

TECNICHE AVANZATE DI CARATTERIZZAZIONE FISICO-ACUSTICA DI MATERIALI POROSI

Francesco Pompili, Paolo Bonfiglio

MateriAcusticA srl, spin-off company dell'Università di Ferrara

1. Introduzione

La caratterizzazione e modellazione acustica teorica dei materiali porosi e fibrosi assume crescente importanza non solo per la verifica delle loro prestazioni ma anche per la crescente diffusione di sistemi di simulazione (FEM, BEM, SEA) per la progettazione di sistemi complessi che includono tali materiali.

MateriAcusticA svolge, sino dalla sua fondazione, attività di sviluppo di sistemi di misura innovativi per la caratterizzazione dei materiali porosi, sia per quanto riguarda i parametri acustici che definiscono la propagazione del suono nel mezzo, che per la determinazione di parametri fisici del materiale, quali porosità, tortuosità e resistenza al flusso d'aria. Sono state inoltre sviluppate di recente, a livello di ricerca internazionale, tecniche denominate "*inverse*" che consentono, a partire da misure acustiche di diverso tipo, di determinare tramite algoritmi numerici e modelli teorici i parametri fisici del materiale e di conseguenza un modello di propagazione del suono nel mezzo.

Tali strumenti di calcolo, abbinati ad apparecchiature sperimentali, consentono una completa conoscenza del campo acustico nel mezzo e delle motivazioni fisiche che stanno alla base di tali fenomeni.

Nel presente articolo vengono descritte le soluzioni hardware e software sviluppate e commercializzate da MateriAcusticA per uno studio completo delle proprietà dei materiali porosi, unitamente ad alcuni esempi di caratterizzazione che mostrano la validità (e in alcuni casi i limiti) di tale tecnica "*inversa*".

2. Descrizione degli strumenti di caratterizzazione dei materiali porosi

Il sistema di caratterizzazione completo è costituito da una apparecchiatura di misura per la determinazione delle proprietà acustiche caratteristiche del mezzo, e da un software di calcolo che, sulla base delle misure sperimentali consente di calcolare i parametri fisici utili alla modellazione del campo acustico nel mezzo.

2.1 Tubo a tre microfoni per la determinazione delle proprietà caratteristiche del materiale poroso

Il tubo a tre microfoni costituisce in pratica una variante del classico tubo d'impedenza a 2 microfoni (UNI EN ISO 10534-2 [1]), nella quale sul fondo rigido del porta-campione viene inserito un terzo microfono di misura (Figura 1).

Il principio di misura di tale sistema è invece completamente differente da quello della misura dell'impedenza superficiale descritto dalla norma [1] (noto come metodo della funzione di trasferimento); esso si basa sulla teoria della matrice di trasferimento [2], sviluppata inizialmente per misure di TL in tubi d'onde piane a 4 microfoni e modificata in [3] per lo schema di misura in figura 1, tramite la condizione al contorno determinata dalla superficie rigida (velocità delle particelle d'aria nulla).

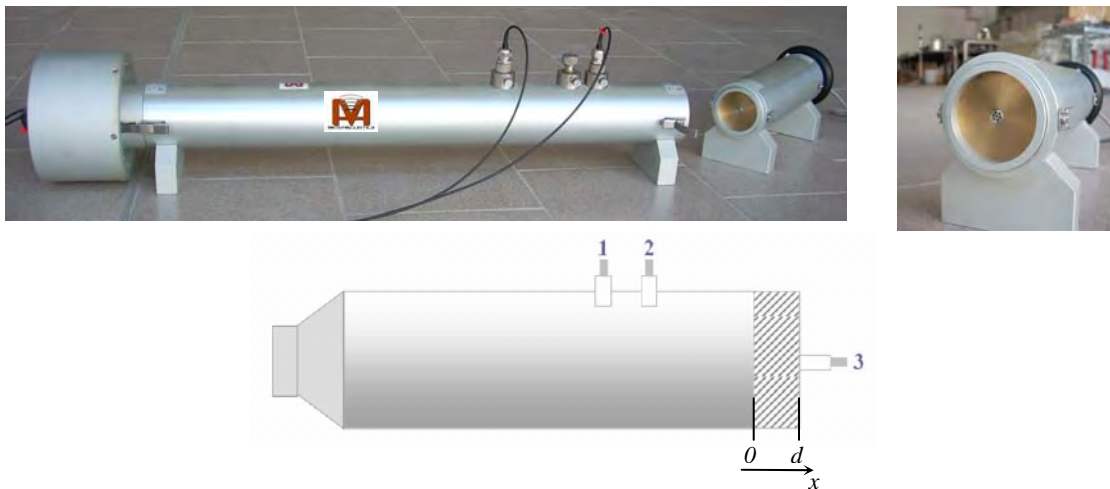


Figura 1: Foto apparecchiatura e schema misura

Con riferimento alla figura 1 si possono scrivere pressione e velocità di particelle sulle due superfici (in $x=0$ e $x=d$) del mezzo, si può infatti scrivere:

