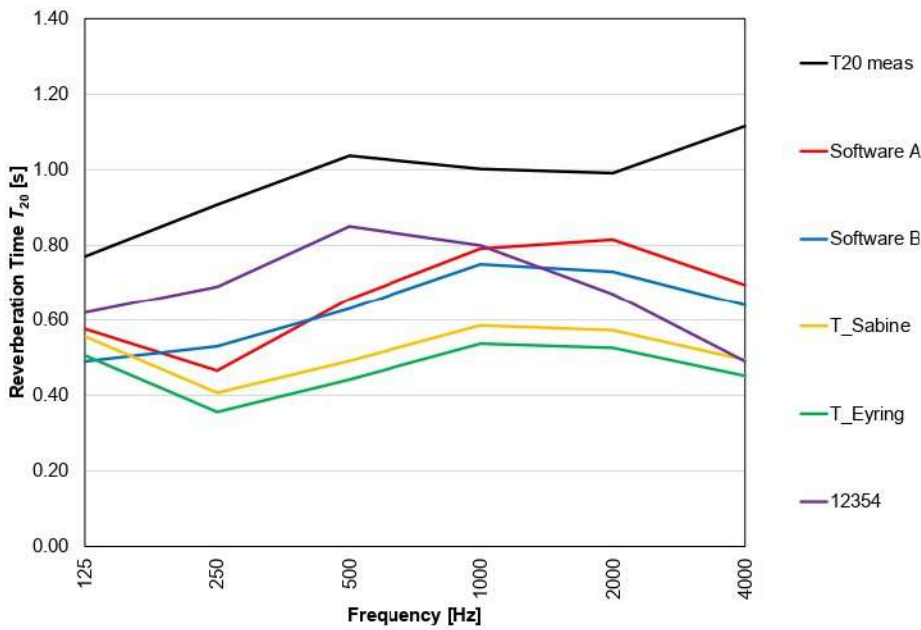


fig. 11 - Tempo di riverberazione T20 misurato e simulato (Ambiente 2)

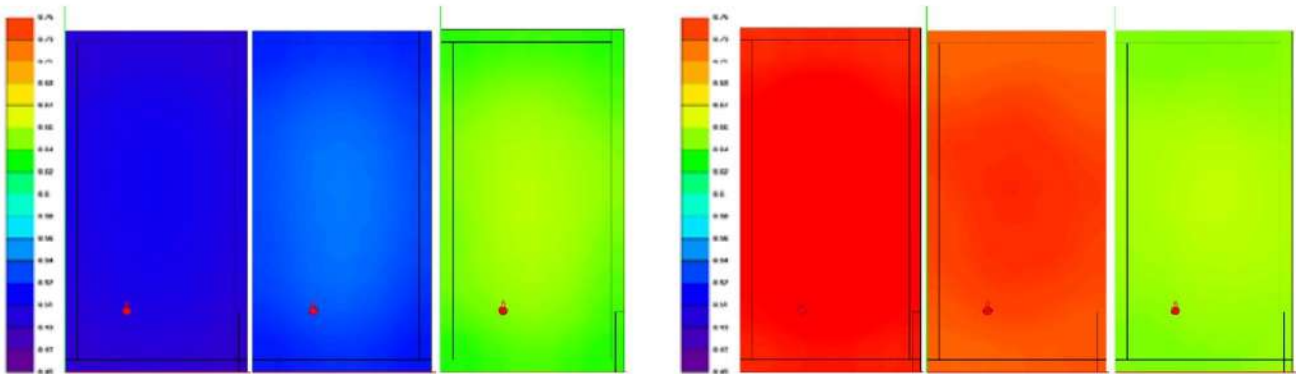


fig. 12 - Tempo di riverberazione T20 simulato con il software B – Ambiente 1 (125 Hz - 4000 Hz)

I tempi di riverbero ottenuti sono riportati in Fig. 10 (Ambiente 1) e in Fig. 11 (Ambiente 2). Alcune mappe di distribuzione dei valori di T20 nell'ambiente sono riportate in Fig. 12 (Ambiente 1 - software B) e Fig. 13 (Ambiente 2 - software B).

Si può notare una sottostima del tempo di riverberazione simulato rispetto a quello misurato. In particolare, le formule Sabine ed Eyring non sono utilizzabili per stanze di questo tipo. I valori simulati ottenuti risultano essere circa la metà di quelli misurati. Anche i risultati ottenuti con il modello EN 12354-6 e con il software di calcolo risulta no inferiori a quelli misurati, in

