



LA MISURA DELL'ASSORBIMENTO ACUSTICO CON DIVERSE METODOLOGIE: CAMERA RIVERBERANTE, METODI IMPULSIVI E TUBO A ONDE STAZIONARIE

Paolo Guidorzi (1), Luca Barbaresi (1), Massimo Garai (1)

1) Dipartimento di Ingegneria Energetica, Nucleare e del Controllo Ambientale (DIENCA), Università di Bologna

1. Introduzione

Nel presente lavoro vengono presentati i risultati di una serie di misure comparative del coefficiente di assorbimento acustico α in camera riverberante (con i metodi del rumore stazionario interrotto e dell'integrazione inversa di Schroeder di risposte impulsive misurate con segnali MLS e Swept-Tone), con metodo a riflessione (utilizzando segnali MLS e Swept-Tone) e nel tubo a onde stazionarie. Saranno evidenziate le difficoltà, i vantaggi, gli svantaggi e le differenze tra le misure ottenute mediante le differenti tecniche.

Per una trattazione approfondita dei metodi di misura qui trattati si rimanda alle rispettive normative di riferimento [1][2][3] e ai lavori citati in bibliografia. Saranno qui esaminati alcuni aspetti specifici dei metodi in esame che li caratterizzano e differenziano tra loro.

2. Misura nel tubo a onde stazionarie

2.1 Descrizione della metodologia

La misura nel tubo di Kundt, o tubo a onde stazionarie, era fino a pochi anni fa l'unica tecnica per la valutazione dell'assorbimento a incidenza normale di un materiale.

Ne esistono molte varianti; la seconda parte della normativa ISO 10534 [3] descrive un metodo per trovare direttamente il coefficiente di riflessione complesso (e da questo il coefficiente di assorbimento) a partire dal calcolo della funzione di trasferimento tra 2 microfoni posti a una distanza nota sul fianco del tubo. In questo lavoro la misura nel tubo a onde stazionarie è stata effettuata secondo questo metodo.

2.2 Limiti di frequenza

L'ipotesi fondamentale di funzionamento del metodo è la sola presenza di un'onda piana, al fine di valutare correttamente il rapporto tra massimo e minimo dell'onda stazionaria. Questa ipotesi è strettamente legata alla lunghezza del tubo, al suo diametro e alla distanza tra i 2 microfoni di misura.

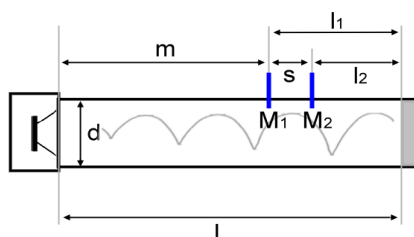


Figura 1 – Tubo a onde stazionarie per la misura con la funzione di trasferimento

Con riferimento alla figura 1, è necessario che sia $m_{min} = 3d$ m e $l_{2min} = 2d$ m. Il diametro del tubo è strettamente legato al limite superiore di frequenza ammissibile per la misura. Si ha che $f_{sup} < 0,58c_0 / d$ Hz, essendo c_0 la velocità del suono e d il diametro del tubo. Inoltre anche la distanza tra i microfoni s e il diametro delle capsule microfoniche sono legate ai limiti inferiore e superiore di frequenza secondo le seguenti relazioni: $s_{max} = 0,45c_0 / f_{sup}$ m; $s_{min} = 0,05c_0 / f_{inf}$ m; s_{min} deve essere maggiore o uguale a cinque volte il diametro delle capsule microfoniche. Il tubo a onde stazionarie utilizzato per queste prove presenta un range di misura tra 100 e 2000 Hz, ottenuto grazie a due posizioni del microfono M1, distante da M2 (parametro s) rispettivamente 7 e 17,5 cm.

2.3 Difficoltà di esecuzione della misura e analisi dei costi/benefici

La misura nel tubo a onde stazionarie presenta alcuni seri svantaggi. Il principale è la necessità di tagliare un provino del materiale da testare. Un taglio molto accurato del provino è essenziale per ottenere risultati validi. Inoltre non tutti i materiali sono adatti a questo tipo di prova, che va eseguita in laboratorio. Per eliminare gli effetti relativi al fondello riflettente del tubo, sul quale è posto il campione di prova, è necessario normalizzare la misura rispetto a una misura di riferimento effettuata a tubo vuoto.