$$(1) \quad \begin{pmatrix} p \\ v \end{pmatrix}_{x=0} = \begin{pmatrix} T_{11} & T_{12} \\ T_{21} & T_{22} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} p \\ 0 \end{pmatrix}_{x=d} = \begin{pmatrix} \cos k_c d & iZ_c \sin k_c d \\ \frac{i \sin k_c d}{Z_c} & \cos k_c d \end{pmatrix} \begin{pmatrix} p \\ 0 \end{pmatrix}_{x=d}$$

da cui si ricavano tramite opportuni passaggi [2] le grandezze acustiche caratteristiche della propagazione del suono nel mezzo:

$$(2) \quad Z_c = \sqrt{\frac{T_{12}}{T_{21}}} \quad [\text{Ns/m}^3] \quad \text{e} \quad k_c = \frac{1}{d} \cos^{-1} T_{11} \quad [\text{m}^{-1}]$$

e da queste calcolare l'impedenza superficiale ed il coefficiente di assorbimento acustico per incidenza normale come:

$$(3) \quad Z_s = Z_c \cdot \cot(k_c \cdot d) \quad [\text{Ns/m}^3] \quad \text{e} \quad \alpha_n = \frac{4 \cdot \text{Re}[Z_s] \cdot \rho_0 c_0}{|Z_s|^2 + 2\rho_0 c_0 \cdot \text{Re}[Z_s] + (\rho_0 c_0)^2} \quad [-]$$

dove d [m] è lo spessore del provino, ρ_0 [kg/m³] e c_0 [m/s] la densità e la velocità del suono per il mezzo aria.

Queste grandezze definiscono completamente la propagazione acustica nel mezzo e consentono di calcolare i parametri acustici di qualsiasi spessore di materiale, anche in configurazione multistrato e con presenza di intercapedine d'aria.

E' importante notare che il sistema può essere utilizzato nella configurazione a due microfoni per la misura di impedenza superficiale secondo la norma [1].

Il sistema di misura è composto da:

- un tubo ad onde piane di diametro pari a 45 mm, con posizioni microfoniche tali da consentire misure tra 50 Hz e 4300 Hz;
- 3 microfoni da ¼ di pollice;
- un condizionatore di segnale 3 canali;
- un amplificatore di segnale;
- una scheda di acquisizione National Instrument (o in alternativa una scheda audio professionale) con almeno 3 ingressi ed una uscita;
- il software di misura appositamente sviluppato in ambiente Labview® e fornito come eseguibile con relativo *run-time*.

Il software automatizza tutte le procedure di calibrazione, misurazione, visualizzazione e salvataggio dei dati di misura.

2.2 Software di inversione per la determinazione dei parametri fisici del materiale poroso

I metodi di inversione per la determinazione dei parametri fisici dei materiali porosi sono stati proposti di recente da diversi autori [4,5].

Il software di inversione ICT-MAA-3MIC è il risultato di diversi anni di studio e sviluppo [6], e rappresenta il massimo stato di avanzamento attuale in questo settore; esso adotta un sistema ibrido di determinazione dei parametri fisici definiti dalla teoria di Johnson-Champoux-Allard [7,8] per i materiali porosi a struttura rigida, basato sulla minimizzazione tramite algoritmi genetici delle curve sperimentali per alcuni parametri, e sulla determinazione analitica del parametro resistenza al flusso. Da studi in corso di pubblicazione [9] è infatti risultato che solo un approccio di tipo misto consente di minimizzare gli inevitabili errori nella stima contemporanea di 5 parametri fisici che determinano il comportamento acustico dei materiali.

