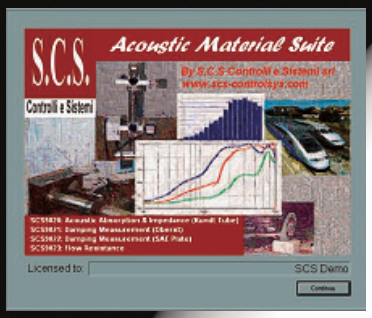
SCS-EUROACOUSTIC

Application Note



MISURA DELLE PROPRIETÀ ACUSTICHE COMPLESSE DI MATERIALI OMOGENEI MEDIANTE RISPOSTA ALL'IMPULSO IN UN TUBO AD ONDE PIANE

Paolo Bonfiglio, Francesco Pompoli, Nicola Prodi
Dipartimento di Ingegneria - Università degli Studi di Ferrara

Il sistema SCS 902A è costituito da una suite di software e di database di materiali su piattaforma di acquisizione a 4 canali (estendibili).

Il sistema consente la misura dei seguenti parametri:

- **Coefficiente di assorbimento** per onde piane (Kundt Methods ISO 10532, ASTM E-1050) Assorbimento acustico ed
- **Impedenza** utilizzando il metodo classico TF (Transfer Function)
- **Assorbimento acustico** utilizzando il nuovo metodo T60 (tempo di riverbero)
- **Transmission Loss** e costante di propagazione mediante l'estensione della misura a 4 microfoni
- **Fattore di smorzamento** (Oberst method) DIN, metodo SAE, normative BS
- **Flow resistance** dei materiali porosi secondo la norma EN 29053
- **Parametro di Tortuosity** con il metodo dell'impedenza elettrica
- **Modulo di compressione e fattore di perdita** (Bulk Elastic Modulus and Damping loss factor) di materiali porosi
- **Isolamento acustico** tra camere riverberanti (ISO 140)
- **Coefficiente di assorbimento acustico statistico** in camera riverberante di piccole dimensioni (ISO 354).

www.scs-controlsys.com

Introduzione

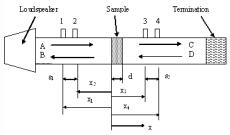
Per la misura delle grandezze acustiche caratteristiche di materiali localmente reagenti sono noti in letteratura differenti metodi di misura, che si basano essenzialmente su due lay-out di prova all'interno di un tubo ad onde piane: metodi con campione su fondo rigido (metodo del doppio spessore [1] e metodo della doppia cavità [2]) e metodi con campione avente entrambi i lati esposti al campo sonoro (metodo della matrice di trasferimento [3], metodo della doppia sorgente [4] e metodo del doppio carico [5]).

Nel presente articolo viene proposta una nuova apparecchiatura di misura basata sulla tecnica della matrice di trasferimento, che consente con una sola misura di risposta all'impulso in 4 posizioni microfoniche di determinare per un dato materiale le grandezze caratteristiche complesse e le proprietà di isolamento. I risultati ottenuti su diversi materiali sono stati confrontati con i metodi teorici e sperimentali noti in letteratura.

Fondamenti Teorici

Determinazione dell'impedenza caratteristica e del numero d'onda complesso per materiali omogenei e localmente reagenti

Il metodo della matrice di trasferimento, descritto in [3], si basa essenzialmente sulla decomposizione delle onde acustiche incidenti e riflesse a monte e a valle di un campione posto in un tubo ad onde piane. Considerando il setup di misura illustrato in figura 1, è possibile mettere in relazione le pressioni acustiche P e le velocità delle particelle V ai due capi del provino per mezzo di una matrice detta appunto di "trasferimento", in quanto trasferisce il campo acustico da una estremità all'altra del campione.



$$(1)\quad \begin{pmatrix} P \\ V \end{pmatrix}_{x=0} = \begin{pmatrix} \cos K_c d & jZ_c \sin K_c d \\ j \sin K_c d & \cos K_c d \end{pmatrix} \begin{pmatrix} P \\ V \end{pmatrix}_{x=d}$$

dove *d* rappresenta lo spessore del materiale

Si può dimostrare [3] che le pressioni e le velocità delle particelle ai due capi di un provino sono univocamente determinate dalla misura dei contributi delle onde incidente e riflessa a monte e a valle del materiale (A, B, C e D in figura 1). Tali contributi sono calcolati dalla misura delle pressioni complesse alle quattro posizioni microfoniche per mezzo della tecnica della decomposizione.