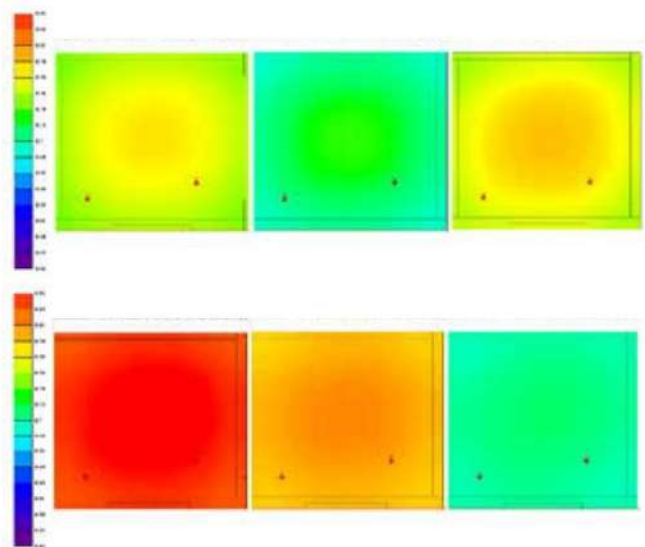


fig. 13 - Tempo di riverberazione T20 simulato con il software B – Ambiente 2 (125 Hz - 4000 Hz)

particolare, per l'ambiente 1, la migliore stima è rappresentata dalla EN 12354-6 fino a 1000 Hz e dal software A oltre 1000 Hz. Per l'ambiente 2, la migliore stima è rappresentata dal software A, come riportato nelle Figure 14 e 15.

Tale sottostima è probabilmente dovuta a una sovrastima dei coefficienti di assorbimento ottenuti in camera riverberante secondo la norma ISO 354. Ciò è dovuto al campo sonoro non perfettamente diffuso e alla modifica dell'MFP, dovuto ai diffusori appesi al soffitto della camera riverberante, rispetto a quello previsto dalla formula di Sabine contenuta nel metodo di misura.

Secondo Scrosati et al. (2019), l'MFP della camera riverberante vuota analizzata passa da 3.853 m (senza diffusori) a 3.377 m (con diffusori), mentre con provino l'MFP varia da 3.750 m (senza diffusori) a 3.295 m (con diffusori). Il valore statistico calcolato per questa camera riverberante è risultato invece di 3.810 m. Modificando la formula Sabine della norma ISO 354 con la corretta MFP specifica per questa camera riverberante, gli autori hanno riscontrato un coefficiente di assorbimento inferiore di circa il 20-23% rispetto a quello misurato secondo la norma ISO 354.

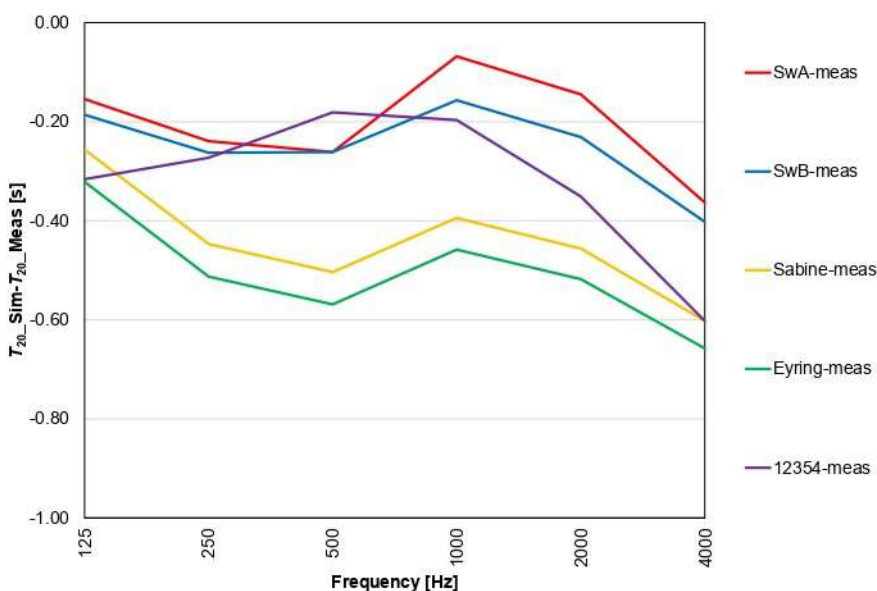


fig. 14 - Differenza fra tempo di riverberazione T20 simulato e misurato (Ambiente 1)