Il modello di Johnson-Champoux-Allard definisce le seguenti grandezze equivalenti:

$$(4) \quad \rho_e = \frac{\alpha_\infty \rho_0}{\phi} + \frac{\sigma}{i\omega} \sqrt{1 + \frac{4i\alpha_\infty^2 \eta \rho_0 \omega}{\sigma^2 \Lambda^2 \phi^2}} \quad [\text{kg/m}^3]$$

$$K_e = \frac{\kappa \cdot P_0 / \phi}{\kappa - (\kappa - 1) \left[1 + \frac{8\eta}{i\rho_0 \omega N_p \Lambda^2} \sqrt{1 + \frac{i\rho_0 \omega N_p \Lambda^2}{16\eta}} \right]^{-1}} \quad [\text{kg/ms}^2]$$

dove P_0 è la pressione statica dell'aria, κ è il rapporto dei calori specifici, N_p è il numero di Prandtl e η è la viscosità dinamica dell'aria.

Una volta note tali grandezze equivalenti è possibile determinare le grandezze acustiche complesse (impedenza caratteristica e numero d'onda complesso):

$$(5) \quad Z_c = \sqrt{\rho_e \cdot K_e} \quad [\text{Ns/m}^3] \quad \text{e} \quad k_c = \omega \sqrt{\rho_e / K_e} \quad [\text{m}^{-1}]$$

e da queste calcolare l'impedenza superficiale per mezzo della relazione (3).

Dalle espressioni precedenti si osserva che la densità effettiva e il modulo di compressibilità dipendono da cinque grandezze fisiche: resistività al flusso d'aria σ , porosità ϕ , tortuosità α_∞ , lunghezza caratteristica viscosa A e lunghezza caratteristica termica A' . Di seguito viene riportata una descrizione di queste cinque grandezze.

- La resistività al flusso d'aria è una misura della caduta di pressione statica che l'aria incontra al passaggio attraverso un dato materiale.
- La porosità viene definita come rapporto tra l'aria contenuta in un materiale (esclusivamente nelle celle aperte interconnesse tra loro e con l'esterno) ed il volume complessivo del materiale stesso.
- La tortuosità è un rapporto di grandezze dimensionali che tiene conto del percorso "sinuoso" dell'onda acustica all'interno del materiale.
- Le lunghezze caratteristiche, viscosa e termica, vengono introdotte per tener conto degli effetti viscosi e scambi termici tra le onde acustiche e la struttura nella quale esse si propagano. Fisicamente la lunghezza caratteristica viscosa esprime la dimensione caratteristica delle interconnessioni tra i pori, mentre la lunghezza caratteristica termica è correlata alla dimensione dei pori.

Il software determina i parametri fisici con le seguenti elaborazioni:

- a) calcolo della resistività al flusso d'aria calcolata come limite in bassa frequenza della densità equivalente sperimentale per mezzo della seguente formula:

$$(6) \quad \sigma = -\lim_{\omega \rightarrow 0} [\text{Im}(\rho_e(\omega)) \cdot \omega] \quad [\text{Ns/m}^4]$$

- b) determinazione degli altri 4 parametri dalla minimizzazione della seguente funzione di "costo" basata sulle misure sperimentali dell'impedenza superficiale:

$$(7) \quad CF(f, \phi, \sigma, \alpha_\infty, A, A') = \sum_{i=1}^n \left(|Z_{S_{\text{exp}}}(f_i) - Z_{S_{\text{mod}}}(f_i)| \right)^2 \quad [-]$$

dove con il pedice "exp" sono indicati i dati sperimentali e con "mod" quelli calcolati con il modello teorico.

Il minimo della funzione (7) è determinato mediante una procedura basata sulla teoria degli algoritmi genetici, un metodo di ricerca ed ottimizzazione, ispirato al principio della selezione naturale che regola l'evoluzione biologica.

Gli algoritmi genetici consentono la determinazione del minimo assoluto di una data funzione di costo e in genere non necessitano di una stima iniziale affidabile delle soluzioni. Inoltre permettono l'applicazione di una qualunque condizione di vincolo non lineare (quale ad esempio la condizione di vincolo non lineare $A' \geq A$ prevista

teoricamente).

Il software, sviluppato in ambiente Matlab® e fornito come eseguibile con relativo *run-time*, permette di visualizzare il comportamento acustico ottenuto dal modello teorico e di confrontarlo con quello sperimentale.