Inoltre per materiali omogenei, isotropi e localmente reagenti si può assumere la validità delle condizioni di simmetria [6] e reciprocità [7] della propagazione di un'onda sonora e la matrice di trasferimento può essere espressa, in funzione dell'impedenza acustica caratteristica ZC e del numero d'onda complesso kC, nel seguente modo:

Dalla misura delle pressioni acustiche nelle 4 posizioni microfoniche è possibile quindi determinare pressione e velocità delle particelle ai due capi del materiale e, per mezzo del sistema (1), calcolare l'impedenza caratteristica e il numero d'onda complesso.

Determinazione della Transmission Loss

Il set-up di misura illustrato in figura 1 permette anche di determinare il coefficiente trasmissione complesso, e quindi la Transmission Loss di un materiale omogeneo.

Infatti, in relazione alla figura 1, è possibile dimostrare che i coefficienti complessi di riflessione e trasmissione effettivi sono determinati, indipendentemente dal tipo di terminazione, risolvendo il sistema:

$$(2)\quad \begin{cases} R = R_{eff} + T_{eff} R_1 T \\ T = T_{eff} + R_{eff} R_1 T e^{2jkd} \end{cases}$$

da cui si ottiene:

$$(3)\quad T_{eff} = \frac{T(1 - R \cdot R_1 e^{2jkd})}{1 - (R_1 T)^2 e^{2jkd}} \quad ed \quad R_{eff} = R - T_{eff} \cdot R_1 T$$

avendo definito *R=B/A, T=C/A* e *R1=D/C*.

La *Transmission Loss* è calcolata per mezzo della seguente espressione:

$$(4)\quad TL = 20og\left|\frac{1}{T_{eff}}\right| \quad dB$$

Materiali e metodi

Descrizione dell'apparecchiatura di misura

La strumentazione di misura è costituita da un tubo in alluminio avente un diametro interno di 100 mm. Ad una estremità del tubo è alloggiata una cassa con altoparlante e all'altra una terminazione fonoassorbente. Il materiale viene posto al centro del tubo in un apposito porta-provino. Ai due lati del campione sono posti due coppie microfoniche, distanziate di 50 mm o 100 mm. In figura 2 è riportata un'immagine dell'apparecchiatura a 4 microfoni, confrontata con la versione base (metodo TF) e di alcuni particolari.

La terminazione è costituita da materiale fonoassorbente in fibra di poliestere, con spessore pari a 250 mm e assorbimento acu-

S.C.S.
Noise and Vibration
Measurement and Analysis Systems
Consult and Services for Environment
Consult and Services for Industry
WEB & Information technologies

stico compreso tra 0.6 e 0.9 tra 100 Hz e 300 Hz e assorbimento pari a 1 per frequenze superiori. In analogia alla norma EN ISO 10354-2 il range di validità della misura è compreso tra 100 e 1600 Hz estendibile a bassa frequenza fino a 50 Hz aumentando la spaziatura.

La misura delle pressioni sonore nelle 4 posizioni microfoniche è stata effettuata tramite risposta all'impulso, ottenuta mediante il metodo della sine-sweep esponenziale, in un range di frequenza compreso tra 100 Hz e 1.600 Hz. Il set-up di misura è costituito da 4 microfoni a condensatore da ¼", PC e scheda audio 4 canali. Per la generazione e l'acquisizione dei segnali è stato utilizzato il software Adobe Audition ®, mentre i processi di postelaborazione sono stati effettuati con MatLab ®.

Calibrazione in ampiezza e fase dei microfoni

La procedura di calibrazione in modulo e fase dei 4 microfoni (indicati con 1, 2, 3 e 4) consiste in una serie di due misure incrociate, senza materiale, eseguite in due posi-zioni prefissate (ad esempio P3 e P4 in figura 1), utilizzando le coppie 1-2 e 3-4 separa-tamente. La posizione P3 sia indicata con L, mentre la P4 con R.
Si consideri la misura con il microfono 1 in L e il 2 in R. Le pressioni misurate sono indicate con P1L e P 2R rispettivamente. Scambiando i microfoni si ripete la misura e si normalizza al valore dell'ampiezza della pressione P1L. Le pressioni misurate sono in-dicate con P1R e P2L rispettivamente.
La stessa procedura applicata alla coppia microfonica 3-4, normalizzando al valore dell'ampiezza della pressione P1L, $P_{ic} = \sqrt{P_{iL} \cdot P_{iL}} \quad i = 1,2,3,4$ porta alla determinazione delle pressioni P3L, P4R, P3R, e P4L rispettivamente. Si possono quindi definire quattro pressioni complesse di ca-librazione come:

Per determinare le pressioni microfoniche calibrate in modulo e fase è sufficiente dividere le pressioni misurate nelle 4 posizioni per la relativa pressione di calibrazione.