Si tratta di un metodo affidabile e che presenta risultati ripetibili ma l'apparecchiatura per la misura, richiedendo tolleranze minime, risulta relativamente costosa. Per un esempio di risultati di misure si veda il punto 5.

3. Misura con metodo a riflessione

3.1 Descrizione della metodologia

La metodologia utilizzata segue le direttive della normativa ISO 13472-1 [2]. Questo sistema permette di misurare il coefficiente di assorbimento di un materiale *in situ*, tipicamente un asfalto. Una sorgente (altoparlante e relativa cassa acustica) viene sospesa sopra al materiale da testare; tra la sorgente e la superficie è posto un microfono. Il metodo consiste nella misura e analisi della risposta impulsiva composta del sistema. Riferendosi al caso di incidenza normale, la risposta impulsiva, ricostruita da segnali MLS o Swept-Tone, presenta un primo picco, corrispondente all'arrivo del

suono che parte dalla sorgente e giunge al microfono (riferendosi alla figura 2, dopo aver percorso una distanza $H-h$). Questo primo picco contiene solamente informazioni spettrali relative al sistema di misura altoparlante-microfono-elettronica di supporto.

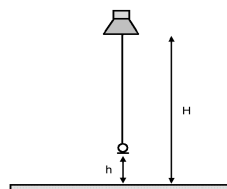


Figura 2 – Configurazione di prova per la misura a riflessione

L'onda sonora, quindi percorre un'ulteriore cammino $2h$, dopo essere stata riflessa dal materiale in prova, generando un secondo picco (sovrapposto alla coda del primo), il quale è stato però *filtrato* dal materiale in prova; quindi dall'analisi e rapporto del contenuto spettrale delle due risposte impulsive, opportunamente finestrate, si ricavano le informazioni sull'assorbimento del materiale in funzione della frequenza. L'impulso diretto viene misurato separatamente puntando il sistema altoparlante-microfono (tra loro solidali e quindi alla stessa distanza) verso lo spazio aperto, ottenendo quindi una risposta *in campo libero* più lunga e non contaminata da riflessioni per un certo intervallo temporale utile (si veda figura 8). Inoltre viene implementata una tecnica di sottrazione nel dominio del tempo dell'onda diretta dalla risposta composita diretta-riflessa. In questo modo si ottiene una risposta riflessa priva della contaminazione della coda della risposta diretta, e quindi contenente solamente informazioni riguardanti l'assorbimento energetico del materiale in prova.

Il materiale in prova, 16 m^2 di fibra di poliestere, è stato appoggiato per la misura su un pavimento altamente riflettente. L'altoparlante è stato appeso a $1,5 \text{ m}$ dal pavimento e la distanza tra il piano frontale dell'altoparlante e il microfono è stata fissata a $1,25 \text{ m}$. È stata effettuata solamente la misura per incidenza normale.

In figura 3 sono visibili le risposte impulsive diretta e riflessa sul materiale di prova.

In figura 4 è visibile la risposta *diretta*, ovvero la risposta impulsiva ottenuta ruotando il sistema altoparlante-microfono verso lo spazio aperto, mantenendo la stessa distanza relativa di $1,25 \text{ m}$ tra gli stessi.