E' possibile migliorare la precisione della stima dei parametri fisici vincolandone alcuni al rispettivo valore effettivo, noto oppure ottenuto per via sperimentale. Per questo MateriAcustica ha sviluppato apposite apparecchiature per misurare sperimentalmente porosità [10] e tortuosità dei materiali [11].

In figura 2 vengono riportate le immagini dei software di misura e di inversione sviluppati da MateriAcustica. Nella stessa figura vengono riportate le apparecchiature per la misura sperimentale della porosità e tortuosità.

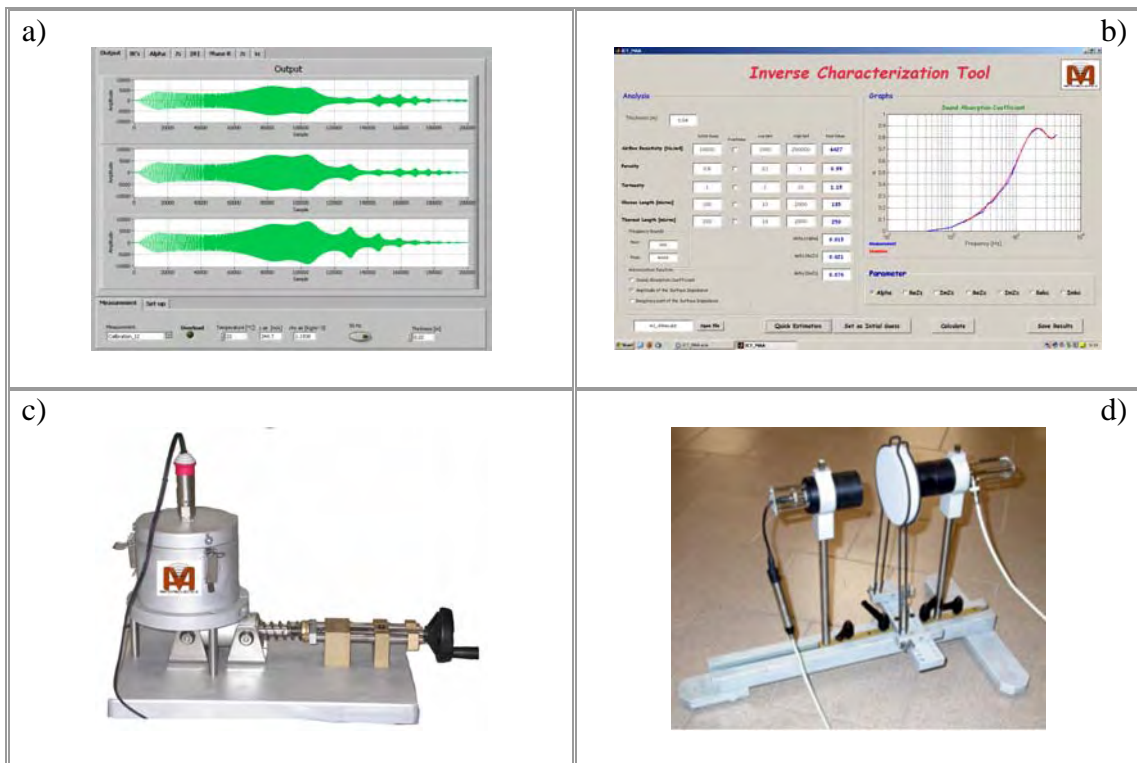


Figura 2: a) Software di misura delle proprietà acustiche complesse; b) software di inversione ICT-MAA ; c) sistema di misura della porosità; d) sistema di misura della tortuosità.




3. Esempi di caratterizzazione e modellazione di materiali

Per mostrare la procedura di completa caratterizzazione dei materiali porosi vengono riportati esempi relativi a 3 tipici materiali descritti in Tabella 1.

3.1 Risultati sperimentali

In figura 3 vengono riportate le misure sperimentali in termini di assorbimento acustico, impedenza superficiale e grandezze acustiche caratteristiche per i campioni in prova, eseguite con il sistema a 3 microfoni descritto al paragrafo 2.1.