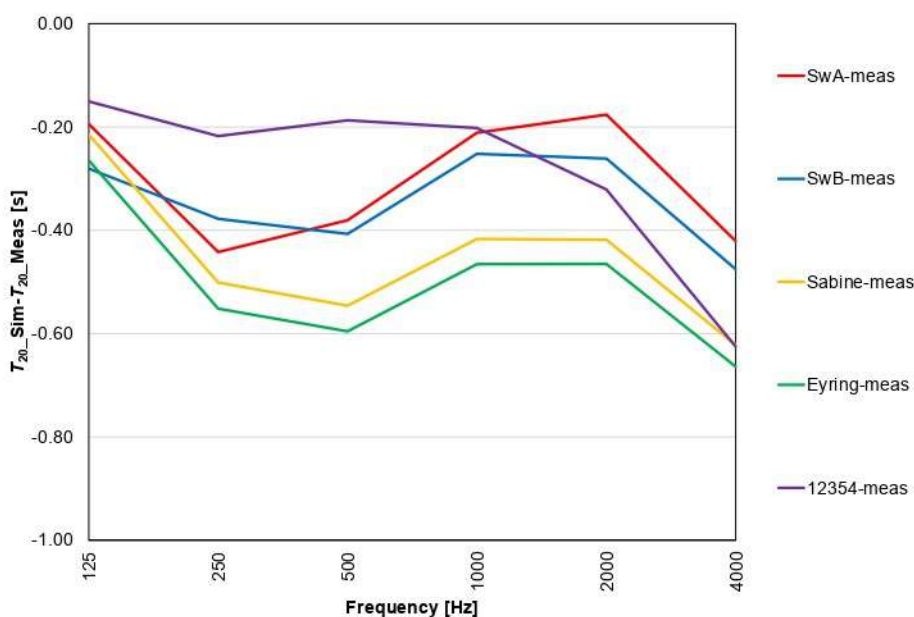


fig. 15 - Differenza fra tempo di riverberazione T20 simulato e misurato (Ambiente 2)

Conclusioni

In questo lavoro è stata considerata la simulazione acustica del tempo di riverbero di due ambienti di piccole dimensioni con volumi di 56,2 m³ e 113,5 m³. Questi ambienti presentano pannelli fonoassorbenti solo sul soffitto; pertanto, non risultano avere un assorbimento omogeneo.

Sono state confrontate le equazioni di Sabine ed Eyring, il modello standard EN 12354-6 e due software per acustica architettonica.

È stato possibile notare come tutti i modelli di calcolo esaminati portino ad una sottostima del tempo di riverberazione. In particolare, i modelli Sabine ed Eyring non sono adatti a questo tipo di ambiente.

Risultati migliori sono stati ottenuti utilizzando software basati su ray-tracing e pyramid-tracing e sul modello di calcolo basato sulla norma EN 12354-6. Tuttavia, anche in questo caso il tempo di riverberazione è sottostimato.

Una possibile spiegazione di questo fenomeno è la sovrastima dei coefficienti di assorbimento ottenuti in camera riverberante, secondo la norma ISO 354, dovuta al campo sonoro non perfettamente diffuso e alla presenza dei diffusori appesi al soffitto. Questi modificano il volume effettivo della camera riverberante e il percorso libero medio rispetto a quello previsto dalla formula di Sabine.

Si consiglia pertanto di ridurre i valori dei coefficienti di assorbimento acustico almeno del 20 % nella progettazione acustica di ambienti. **E**

* Nicola Granzotto. Dottore di Ricerca in Fisica Tecnica. Progetto Decibel S.r.l.

* Paolo Ruggeri. Dottore di Ricerca in Fisica Tecnica. Laboratorio di Fisica Tecnica Ambientale. Università IUAV di Venezia.

* Fabio Peron. Professore Ordinario di Fisica Tecnica Ambientale. Università IUAV di Venezia.

* Marco Caniato. Dottore di Ricerca in Fisica Tecnica. Facoltà di Ingegneria, Libera Università di Bolzano.

* Andrea Gasparella. Professore Ordinario di Fisica Tecnica. Facoltà di Ingegneria, Libera Università di Bolzano.

Bibliografia

12354-6:2006 Building acoustics - Estimation of acoustic performance of buildings from the performance of elements - Part 6: Sound absorption in enclosed spaces.

ISO 10534-2:1998, Acoustics – Determination of sound absorption coefficient and impedance in impedance tubes – Part 2: Transfer-function method.

ISO 354:2003, Acoustics – Measurement of sound absorption in a reverberation room.

ISO 3382-2:2008, Acoustics — Measurement of room acoustic parameters — Part 2: Reverberation time in ordinary rooms.

Meissner, M. 2017. “Acoustics of small rectangular rooms: Analytical and numerical determination of reverberation parameters.” *Applied Acoustics* 120: 111-119. doi: <https://doi.org/10.1016/j.apacoust.2017.01.020>

Nowoświat, A., M. Olechowska, and J. Ślusare. 2016. “Prediction of reverberation time using the residual minimization method.” *Applied Acoustics* 106: 42-50. doi: <https://doi.org/10.1016/j.apacoust.2015.12.024>

Nowoświat, A., and M. Olechowska. 2022. “Experimental Validation of the Model of Reverberation Time Prediction in a Room.” *Buildings* 12(3): 347. doi: <https://doi.org/10.3390/buildings12030347>

Prato, A., E. Casassa, and A. Schiavi. 2016. “Reverberation time measurements in non-diffuse acoustic field by the modal reverberation time.” *Applied Acoustics* 110: 160–169. doi: <https://doi.org/10.1016/j.apacoust.2016.03.041>

Scrosati, C., F. Scamoni, M. Depalma, and N. Granzotto. 2019. “On the diffusion of the sound field in a reverberation room.” *Proceedings of the 26th International Congress on Sound and Vibration, ICSV 2019*.