Figura 3 – Risposta impulsiva diretta e riflessa del materiale in prova

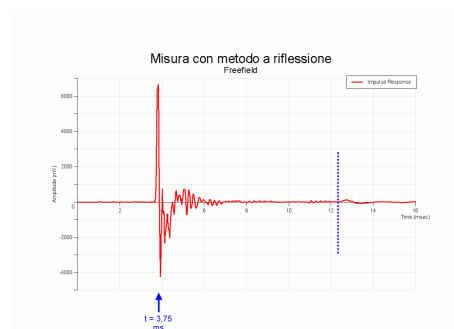


Figura 4 – Risposta in campo libero

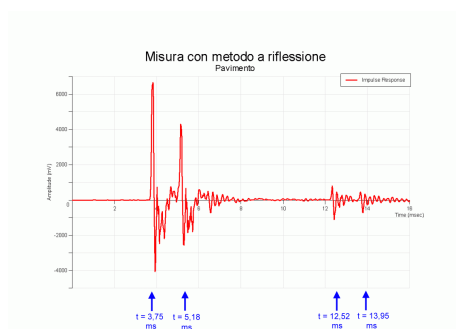


Figura 5 – Risposta impulsiva diretta e riflessa del pavimento

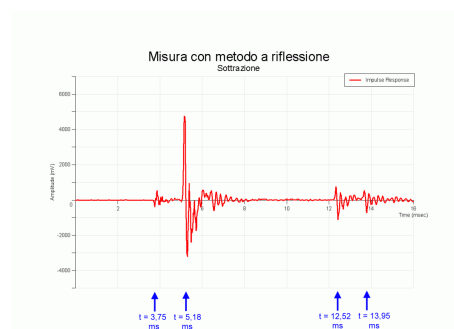


Figura 6 – Risposta del pavimento dopo la sottrazione

In figura 5 si osserva la risposta composta diretta e riflessa dal pavimento rigido sul quale la fibra di poliestere era appoggiata e in figura 6, a titolo di esempio, il risultato della sottrazione nel dominio del tempo della risposta riflessa dal pavimento con la risposta diretta. La finestra di analisi utilizzata per isolare le parti utili degli impulsi da analizzare nel dominio della frequenza è la finestra *Adrienne* di lunghezza fissa (della parte piatta più la coda smorzante) di 7,4 ms (o 7,9 ms considerando anche la parte di inviluppo iniziale). Nelle figure 3, 5 e 6 sono chiaramente visibili due picchi agli istanti temporali $t = 12,52$ ms e $t = 13,95$ ms, corrispondenti all'onda di ritorno riflessa sulla parete dell'altoparlante e nuovamente ricevuta al microfono e riflessa dal materiale in prova, ovvero corrispondente a un percorso di $2H+(H-h)$ m. Questa riflessione rappresenta l'estremo destro di analisi della risposta riflessa.

3.2 Limiti di frequenza

Il limite inferiore di frequenza dipende da vari fattori, che includono la dimensione del campione in prova, le distanze tra sorgente, microfono e campione e la larghezza e tipo di finestra temporale di analisi utilizzata per analizzare la risposta diretta e riflessa.

La parte di superficie sottostante all'altoparlante interessata dalla misura, nel caso di incidenza normale, è un disco di raggio:

$$(1) \quad r = \frac{1}{H+h+cT_w} \sqrt{\left(H+h+\frac{cT_w}{2}\right)\left(H+\frac{cT_w}{2}\right)(2h+cT_w)cT_w} \quad [\text{m}]$$

essendo c la velocità del suono e T_w la larghezza della finestra temporale utilizzata per isolare le risposte impulsive dirette e riflesse. Nel presente caso, avendo $H=1,5$ m, $h = 0,25$ m e $T_w = 7,4$ ms, si ottiene che $r = 1,8$ m e quindi la superficie quadrata di 16 m² soddisfa i requisiti richiesti.

La lunghezza temporale della finestra di analisi dunque, fissata la distanza di altoparlante e microfono dalla superficie in prova, determina il raggio della superficie minima richiesta per la misura. La lunghezza della finestra temporale, però, determina anche la minima frequenza valida analizzabile, ovvero la risoluzione *vera* dell'analisi nel dominio della frequenza secondo la nota relazione $f_{min} \approx 1 / T_w$. Nel caso corrente si ottengono risultati validi a partire dalla banda di terzo d'ottava di 200 Hz.

Il limite di frequenza superiore dipende, in prima approssimazione, dalle irregolarità della superficie. Da simulazioni numeriche effettuate, Anfosso-Lédée [14] ha trovato che se c è la velocità del suono ed e la profondità caratteristica delle irregolarità in metri, si ha $f_{max} = c / 4e$ Hz.