Tabella 1 – Principali caratteristiche dei materiali testati

M1		Nome: Melamina Densità: 10 kg/m ³ Spessore: 20 mm
M2		Nome: Armafoam Sound Densità: 64 kg/m ³ Spessore: 24 mm
M3		Nome: Poliuretano Densità: 25 kg/m ³ Spessore: 20 mm

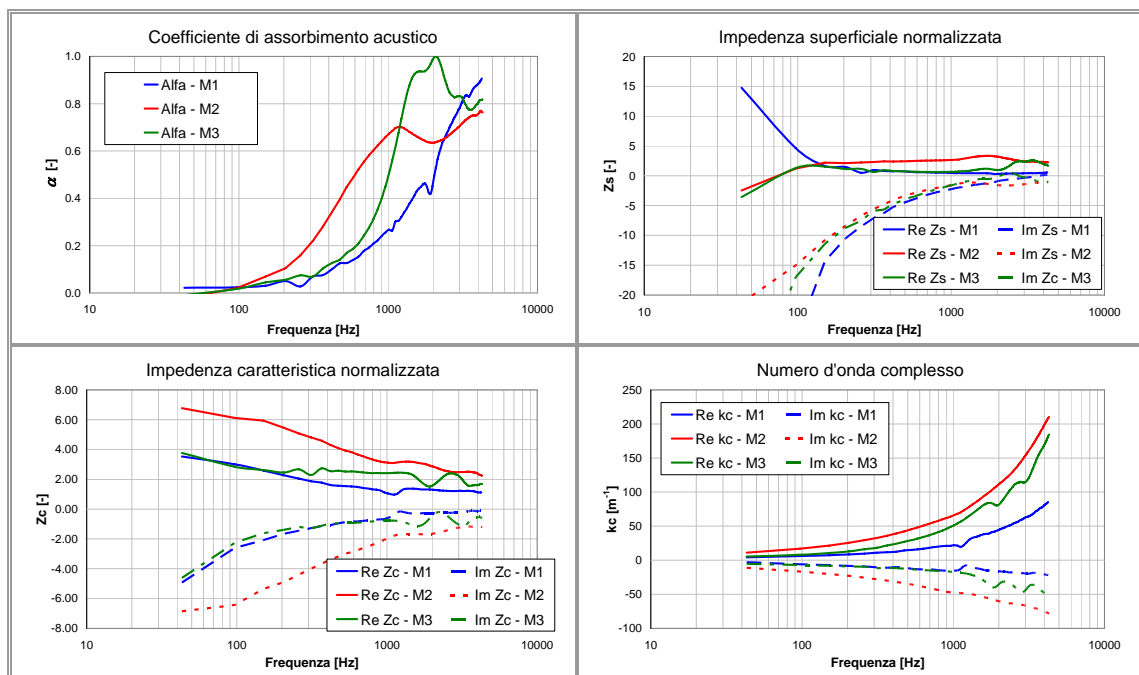


Figura 3 - Proprietà acustiche sperimentali per i tre materiali testati

Si noti che con la tecnica dei 3 microfoni in una singola misura si ottengono tutte le informazioni relative alla propagazione acustica delle onde sonore nel mezzo.

3.2 Inversione dei parametri e modellazione teorica

Dalle misure sperimentali, con la procedura descritta in 2.2 attraverso il software ICT-MAA-3MIC vengono calcolati i 5 parametri fisici, e di conseguenza modellate

tramite le (4) tutte le grandezze acustiche.

In tabella 2 è mostrato un confronto tra le grandezze acustiche calcolate con tecnica inversa con i valori sperimentali dei parametri fisici, misurati con le apparecchiature [10], [11], [12]. In Tabella 3 vengono riportati i valori degli scarti medi percentuali.

Tabella 2 – Confronto da dati sperimentali (ove disponibili) e calcolati dei parametri fisici

Materiale	Resistività al flusso d'aria		Porosità		Tortuosità		Lunghezza viscosa caratteristica		Lunghezza termica caratteristica	
	<i>Sper.</i>	<i>Calc.</i>	<i>Sper.</i>	<i>Calc.</i>	<i>Sper.</i>	<i>Calc.</i>	<i>Sper.</i>	<i>Calc.</i>	<i>Sper.</i>	<i>Calc.</i>
M1	10550	11697	0.99	0.92	1.01	1.03	--	100	--	188
M2	123501	130679	0.83	0.87	--	1.38	--	10	--	10
M3	12901	12470	0.98	0.98	1.41	1.82	--	30	--	41

Tabella 3 – Scarti medi percentuali per la resistività al flusso d'aria, porosità e tortuosità

Resistività al flusso d'aria	Porosità	Tortuosità
7%	4%	16%

E' necessario sottolineare che la tortuosità del materiale M2 le lunghezze caratteristiche di tutti i materiali non sono state misurate sperimentalmente.