Risultati sperimentali

Misure di impedenza caratteristica normalizzata e numero d'onda complesso di materiali omogenei

Le misure sperimentali sono state eseguite su differenti tipologie di materiali fibrosi e porosi, al fine di verificare la correttezza dei risultati ottenuti confrontandoli con la tecnica della doppia cavità [2] ed il modello semi-empirico di Delany-Bazley [8].
Nella figura 3 sono illustrati i risultati di impedenza acustica caratteristica normaliz-zata e numero d'onda complesso ottenuti con il metodo della matrice di trasferimento per un materiale in fibra di poliestere di densità 40 kg/m 3 e spessore 40 mm, confrontati con misure eseguite in un tubo ad impedenza B&K 4206, con il metodo della doppia cavità d'aria (30 mm e 130 mm). I dati sperimentali sono inoltre confrontati con i dati ottenuti dal modello semi-empirico di Delany-Bazley, essendo la resistività al flusso del materiale pari a 4600 Ns/m 4.

Come si può notare si è riscontrato un ottimo accordo del metodo della matrice di trasferimento sia con il metodo delle due cavità che con il modello teorico di Delany-Bazley. Si nota in particolare che la tecnica proposta garantisce risultati più vicini al modello teorico rispetto al metodo [2] nel range di frequenze superiori a 1300 Hz.

Misure di Transmission Loss

In figura 4 viene riportata la curva di Transmission Loss di un campione di intonaco (avente densità pari a 2300 Kg/m 3 e uno spessore di 10 mm). A titolo di esempio nello stesso grafico è riportata la curva teorica ottenuta per mezzo della legge di massa.
Inoltre vengono presentati in figura 5 i risultati di Transmission Loss per un sistema non omogeneo costituito da un film rigido di alluminio (spessore 70 µm) e da uno strato di materiale in fibra di poliestere (spessore 50 mm). Le misure sono state effettuate per entrambe i montaggi possibili del campione, ovvero Membrana-Fiberform e viceversa, per verificare il limite di validità della formula (3) nel caso di un sistema altamente disomogeneo.

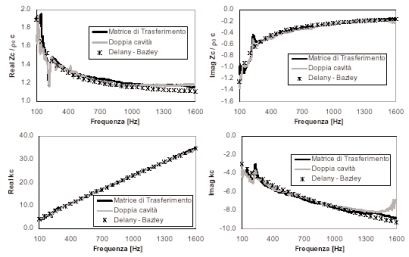


Figura 3 – Impedenza caratteristica normalizzata e numero d'onda complesso per il materiale testato: confronto tra il metodo della matrice di trasferimento, metodo della doppia cavità e il modello di Delany-Bazley

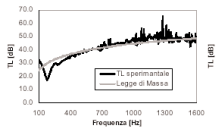


Figura 4 – *Transmission Loss* per un intonaco.

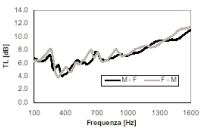


Figura 5 – *Transmission Loss* per un sistema non omogeneo.

È interessante notare come per il campione di intonaco esaminato si è riscontrato un discreto accordo con la legge di massa per incidenza normale nonostante le condizioni di vincolo laterali del campione utilizzati nella prova (strato di gomma). Nel range di frequenze attorno a 200 Hz è possibile osservare una perdita di isolamento riconducibile alla risonanza del sistema. Sempre per lo stesso materiale è necessario evidenziare che per frequenze superiori a 700 Hz la curva di TL mostra un andamento non regolare; tale comportamento è dovuto al basso rapporto S/N alle due estremità del campione. In tale range di frequenze infatti l'isolamento misurato assume valori superiori a 40 dB per cui è necessaria una elevata gamma dinamica del sistema di acquisizione, ottenibile anche per mezzo di una diversa preamplificazione dei segnali microfonici.

Per quanto riguarda la misura sul sistema non omogeneo (Fig. 6) i valori di TL, rela-tivi alle due modalità di montaggio, risultano essenzialmente simili in tutto il range di frequenza. L'approssimazione determinata dall'utilizzo della formula (3) appare pertan-to trascurabile per questo tipo di materiale. Per materiali disomogenei la determinazione di TL può essere più correttamente eseguita tramite il metodo del doppio carico [5] con la stessa apparecchiatura, misurando due volte la risposta all'impulso del sistema con due differenti terminazioni.