3.3 Difficoltà di esecuzione della misura e analisi dei costi/benefici

Una possibile problema è l'eventuale discrepanza tra la forma dell'onda diretta misurata in campo libero (figura 8) e la misura della stessa quando l'altoparlante è puntato verso il materiale da testare (figura 9). Le differenze possono derivare da variazioni di temperatura tra le due misure, vento e condizioni non perfettamente stazionarie o dalla diversa tensione dei bracci reggi-microfono nelle due posizioni.

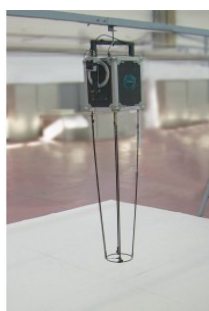


Figura 7 – Altoparlante e microfono

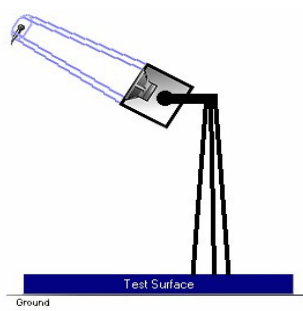


Figura 8 – Misura in campo libero

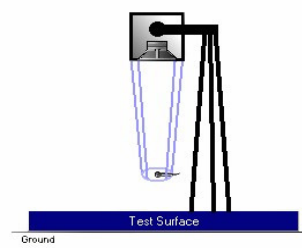


Figura 9 – Misura sul materiale

Un piccolo residuo di segnale prima dell'impulso riflesso dopo la sottrazione (figura 6) evidenzia queste differenze, che però non pregiudicano il buon esito della misura.

Se non sono stati commessi grossi errori di posizionamento, il valore assoluto dell'errore sul coefficiente di assorbimento può essere stimato nel seguente modo [9]:

$$(2) \quad \Delta\alpha = \sqrt{\left(\frac{\partial\alpha}{\partial P_i}\right)^2 (\Delta P_i)^2 + \left(\frac{\partial\alpha}{\partial P_r}\right)^2 (\Delta P_r)^2} = \sqrt{\left(2\frac{1}{K_r^2} \frac{P_r^2}{P_i^3}\right)^2 (\Delta P_i)^2 + \left(2\frac{1}{K_r^2} \frac{P_r}{P_i^2}\right)^2 (\Delta P_r)^2} = [\%]$$

$$= \sqrt{\left(2\frac{1}{K_r^2} \frac{\Delta P_i}{P_i} \frac{P_r^2}{P_i^2}\right)^2 + \left(2\frac{1}{K_r^2} \frac{\Delta P_r}{P_r} \frac{P_r^2}{P_i^2}\right)^2} = 2(1-\alpha) \sqrt{\left(\frac{\Delta P_i}{P_i}\right)^2 + \left(\frac{\Delta P_r}{P_r}\right)^2}$$

dove P_r e P_i sono i valori assoluti delle ampiezze della pressione complessa delle onde riflessa e diretta (calcolate a partire dalle trasformate di Fourier dell'onda riflessa e diretta rispettivamente) e K_r è un fattore di correzione della divergenza sferica [2]. Ad esempio considerando un errore dell'1% sulla misura dell'ampiezza dell'onda incidente e del 5% sull'onda riflessa, si può calcolare un errore assoluto massimo su α di 0,1.

Vento o sorgenti di rumore influenzano in minima parte la misura col metodo MLS. L'errore assoluto massimo sulla misura di α imputabile a tali cause si riduce facilmente sotto lo 0,01%, e risulta quindi trascurabile rispetto ad altri fattori [17].

Con un'accurata equalizzazione della catena di misura si hanno risultati validi in alta

frequenza fino a 10 kHz e oltre. Si giunge a questo risultato grazie al restringimento dell'impulso corrispondente all'onda diretta, come mostrato in figura 10.