I valori dei parametri fisici così determinati hanno un ruolo importante nel processo di ottimizzazione acustica di un materiale, ma sono innanzitutto fondamentali per la modellazione acustica del mezzo in programmi di simulazione (principalmente FEM, ma anche BEM e SEA).

In figura 4 è mostrato un confronto tra le misure sperimentali e quelle ricostruite tramite le grandezze fisiche calcolate ad il modello di JCA. In figura 5 vengono riportati i confronti tra i dati sperimentali e teorici dell'impedenza caratteristica e del numero d'onda complesso per il materiale M1.

Si noti come la modellazione acustica consenta di riprodurre i risultati sperimentali con notevole precisione. Infatti dal calcolo della medie delle differenze a ciascuna frequenza tra i coefficienti di assorbimento acustico sperimentale e teorico, ovvero:

$$(8) \quad \varepsilon = \sum_{i=1}^N \frac{1}{N} (|\alpha_{\text{exp}} - \alpha_{\text{mod}}|)$$

dove N è il numero di linee spettrali, si ottengono i seguenti valori:

Tabella 4 – Valor medio degli scarti tra i coefficienti di assorbimento sperimentale e teorico

	M1	M2	M3
ε	0.02	0.02	0.03

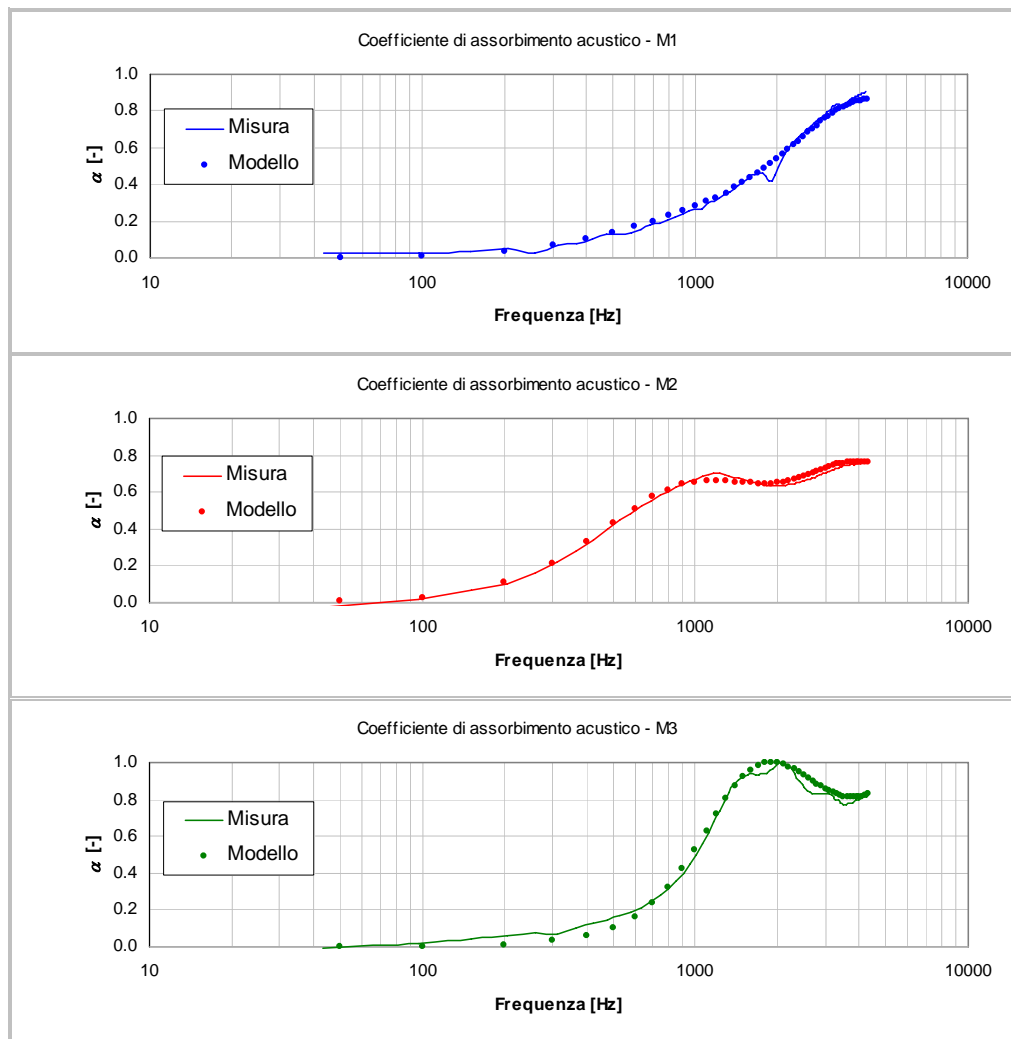


Figura 4 - Confronto tra curve sperimentali e teoriche per 3 materiali

3.3 Considerazioni sui risultati

Come si può osservare dai dati riportati nelle Tabelle 2 e 3, i valori della resistività al flusso ottenuti per mezzo del metodo analitico sono in buon accordo con i valori misurati sperimentalmente. Tali valori sono paragonabili alla riproducibilità tra laboratori per questa tecnica di misura [13].