Conclusioni

L'apparecchiatura di misura presentata consente la determinazione delle grandezze acustiche caratteristiche di materiali fibrosi e porosi attraverso una singola misura delle risposte all'impulso in quattro posizioni microfoniche. Il confronto con risultati sperimentali ottenuti dal metodo della doppia cavità e dal modello semi-empirico di Delany-Bazley dimostra la validità del metodo proposto.
L'apparecchiatura consente inoltre di determinare il coefficiente di trasmissione complesso e la Transmission Loss di singoli materiali o di sistemi stratificati. Per i materiali testati i risultati dimostrano la validità della procedura di misura. Per i sistemi stratificati i limiti di utilizzo del presente metodo saranno oggetto di ulteriori approfon-dimenti.

Ringraziamenti

Si ringraziano G. Amadasi della Ditta S.C.S Controlli e Sistemi s.r.l e P. Zambusi della AVINTECH s.r.l. per il supporto al progetto. Il sistema è in commercio con la denominazione SCS9020B/TL.

I contenuti della presente Nota applicativa sono tratti da:
P.Bonfiglio, F.Pompoli, N.Prodi, "Misura delle propietà acustiche complesse di materiali omogenei mediante risposta all'impulso in un tubo ad onde piane", Congresso AIA , 15-17 Giugno 2005 - Ancona - Italia

Bibliografia

[1] M. A. Ferrero, G. G. Sacerdote, "Parameters of Sound Propagation in Granular Absorption Materials", Acustica, 1, 135-142 (1951)
[2] H. Utsuno, T. Tanaka, T. Fujikawa, A. F. Seybert, "Transfer Function Method for Measuring Characteristic Impedance and Propagation Constant of Porous Materials", J. Acoust. Soc. Am., 86 (2), 637-643 (1989)
[3] B. H. Song, J. S. Bolton, "A transfer matrix approach for estimating the characteristic impedance and wave numbers of limp and rigid porous materials", J. Acoust. Soc. Am., 107 (3), 1131-1152 (2000)
[4] M. L. Munjal, A. G. Doige, "Theory of a Two Source-location Method for Diract Experimental Evaluation of the Four-pole Parameters of an Aeroacoustic Element", Journal of Sound and Vibration, 141 (2), 323-333 (1990)
[5] T. Y. Lung, A. G. Doige, "A Time-averaging Transient Testing Method for Acoustic Properties of Piping Systems and Mufflers", J. Acoust. Soc. Am., 73, 867-876 (1983)
[6] J.F. Allard, Propagation of Sound in Porous Media. (Elsevier, Applied Science, London and New York, 1993)
[7] A.D. Pierce, Acoustics: An Introduction to its Physical Principles and Applications. (McGraw-Hill, New York, 1981)
[8] M. E. Delany and E. N. Bazley, "Acoustics properties of fibrous absorbent materials", Appl. Acoust., 3, 105-116 (1971).

Sedi operative in: EU, USA, ASIA

Sedi principali:

10051 Avigliana (TO)
Via Gandhi, 13
Tel.:+39.011.9348705
Fax:+39.011.9348703

35011 Campodarsego (PD)
Via Antoniana, 278
Tel.: +39.049.9200975
Fax: +39.049.9201239

Controlli e Sistemi
euroAcoustic
DETES
AvinTech

Rappresentante o sede locale:

www.scs-controlsys.com info@scs-controlsys.com

IL SISTEMA SCS 9020B (SISTEMA KUNDT) PREVEDE 3 CONFIGURAZIONI TRA DI LORO ASSEMBLABILI:

TF - metodo standardizzato e basato sulla misura della Transfer Function tra 2 microfoni (ISO/ASTM);
T60 - nuovo metodo che utilizza la misura del Tempo di Riverbero, meglio adattato per ottenere valori energeticamente corretti in bande di 1/3 d'ottava, per applicazioni nell'edilizia;
TL - metodo per la misura della Transmission Loss e dell'Impedenza caratteristica (Z), direttamente comparabile con altre metodologie standard per la misura della Transmission Loss (ISO 140).
Applicando modelli fisici opportuni è di fatto possibile derivare i singoli parametri uno dall'altro, si deve però tenere in considerazione la propoagazione degli errori e le caratteristiche estremamente eterogenee dei campioni di materiale.