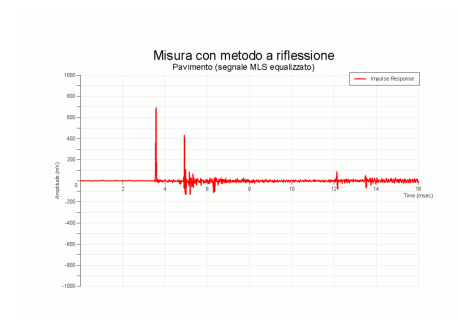


Figura 10 - Risposta impulsiva diretta e riflessa del pavimento riflettente dopo l'equalizzazione della catena di misura

4. Misura in camera riverberante

4.1 Descrizione della metodologia

La misura in camera riverberante è il metodo più antico e conosciuto di misura del coefficiente di assorbimento. Ma purtroppo a tutt'oggi, dopo oltre un secolo di sperimentazioni, esistono ancora seri dubbi sulla sua ripetibilità e affidabilità, riportate pure nella normativa ISO 354, che ne descrive la metodologia: “*The reproducibility of absorption coefficient measurement is still under investigation*” [1]. Le ragioni della scarsa riproducibilità del metodo sono note: la formula di Sabine parte dal presupposto di campo sonoro perfettamente diffuso, ma questa ipotesi nella pratica è molto difficile da ottenere. Inoltre secondo la formula di Sabine una stanza perfettamente assorbente, con tempo di riverberazione nullo, richiederebbe un coefficiente di assorbimento infinito, cosa ovviamente non fisicamente possibile. È noto poi che l'utilizzo della formula di Sabine per misure di assorbimento in camera riverberante può portare facilmente valori maggiori di 1, altro fatto non fisicamente ammissibile. Eyring per primo nel 1930 [4] e successivamente altri studiosi (Millington, Kuttruff, Arau-Puchades, Fitzroy e Pujolle, solo per citarne alcuni) hanno proposto miglioramenti alla formula di Sabine [10]. La questione su quale formula usare rimane però ancora controversa dato che le assunzioni di Sabine ed Eyring sul campo sonoro all'interno della camera riverberante sono diverse, ma in una stanza reale nessuna di queste due condizioni è completamente verificata [4] e i valori ottenuti dalle due formule sono simili solo quando l'assorbimento è basso [6]. Si deve quindi concludere che i valori ottenuti in una certa camera riverberante sono influenzati dalle caratteristiche della camera stessa e dai valori del coefficiente di assorbimento misurati, ovvero dalla diffusività del campo sonoro. Simulazioni numeriche [15] hanno confermato questo dato sperimentale. Un problema ulteriore del metodo di misura in camera riverberante è l'effetto di bordo sugli spigoli del campione, già noto dagli anni '60 [8]. Sono stati proposti metodi per valutare ed eliminare tale effetto [18] [16], ma rendono complicata e laboriosa la procedura di misurazione. Entrambi i problemi sopra citati, non perfetta diffusività e effetto di bordo, portano a una sovrastima dei valori di assorbimento.

Altri fattori secondari quali l'assorbimento del suono da parte dell'aria e il posizionamento del campione [11] sono stati tenuti in conto durante le misure.

4.2 Limiti di frequenza

La validità della misura di α in campo diffuso si basa su una trattazione statistica della distribuzione del campo acustico nell'ambiente. Una frequenza limite sopra alla quale la distribuzione della pressione può essere considerata una variabile aleatoria è la cosiddetta frequenza di Schroeder [5] [7]. Questa frequenza può essere considerata il limite inferiore di validità della misura effettuata in camera riverberante.

La valutazione di un limite di frequenza superiore è più difficoltosa, e ancora risultati certi non sono stati trovati, sempre fatta salva l'ipotesi di campo diffuso.

4.3 Difficoltà di esecuzione della misura e analisi dei costi/benefici

Le misure presentate in questo lavoro sono state effettuate in una camera riverberante di ridotte dimensioni, inferiori a quanto prescritto dalla norma [1]. Il volume di 54 metri cubi e i tempi di riverberazione rilevati hanno determinato una frequenza di Schroeder di circa 350 Hz, e quindi la minore banda di 1/3 di ottava valida per la misura risulta quella centrata a 400 Hz. Il materiale era lo stesso già provato con il metodo a riflessione.

Le misure del tempo di riverberazione, con e senza campioni assorbenti, sono state effettuate contestualmente col metodo della sorgente di rumore stazionario interrotto e con integrazione all'indietro di risposte impulsive misurate con metodo MLS e Swept-Tone. I diversi metodi sono risultati entrambi affidabili e i valori misurati di tempo di riverberazione e del coefficiente di assorbimento sono risultati simili.