La porosità è determinata con buona precisione (4%); è necessario sottolineare però che per qualche materiale (ad esempio M1) le differenze non sono trascurabili se confrontate con la precisione di misura, pari a circa 0.01 [10].

Per quanto riguarda i valori di tortuosità calcolati per mezzo del metodo di inversione si evidenziano discrepanze più marcate.

In ogni caso si può osservare che nonostante tali differenze, l'effetto sulle proprietà acustiche, riportate in figura 3, è limitato per tutti i materiali testati. In particolare si può osservare come le differenze tra i coefficienti di assorbimento, misurato e ottenuto per mezzo del modello di Johnson-Champoux-Allard, per il materiale M3, differiscano di circa il 5% per frequenze inferiori a 600 Hz, per effetto della differenza di tortuosità.

Un aspetto importante da sottolineare è che la procedura di inversione è basata

sull'utilizzo del modello di Johnson-Champoux-Allard per materiali a struttura rigida. Dalla figura 4, per il materiale M1, è possibile osservare che il modello riesce a rappresentare il corretto andamento della curva di assorbimento, ma non riesce a prevedere le risonanze presenti a frequenze intorno ai 2000 Hz, dovute alla struttura elastica del materiale. Tale aspetto rende notevolmente meno efficiente il processo di inversione, in quanto le soluzioni determinate risultano approssimate. Tale aspetto costituisce una limitazione delle procedure di inversione e può essere minimizzato limitando l'analisi alle frequenze esterne a tale intorno.

Dalla figura 5 si può notare come anche la ricostruzione dei parametri caratteristici sia affidabile.

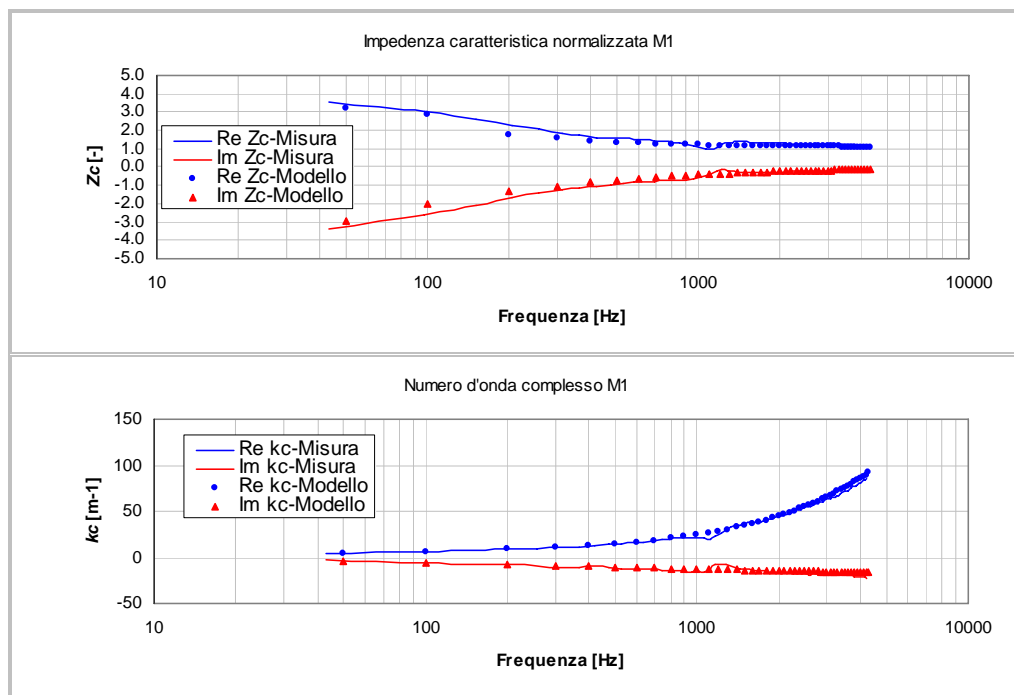


Figura 5 - Confronto tra curve sperimentali e teoriche per materiale M1

4. Conclusioni

La caratterizzazione acustica e fisica dei materiali porosi è stata oggetto negli ultimi anni di notevoli ricerche che hanno consentito lo sviluppo e la validazione di tecniche innovative ed efficaci.

Per minimizzare i costi delle apparecchiature ed i tempi per l'esecuzione delle prove sperimentali, si sono sviluppate tecniche numeriche che, a partire da misure acustiche sperimentali, consentono di calcolare diversi parametri che regolano la propagazione acustica all'interno di materiali porosi a struttura rigida.

MateriAcusticA ha sviluppato un sistema completo hardware e software che consente in tempi estremamente contenuti di caratterizzare il campo acustico e la struttura del materiale e modellare la propagazione acustica al suo interno. L'affidabilità di tali tecniche è stata in questa sede dimostrata con alcune delle numerose prove svolte su differenti materiali, e può essere ulteriormente migliorata aumentando il numero di parametri fisici sperimentalmente misurati.

La tecnica di inversione può essere applicata, con minore precisione, anche a misu-

re di impedenza superficiale eseguita con classico tubo d'impedenza; per tale utilizzo è stata sviluppata una versione semplificata di software chiamata MAA-INVERSION-2MIC, che può essere utilizzata dai laboratori ove già presente il classico ad impedenza a due microfoni.

Bibliografia

- [1] UNI EN ISO 10534-2:2001, Acustica - Determinazione del coefficiente di assorbimento acustico e dell'impedenza acustica in tubi di impedenza - Metodo della funzione di trasferimento.
- [2] 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).
- [3] McIntosh J. D., Zuroski M.T. and Lambert R. F., "Standing wave apparatus for measuring of acoustic materials in air fundamental properties of acoustic materials in air", *J. Acoust. Soc. Am.* 88(4) pp.1929-1938 (1990).
- [4] Atalla Y. and R. Panneton, "Inverse characterization of the geometrical macroscopic parameters of porous materials", *Canadian Acoustics* 28 (2000).
- [5] Tran-van J., Olny X., Sgard F.C. and Gervais Y., "Global Inverse Methods for determining the Acoustical Parameters of Porous Materials", *Proceedings ICA 2001 Rome*.
- [6] P. Bonfiglio, F. Pompoli, "Comparison of different inversion techniques for determining physical parameters of porous media", *Proceedings of ICA 2007, Madrid September 2-7 (2007)*.
- [7] Johnson D.L., Koplik J. and Dashen R., "Theory of dynamic permeability and tortuosity in fluid-saturated porous media", *Journal of Fluid Mechanics* 176 (1987).
- [8] Champoux Y. and Allard J.F., "Dynamic tortuosity and bulk modulus in air-saturated porous media", *Journal of Applied Physics* 70(4) (1991).
- [9] P. Shrivage, P. Bonfiglio, F. Pompoli, "Hybrid Inversion technique for predicting geometrical parameters of Porous Materials", *submitted at Acoustics'08, Paris 29/6-4/7 (2008)*.
- [10] F. Pompoli, P. Bonfiglio, "Apparecchiatura per la misura della porosità di materiali a cella aperta", *Atti del XXXIV Convegno Nazionale AIA, Firenze (2007)*.
- [11] P. Bonfiglio, F. Pompoli, "Misura sperimentale della tortuosità di materiali a cella aperta con tecnica ad ultrasuoni", *Atti del XXXIV Convegno Nazionale AIA, Firenze (2007)*.
- [12] M. Garai, F. Pompoli, "Realizzazione e calibrazione di una apparecchiatura per la misurazione della resistenza al flusso d'aria con metodo a flusso alternato a norma UNI EN 29053", *Rivista Italiana di Acustica*, Vol. 25 n. 4 (2001).
- [13] M. Garai, F. Pompoli, "A European Inter-Laboratory Test of Airflow Resistivity Measurements", *Acustica-Acta Acustica* Vol 89 (2003).