Per mantenere il campo all'interno della camera il più possibile diffuso, la quantità di materiale in prova (altamente assorbente) è stata ridotta a 4 m². Sono state eseguite misure su 2 posizioni della sorgente e su 6 posizioni del microfono.

La misura in camera riverberante, in conclusione, si è rivelata la più difficoltosa, in termini di ripetibilità dei risultati ottenuti. La forte dipendenza delle misure ottenute dalla specifica camera acustica rende difficile ogni ulteriore considerazione su questo metodo.

5. Risultati delle misure effettuate

Dal metodo in camera riverberante si ricava un coefficiente di assorbimento statistico; il metodo di misura nel tubo a onde stazionarie permette solo la misura a incidenza normale; il metodo a riflessione permetterebbe la misura a diverse angolazioni ma la superficie disponibile di materiale di 16 m² non ha permesso di effettuare misure ad incidenza non normale non essendo sufficiente la superficie attiva.

Dalle considerazioni precedenti e nelle configurazioni descritte, i dati ottenuti con i metodi utilizzati sono validi nei seguenti intervalli di frequenze:

- misura nel tubo a onde stazionarie: 100 – 2000 Hz
- misura con metodo a riflessione: 200 – 5000 Hz
- misura in camera riverberante: 400 – 5000 Hz

Le misure sono state effettuate su un materiale assorbente fibroso e localmente reagente, il Fiberform 62T, spesso 40 mm e di densità 40 Kg/m³.

In figura 11 sono mostrate le misure del coefficiente di assorbimento per incidenza normale del Fiberform col metodo a riflessione e nel tubo di Kundt. Nel grafico vengono anche affiancati i valori ottenuti dal modello MI [12] [13]. Si osserva un'ottima coincidenza tra i risultati delle due metodologie e con il modello teorico. Unico difetto che si nota nella misura con il metodo a riflessione è la sottostima alle basse frequenze (nelle bande a 250 e 200 Hz). In questa misura il segnale MLS non è stato equalizzato.

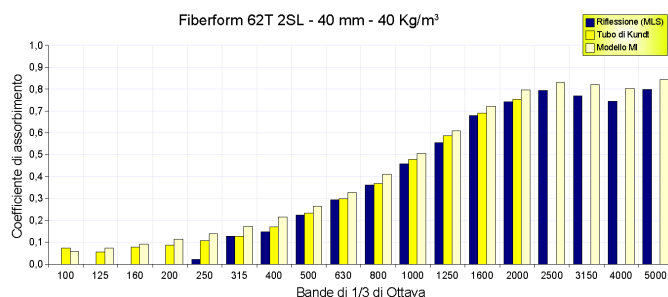


Figura 11 – Fiberform, misure con metodo a riflessione, nel tubo di Kundt e modello matematico

In figura 12 sono visibili varie misure effettuate con il metodo a riflessione. La prima è stata effettuata con il segnale MLS non equalizzato. Per la seconda e la terza è stato impiegato il segnale Swept-Tone, rispettivamente in versione lineare e logaritmica. Si nota che i coefficienti di assorbimento calcolati a partire da queste misure sono sostanzialmente identici.

Nello stesso grafico sono mostrate le stesse misure per le quali però si è effettuata un'equalizzazione del segnale MLS. La quarta ha previsto un'equalizzazione effettuata utilizzando un equalizzatore grafico digitale ed operando manualmente al fine di eliminare per quanto possibile le non linearità più marcate della risposta in frequenza dell'altoparlante. La quinta invece è stata ottenuta da un'equalizzazione “forza bruta”, ovvero invertendo lo spettro della risposta diretta. Le onde diretta e riflessa di quest'ultimo caso sono quelle rappresentate in figura 10. Si nota nel coefficiente di assorbimento ricavato con i segnali equalizzati un miglioramento in bassa frequenza, ovvero i valori delle bande 200 Hz e 250 Hz non sono più nulli (o negativi) come negli altri casi.

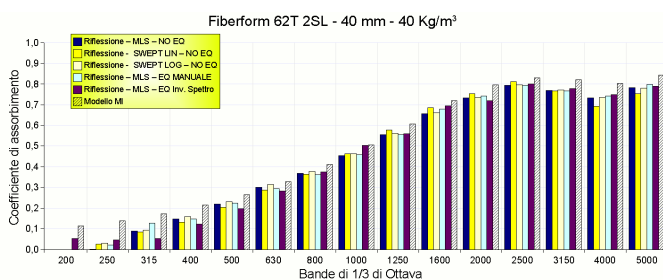


Figura 12 – Fiberform, varie modalità di misure con metodo a riflessione

In figura 13 sono mostrati i valori del coefficiente di assorbimento per incidenza normale misurati col metodo a riflessione e i valori di α diffuso misurati in camera riverberante. Si notano chiaramente i problemi di sovrastima discussi in precedenza del coefficiente calcolato con la formula di Sabine, seguendo le indicazioni della norma ISO 354, dovuti alla non perfetta diffusività del campo e all'effetto di bordo. I risultati appaiono validi, e del tutto conformi a quelli forniti dal produttore e misurati in una camera delle dimensioni richieste dalla norma [1]. In alta frequenza si nota un buon accordo tra i due metodi, va detto però che si stanno confrontando un coefficiente per incidenza normale e quello di Sabine, operazione non del tutto corretta. È stato

effettuato un tentativo di conversione di α normale nella versione diffusa (essendo il materiale localmente reagente), ma i risultati non sono stati soddisfacenti.

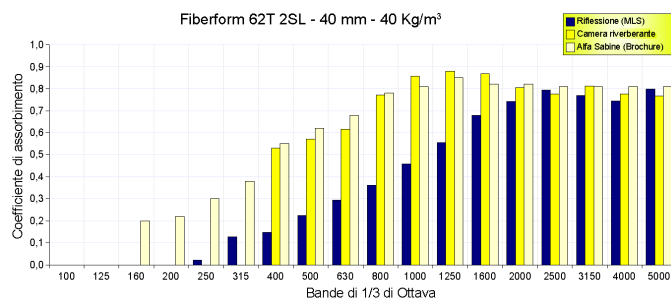


Figura 13 – Fiberform, misure con metodo a riflessione e in camera riverberante

In figura 14 sono mostrati i coefficienti di assorbimento misurati in camera riverberante con vari metodi: MLS, Swept-tone e rumore stazionario interrotto. Gli andamenti sono simili (praticamente identici per quanto riguarda MLS e Swept-Tone) anche se si nota una leggera sottostima nel caso del rumore stazionario interrotto. La spiegazione di questo fenomeno richiederà maggiore investigazione.

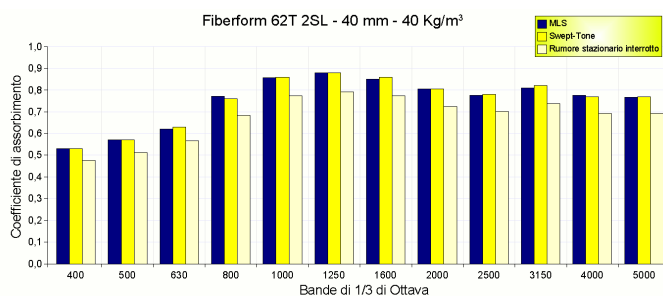


Figura 14 – Fiberform, misure in camera riverberante con diversi metodi

6. Conclusioni

I risultati delle misure del coefficiente di assorbimento con i metodi presentati hanno portato alla conferma delle premesse teoriche citate. Nelle misure comparate si è osservato un lieve incremento nel rapporto Segnale/Rumore quando si è utilizzato il segnale Swept-tone rispetto al segnale MLS, e questo è risultato ben osservabile nella coda di decadimento della curva di Schroeder calcolata nelle misure di tempo di riverberazione, ma nonostante questo fatto, i valori del coefficiente di assorbimento nei due casi sono risultati praticamente identici. Le misure in camera riverberante hanno portato i risultati attesi, e confermato la scarsa ripetibilità di tale tipo di misura.

Bibliografia

- [1] ISO 354, Measurement of sound absorption in a reverberation room, 2003
- [2] ISO 13472-1, Measurement of sound absorption properties of road surfaces *in situ* – Part 1: Extended surface method
- [3] ISO 10534-2, Determination of sound absorption coefficient and impedance in

- impedance tubes – Part 2: transfer-function method
- [4] Beranek L., “Analysis of Sabine and Eyring equations and their application to concert hall audience and chair absorption”, *J. Acoust. Soc. Am.*, **120**, 2006.
 - [5] Schroeder M., “The ‘Schroeder frequency’ revisited”, *J. Acoust. Soc. Am.*, **99**, 1996, pp. 3240-3241.
 - [6] Sum K.S., “Some comments on Sabine absorption coefficient (L)”, *J. Acoust. Soc. Am.*, **117**, 2005, pp. 486-489.
 - [7] Nélisse H., Nicolas J., “Characterization of a diffuse field in a reverberant room”, *J. Acoust. Soc. Am.*, **101**, 1997, pp. 3517-3524.
 - [8] Kosten C.W., “International Comparison Measurements”, *Acustica*, **10**, 1960.
 - [9] De Geetere L., “Analysis and improvement of the experimental techniques to assess the acoustical reflection properties of boundary surfaces” [dissertation]. Leuven: K.U.Leuven; 2004 [ISBN 90-5682-498-8]
 - [10] Ducourneau J., Planeau V., “The average absorption coefficient for enclosed spaces with non uniformly distributed absorption”, *Appl. Acoust.*, **64**, 2003.
 - [11] Cops A., Vanhaecht J., Leppens K., “Sound Absorption in a Reverberation Room: Causes of Discrepancies on Measurement Results”, *Appl. Acoust.*, **46**, 1995, pp. 215-232.
 - [12] Garai M., Pompoli F., “A simple empirical model of polyester fibre materials for acoustical applications”, *Appl. Acoust.*, **66**, 2005, pp 1383-1398.
 - [13] Garai M., Pompoli F., “Un modello matematico delle caratteristiche acustiche di materiali in fibra di poliestere”, *Atti del 29° Convegno Nazionale dell'Associazione Italiana di Acustica*, Ferrara, 12-14 giugno 2002.
 - [14] Anfosso-Lédée F., “Sound absorption of non flat road noise barriers”, *Proc. International Congress INTER.NOISE'97*, Budapest, 25-27 August 1997, Vol.2.
 - [15] Toyoda E., Sakamoto S., Tachibana H., “Effects of room shape and diffusing treatment on the measurement of sound absorption coefficient in a reverberation room”, *Acoust. Sci. & Tech.*, **25**, 2004, pp 255-266.
 - [16] Kawakami F., Sakai T., “Deep-well approach for canceling the edge effect in random incident absorption measurement”, *J. Acoust. Soc. Jpn. (E)*, **19**, 1998.
 - [17] Mommertz E., “Applications of α in-situ measurements in noise control”, *Proceedings Euro-noise 98*, Munich, 4-7 October 1998, p.375-380.
 - [18] Dekker H., “Edge Effect Measurements in a Reverberation Room”, *Journal of Sound and Vibration*, **32**, 1974, pp 199-202.
 - [19] Delany M. E., Bazley E. N., “Acoustics properties of fibrous absorbent materials”, *Appl. Acoust.*, **3**, 1971, pp 105-116.
 - [20] Garai M., Guidorzi P., “Experimental verification of the european methodology for testing noise barriers in situ: Sound Reflection”, *Proceedings of InterNoise 2000* (invited paper), Nice, France, 26-30 August 2000.
 - [21] Garai M., Guidorzi P., “Caratterizzazione in situ delle proprietà riflettenti di barriere acustiche non piate”, *Atti del XXVI Convegno Nazionale AIA*, Torino, 27-29 Maggio 1998.
 - [22] Garai M., Bérengier M., Guidorzi P., L'Hermite Ph., “Procedure for measuring the sound absorption of road surfaces in situ”, *Proceedings of Euro-Noise '98* (invited paper), Munich, Germania, 4-7 Ottobre 1998.
 - [23] Garai M., “Measurement of the sound-absorption coefficient in situ: the reflection method using periodic pseudorandom sequences of maximum length” *Appl. Acoust.*, **39**, 1993, pp 119-139.